



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
CIVIL - H I D R Á U L I C A

DISEÑO DE NOMOGRAMAS DE PELIGRO ASOCIADOS A LA GENERACIÓN DE MAPAS
DE RIESGO POR INUNDACIÓN

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. HUGO IVÁN VERA BENÍTEZ

TUTOR
DR. VICTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

JIUTEPEC, MORELOS, ABRIL DE 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. González Verdugo José A.
Secretario: M. I. Rodríguez Varela José Manuel
Vocal: Dr. Alcocer Yamanaka Víctor Hugo
1^{er}. Suplente: Dr. Valdés González Carlos Miguel
2^{do}. Suplente: M. I. Rubio Gutiérrez Horacio

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
DEPFI-UNAM, Campus Morelos
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Colonia progreso
C.P. 62550
Jiutepec, Morelos
México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Alcocer Yamanaka Víctor Hugo

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad en todos los sentidos de cumplir esta meta profesional en mi vida. *TODO LO PUEDO EN CRISTO QUE ME FORTALECE. Fil. 4:13.*

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca que me otorgó para la conclusión de mis estudios de maestría.

A mis padres Marcos y Eli, quienes me enseñaron a dar mis primeros pasitos y posteriormente a continuar con mis objetivos personales y profesionales; ¡gracias! por todo el apoyo y dedicación que me han brindado, han sido pilares en mi vida. A mi hermano Eduardo, espero ser un ejemplo a seguir para ti, y con ello te fijes metas que puedas alcanzar en todo momento.

A Irleth, muchas gracias por tus palabras, tus consejos y el apoyo que me brindaste para concluir esta etapa.

A mis compañeros de maestría, con quienes compartí gratos momentos; Dany, Tania, Isaí, Jonathan, Carlos, Roger, Josué y en especial a mis amigos Omar y Miguel; por los consejos, el compañerismo y el ímpetu que mostraron para concluir la maestría.

A mis profesores de asignatura, en especial a mi tutor de tesis el Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka; por el tema asignado y por la dedicatoria para el desarrollo de este trabajo.

A la Lic. Olga Guzmán, por la paciencia, dedicación y la disponibilidad en cada uno de los requerimientos durante mi estadía en el posgrado.

Al M.I. Manuel Rodríguez, al M.I. Oscar Llaguno, M.I. Pedro Albornoz, M.I. Antonio López; por los aportes puntuales que tuvieron en esta tesis.

... Y a todas las personas que contribuyeron de manera voluntaria en las pruebas del módulo físico experimental.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Inundaciones.....	4
1.2	Clasificación de las inundaciones.....	5
1.2.1	De acuerdo con su origen.....	5
1.2.2	Por el tiempo de respuesta de la cuenca.....	6
1.3	Mitigación daños por inundaciones.....	8
1.4	Justificación.....	9
1.5	Objetivos.....	10
1.6	Alcances de la tesis.....	10
1.7	Resultados esperados.....	10
2	ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1	Criterio de peligro por inundación, Témez 1992.....	13
2.2	Criterio de la Office Fédéral de l’Economie Des Eaux (OFEE).....	14
2.3	Criterio de la Federal Emergency Management Agency (FEMA).....	15
2.4	Criterio aplicado en la ciudad de Dórrigo, Australia.....	16
2.5	Inestabilidad humano en flujo de inundaciones.....	17
2.6	Metodología numérico – experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles.....	18
2.7	Módulo físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas.....	19
2.8	Estabilidad de Personas en Flujos de Agua.....	20
2.9	Clasificación de curvas de peligro en una inundación Velocidad-Tirante (Bureau of Reclamation).....	21
2.10	Criterios de peligro en un medio urbano.....	22
3	CRITERIOS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIÓN Y SU IMPORTANCIA.....	25
3.1	Criterio de peligro por inundación.....	27
3.2	Criterio de vulnerabilidad.....	28
3.2.1	Índice de vulnerabilidad.....	29
3.2.2	Funciones de vulnerabilidad para el menaje.....	31
3.3	Criterio de riesgo por inundación.....	32
3.4	Evaluación de acciones preventivas ante inundaciones.....	34
3.4.1	Acciones para mitigar los efectos causados por una inundación.....	35
3.5	Mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones.....	42
3.6	Zonificación.....	43
4	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE NOMOGRAMAS DE PELIGRO POR INUNDACIÓN EN ZONAS URBANAS.....	45
4.1	Estudio de pendientes predominantes en vialidades de la República Mexicana.....	48
4.1.1	Sistemas de Información Geográfica.....	53
4.1.2	Vialidades consideradas por zona propuesta.....	57
4.2	Diseño de módulo físico experimental.....	75
4.3	Tanque de almacenamiento.....	78
4.4	Construcción de módulo físico experimental.....	83

4.5	Prueba de hermeticidad del módulo.....	88
4.6	Estructuras de seguridad.....	90
4.7	Equipo de seguridad.....	91
4.8	Pruebas piloto	92
4.9	Equipos de medición	94
4.10	Consideraciones experimentales.....	95
4.11	Consideraciones físicas promedio de habitantes en la República Mexicana.....	96
5	RESULTADOS.....	97
5.1	Descripción de las pruebas de estabilidad al vuelco	99
5.1.1	Criterios a considerar durante las pruebas experimentales	99
5.1.2	Medición de parámetros – Tirantes y Velocidades	100
5.2	Descripción de generación de nomogramas.....	103
5.2.1	Nomogramas propuestos.....	104
5.3	Metodología para la generación de modelo de simulación de escurrimiento urbano	106
5.4	Generación de modelo para la simulación de inundaciones urbanas en Chetumal	108
5.4.1	Modelación Hidráulica para la obtención de tirantes y velocidades en la zona de estudio	110
5.4.2	Variación de velocidades y tirantes y generación de malla	111
5.4.3	Descripción de puntos – datos de tirantes y velocidades.....	113
6	CONCLUSIONES.....	115
6.1	Generación de escenarios – Mapas de Peligro	117
6.1.1	Mapas de peligro - Mujeres	118
6.1.2	Mapas de peligro - Hombres.....	121
6.2	Comparación de resultados	124
6.2.1	Comparación de mapas de peligro por inundación	124
6.2.2	Comparación de áreas de inundables	131
6.2.3	Comparación de porcentajes de áreas de inundación	133
7	BIBLIOGRAFÍA	135

1 INTRODUCCIÓN

Las zonas urbanas que presentan un crecimiento poblacional desmedido, así como también los asentamientos en las zonas bajas de una cuenca o a orillas de un río, son propensas a inundarse continuamente. La intensidad de las lluvias puede variar de un lugar a otro, por ejemplo, en zonas asociadas a fenómenos meteorológicos como ciclones o tormentas muy severas en un lapso corto de tiempo y en un área de poca extensión. En las planicies de los grandes ríos de México, prácticamente todos los años se producen inundaciones derivadas por su desbordamiento. Mientras que en las zonas con climas secos son menos frecuentes, pero causan serios problemas cuando se llegan a presentar.

Se han realizado diversas investigaciones para aminorar el peligro que genera el impacto de una inundación en las zonas urbanas, donde las afectaciones involucran tres grupos, que debido a su naturaleza, se pueden enlistar de la siguiente manera:

- Afectaciones al peatón de manera directa.
- Afectaciones a la infraestructura.
- Afectaciones a las vías de comunicación.

La finalidad de esta tesis es estudiar las condiciones de estabilidad y deslizamiento de peatones durante una inundación. Para conocer el nivel de afectación al cual se puede estar expuesto. Existen nomogramas de peligro que involucran dos parámetros: el tirante y la velocidad del flujo, debido a que los nomogramas existentes, generalmente se han diseñado efectuando consideraciones de zonas urbanas propias del país donde fueron desarrollados.

Se realizaron ensayos implementando un módulo físico experimental, que reproduce una calle con el mayor detalle posible en sus componentes y en las condiciones urbanas presentes en México. Es necesario realizar dicho estudio y evitar el empleo de criterios diseñados para otras condiciones o países. De tal manera que los nomogramas de peligro por inundación generados en esta tesis, puedan ser utilizados como una componente para la generación de mapas de riesgo, obteniendo soluciones y programas en el ordenamiento territorial más adecuados para México.

1.1 Inundaciones

Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más comunes en nuestro país, prácticamente todos los años se producen; por ejemplo; a causa del desbordamiento de los ríos, debido al exceso de lluvia, que pueden causar daños severos. Los efectos negativos de las inundaciones, se deben en gran medida por la actividad humana, por la deforestación y la ubicación de las viviendas en zonas bajas cercanas a ríos o costas.

Definición de inundación

Una inundación es el evento que debido a la precipitación (lluvia, nieve o granizo extremo), oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura.

Causas de las inundaciones debido a actividades humanas

- La urbanización de las ciudades provoca que el suelo se cubra con una capa impermeable de concreto o asfalto, que no permiten que el agua de la lluvia penetre en el suelo.
- Destrucción de la cobertura vegetal del suelo, arrastrando tierra hacia partes bajas y provocando azolves de ríos y presas.
- Cuando se construyen viviendas cerca de los ríos y barrancas, se pueden presentar inundaciones ante un desbordamiento causado por una tormenta severa.
- Exceso de precipitación en época de ciclones tropicales o en la presencia de un frente frío.
- Falla de obras hidráulicas debido a fracturas en una presa, dique o bordo, el agua almacenada sale rápidamente y puede causar graves daños a poblaciones ubicadas en las zonas bajas o aguas abajo.

1.2 Clasificación de las inundaciones

Las clasificaciones más comunes obedecen a su origen, o bien, al tiempo que tardan en presentarse sus efectos. (CENAPRED, 2013).

1.2.1 De acuerdo con su origen

En este punto se trata de identificar la causa de la inundación. Los principales tipos son:

- **Inundaciones pluviales**

Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca). La República Mexicana es afectada por precipitaciones originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos.

- **Inundaciones fluviales**

Se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada. Es importante observar que el volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud) o que lleguen hasta las planicies costeras.

- **Inundaciones costeras**

Se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno. La marea de tormenta es generada por los vientos de los ciclones tropicales sobre la superficie del mar y por la disminución de la presión atmosférica en el centro de estos meteoros. Por su parte, el oleaje en el océano puede ser provocado por diferentes factores; sin embargo, su causa más común es el viento. La suma de los efectos de ambos fenómenos, puede causar importantes estragos.

- **Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica**

Existe una causa que puede generar una inundación, aún más grave que las antes mencionadas: si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran obras.

1.2.2 Por el tiempo de respuesta de la cuenca

La respuesta hidrológica de una cuenca depende de sus características fisiográficas. Básicamente se han definido dos grupos: inundaciones lentas e inundaciones rápidas. Lo anterior significa que en cuencas cuya respuesta hidrológica es lenta se generan avenidas en un tiempo relativamente largo (del orden de varias horas o días); en ellas ocurren principalmente daños materiales. Mientras que cuando la inundación se forma en poco tiempo (desde unos cuantos minutos, hasta un par de horas) se llama inundación súbita, causando, principalmente, la pérdida de vidas humanas en zonas pobladas.

- **Inundaciones lentas**

Al ocurrir una precipitación capaz de saturar un terreno relativamente plano, esto es, cuando el suelo puede seguir absorbiendo más agua de lluvia, el volumen remanente escurre por los ríos y arroyos o sobre el terreno.

Conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de la cuenca, se incrementa proporcionalmente con el área drenada, si el volumen que fluye por el cauce excede la capacidad de éste, se presentan desbordamientos sobre las márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado.

- **Inundaciones súbitas:**

Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Normalmente se asocian a terrenos con gran pendiente.

Las zonas urbanas son usualmente sitios donde se presenta este tipo de avenidas, como consecuencia de la “cubierta impermeable” formada artificialmente por los edificios y calles, así como por la deforestación. Debido a ello, el agua no puede infiltrarse y prácticamente todo el volumen precipitado se convierte en escurrimiento.

Así, donde antes una tormenta humedecía la tierra y regaba la hierba y los árboles, ahora bastan unos cuantos minutos para generar una avenida que arrastra todo lo que encuentra a su paso.

La diferencia entre inundaciones lentas e inundaciones súbitas es el tiempo que tardan en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. Una manera de caracterizar este tiempo es mediante el llamado “tiempo de concentración”, que es una característica de cada cuenca.

Afectaciones que genera una inundación

- Pérdida de vidas humanas
- Daño a la vivienda e infraestructura expuesta y vulnerable
- Desarrollo de virus y bacterias que provocan infecciones y enfermedades
- Pérdida de cosechas y el patrimonio de la población expuesta y vulnerable
- Pérdida de ganado
- Desabasto y contaminación de alimentos y agua
- Interrupción de los servicios básicos como el agua, luz, gas, y vías de comunicación: caminos, puentes, etc.
- Arrastre de sólidos como árboles, piedras, objetos, etc.

Fuente: CENAPRED. Fascículo de inundaciones, 2013.

1.3 Mitigación daños por inundaciones

Para llevar a cabo acciones en contra de los daños causados por inundaciones, es indispensable emprender acciones de protección. Éstas pueden ser de dos tipos:

- **Medidas estructurales (construcción de obras), o**
- **Medidas no estructurales (indirectas o institucionales).**

El objetivo de las medidas estructurales es evitar o mitigar los daños provocados por una inundación, mediante la construcción de obras (usualmente realizadas por las dependencias gubernamentales, ya que se requiere de fuertes inversiones). Por ejemplo, para proteger una zona urbana surcada por un río se pueden proponer como medidas estructurales la retención, almacenamiento y derivación del agua, hacer modificaciones al cauce (canalizarlo o entubarlo), construir bordos o muros de encauzamiento y modificar puentes o alcantarillas.

Por otra parte, entre las medidas no estructurales se encuentran aquéllas cuya finalidad es informar oportunamente a las poblaciones ribereñas de la ocurrencia de una posible avenida, para que no haya muertes y se minimicen los daños. En este rubro se incluyen los reglamentos de usos del suelo, el alertamiento y los programas de comunicación social y de difusión.

Desde el punto de vista económico, tanto las medidas estructurales como las no estructurales tienen aplicación en las zonas que ya están desarrolladas; mientras que en las áreas poco desarrolladas las segundas muchas veces tienen el mismo o un mayor impacto que las estructurales.

Por ejemplo, en una comunidad con pocos habitantes la construcción de una presa (medida estructural) resulta mucho más costoso que la reubicación (medida no estructural) de la población.

Concluyendo, se puede mencionar que las acciones estructurales tienden a minimizar los daños de las inundaciones con la construcción de obras, mientras que las no estructurales tratan de hacerlo sin la construcción de éstas. (CENAPRED, 2013).

1.4 Justificación

Las inundaciones en México son un problema que representan pérdidas para los sectores económicos, sociales y educativos; incluso llegan a afectar el bienestar de la población, a causas de los efectos de las lluvias (daños directos y enfermedades); dichas inundaciones pueden ocurrir por el desbordamiento de un río, falta de capacidad de los drenajes urbanos, entre otros.

El CENAPRED, en su publicación “Fascículo de inundaciones” (CENAPRED, 2013); expone importantes pérdidas humanas y económicas. Debido a estos acontecimientos es importante contar con información precisa y fiable para aminorar las afectaciones que se han presentado en el país; desarrollando programas y elementos que prevengan, mitiguen y actúen ante los problemas generados por inundaciones. Lo anterior permite desarrollar acciones *estructurales y no estructurales*.

Las medidas estructurales son obras que interfieren directamente con el agua de lluvia o con la que escurren por los ríos, para impedir su paso, confinarla, encauzarla o modificar su desplazamiento y caudales.

Las medidas no estructurales tienen el propósito de ordenar, regular, proteger el desarrollo de la cuenca, enfocándose principalmente en reducir principalmente la vulnerabilidad. Los mapas de riesgo por inundación son una alternativa no estructural que permite conocer las pérdidas que pueden sufrir un grupo de bienes expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales (*inundación*), bajo diferentes escenarios (Ordaz et al., 2013); estructurados en diferentes países como la combinación del peligro de inundación y la vulnerabilidad de la zona (Ribera, 2004).

Es importante conocer el peligro en el que se encuentra cada ciudad debido a las inundaciones, para así desarrollar programas de operación, infraestructura o desarrollo urbano integrales para cada ciudad ante dichos problemas, ya sean por causas naturales o antrópicas.

1.5 Objetivos

Los objetivos principales son:

- Generar criterios de peligro asociados a personas.
- Diseño de nomograma de peligro por inundación; que considera afectación a peatones de manera directa.

1.6 Alcances de la tesis

Se definirán criterios necesarios con base a los nomogramas de peligro propuestos para la generación de mapas de riesgo por inundación, aceptables para las características físicas presentes en zonas urbanas de México.

1.7 Resultados esperados

Mediante el diseño de un módulo físico experimental en laboratorio, se implementaran diferentes escenarios para la simulación de inundación en zonas urbanas, considerando diferentes tirantes, velocidades, pendientes y rugosidades. Con las anteriores consideraciones se podrán generar parámetros de peligro por inundación que afectan directamente a personas mediante la acción de deslizamiento; así mismo se construirán nomogramas de peligro por inundación en zonas urbanas, para las condiciones actuales presentes en la República Mexicana.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Criterio de peligro por inundación, Témez 1992

Para analizar la estabilidad de personas en zonas urbanas durante inundaciones, se han propuesto módulos físicos experimentales, representando una vialidad y tomando en cuenta distintas situaciones a las que puede presentar una persona durante la acción de cruzar una calle; provocando una pérdida de estabilidad por los efectos que genera el tirante y la velocidad. Se han desarrollado nomogramas de peligro por inundación (ver Figura 2-1); y dependiendo del autor, puede considerar algunas condiciones durante el estudio más relevantes que otras. (Témez, 1992)

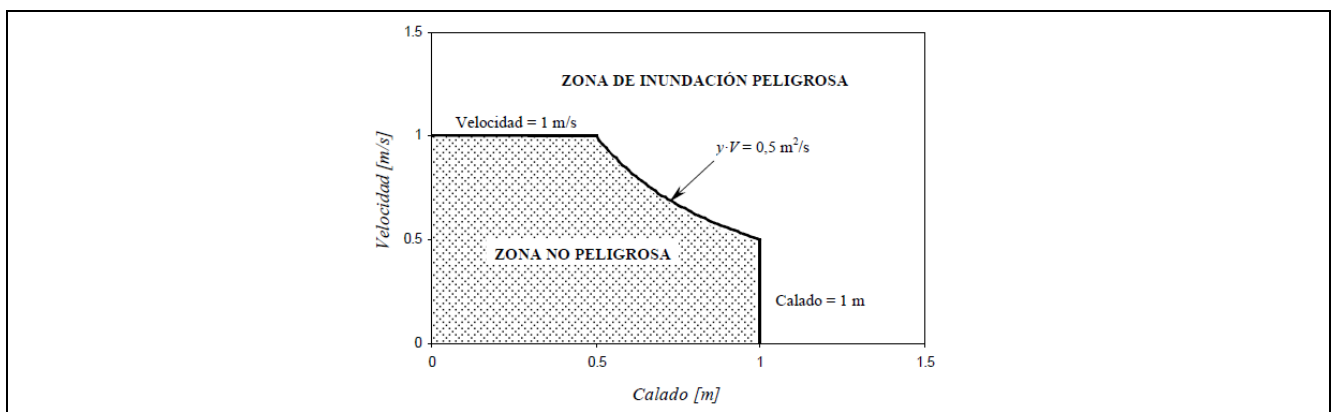


Figura 2-1 Nomograma de peligro por inundación. (Témez, 1992)

Diversos autores proponen criterios basados sobre la consideración conjunta de los tirantes y velocidades del flujo. De hecho el flujo ejerce sobre los peatones que deben cruzar calles o circular por vías peatonales, una fuerza y un momento que pueden provocar fenómenos de *deslizamiento*, *arrastré* y *vuelco* (ver Figura 2-2). También en este caso, los módulos utilizados en los estudios analizados, en general no han tenido en cuenta el perfil real de las calles (aceras, calzadas con bombeo, etc.) proporcionando resultados más útiles para medio rural y cauces naturales que para medio urbano (Abt et Al., 1989) y (Reiter, 2000)

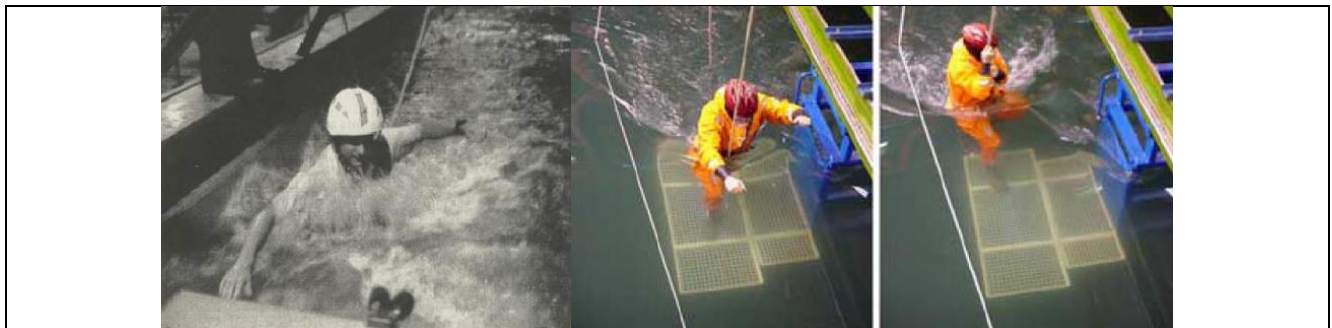


Figura 2-2 Pruebas experimentales sobre la estabilidad humana en canales (Abt et al., 1989; ARMC, 2000).

2.2 Criterio de la Office Fédéral de l'Economie Des Eaux (OFEE)

La Oficina Federal de la Economía de las Aguas, Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE por sus siglas en francés), es una dependencia del Gobierno de Suiza dependiente del Departamento del Medio Ambiente, Transportes, Energía y Comunicaciones. La OFEE, creó un criterio para evaluar los peligros generados por las inundaciones basado en tres niveles (Loat & Petrascheck, 1997). En México (Rodríguez et al., 2013) realizó una serie de mapas de peligro con este criterio enfocada a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. El criterio se basa en tres categorías:

- **Nivel Alto:** La población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas, y las edificaciones están en peligro de colapsar.
- **Nivel Medio:** La población está en riesgo fuera de las viviendas y las edificaciones pueden sufrir daños y colapsar dependiendo de sus características estructurales.
- **Nivel bajo:** El daño que pudiera sufrir la población es bajo, aunque las edificaciones pueden sufrir daños leves; la inundación o el arrastre de sedimentos pueden llegar a afectar el interior de las edificaciones.

Estos criterios relacionan la velocidad y el tirante del flujo " vh " (ver Figura 2-3), y los daños que puede ocasionar una inundación en una infraestructura por la intrusión de agua en los predios. (El criterio se enfoca más a los daños en infraestructura, por la intrusión del agua en los predios y se apoyó en la ecuación " vh " para determinar la distribución de peligro)

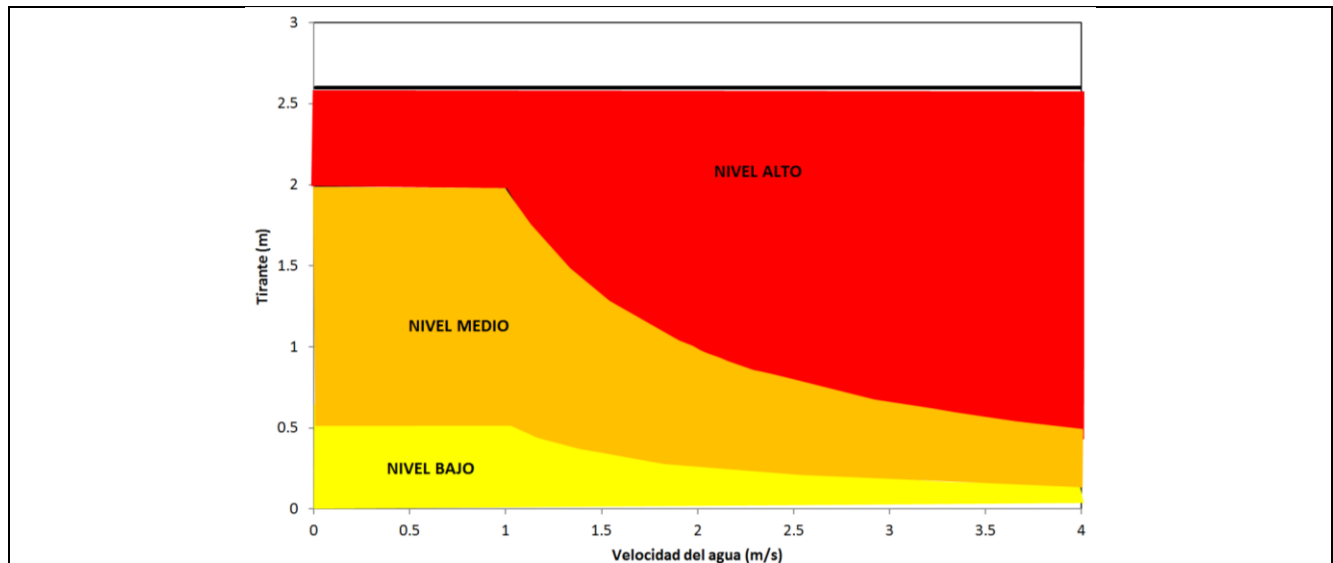


Figura 2-3 Nivel de peligro para inundaciones adaptada de (Loat & Petrascheck, 1997)

2.3 Criterio de la Federal Emergency Management Agency (FEMA)

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, desarrolló un criterio para la generación de mapas de peligro (FEMA, 2009), retomado de (Rodríguez et al., 2014), en el que relaciona la profundidad máxima o tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua (ver Figura 2-4) Con base en estas relaciones establece tres rangos de peligro: zona de nivel bajo, zona de amenaza moderada, zona de alto nivel de amenaza. En México se ha realizado mapas con este criterio (Cervantes, 2012) realizó mapas de peligro para el río Coetan y además para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- **Zona de alto peligro:** la vida de las personas puede estar en peligro y se tienen afectaciones estructurales de las edificaciones.
- **Zona de precaución:** se tienen daños a la integridad de las personas y afectaciones en las edificaciones.
- **Zona de bajo peligro:** no representa una afectación a la población, pero las edificaciones pueden sufrir daños ligeros.

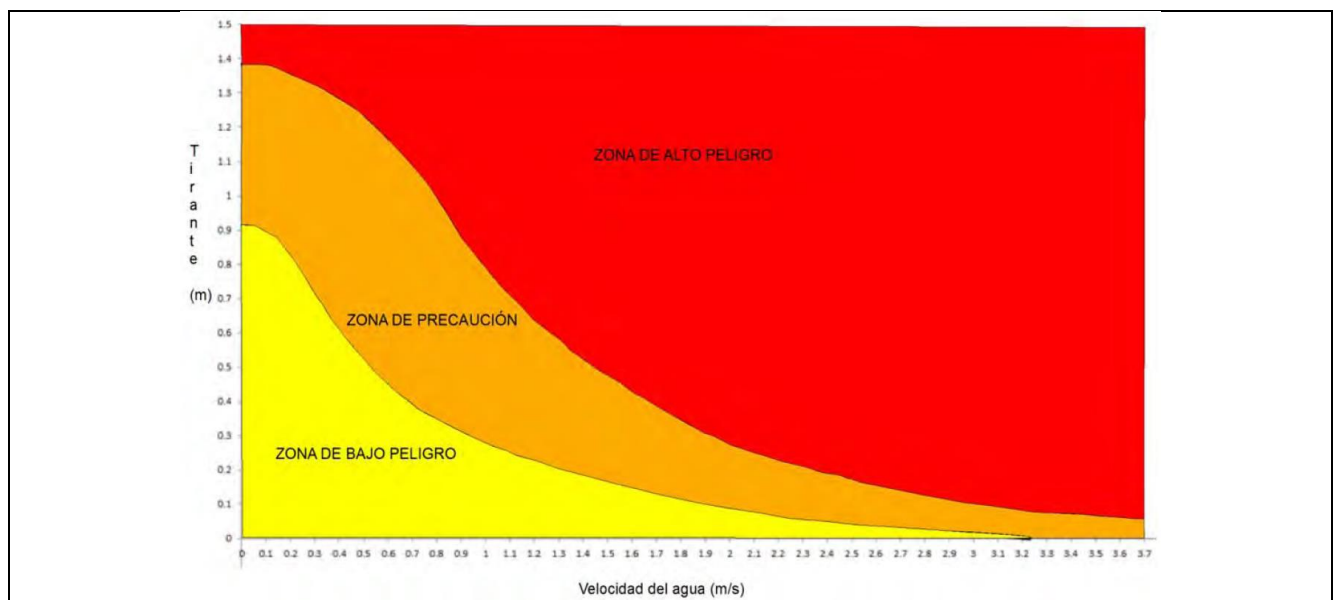


Figura 2-4 Niveles de peligro que relacionan el tirante del agua (m) y la velocidad (m/s) adaptada de (FEMA, 2009).

2.4 Criterio aplicado en la ciudad de Dórrigo, Australia

El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia, donde se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua como el mostrado en la Figura 2-5, en el que se definen tres rangos de peligro para la zona de New South Wales (NWS, 2005) . Este criterio está basado en la inundación máxima probable y el nivel de inundación, su aplicación ha sido utilizada en México, donde (Fuentes Mariles O. A., 2011) genero mapas de peligro por inundación para la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

- **Nivel alto:** Posible peligro para la seguridad de las personas, donde la evacuación por vehículos es difícil, además los adultos tiene dificultad para cruzar las calles con seguridad y existe un potencial daño estructural a las construcciones.
- **La zona de transición:** destaca por un color intermedio, donde el grado de peligro depende de la condiciones del lugar.
- **Nivel bajo:** En caso de ser necesario, los vehículos pueden evacuar a las personas y sus posesiones, los adultos pueden tener una pequeña dificultad para cruzar las avenidas con seguridad.

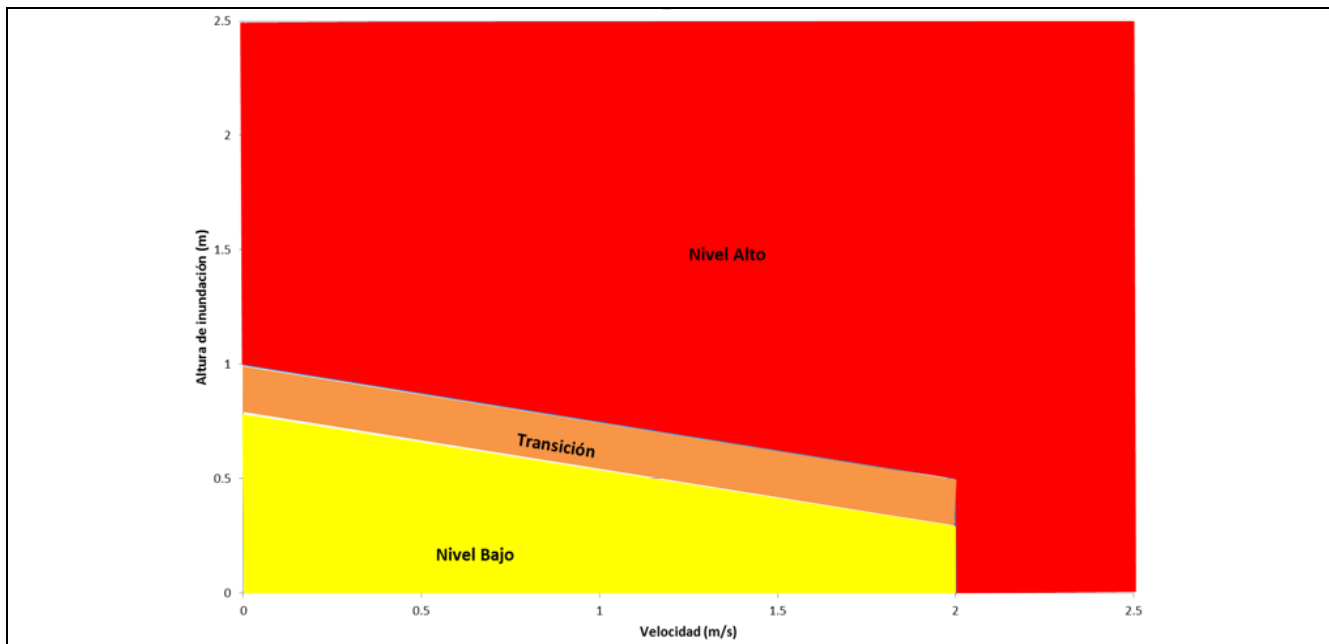


Figura 2-5 Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NWS, 2005)

2.5 Inestabilidad humano en flujo de inundaciones

(Jonkman, S.N. and E. Penning-Rowsell, 2008)

El experimento se llevó a cabo con un canal a gran escala, donde compuertas controlan la descarga en el río Lea. En épocas de inundación se abren las compuertas, para activar el canal, mientras que en circunstancias normales se cierran para mantener el flujo a través de un vertedor lateral en el río Lea, España. (Ver Figura 2-6



Figura 2-6 Dos fotos que muestran al sujeto en el canal: Prueba permanente (izquierda), prueba corta (derecha)

Las diferencias entre (Abt et Al, 1989) y observaciones de RESCDAM, (Desarrollo de Acciones de Rescate con Base al Análisis de Inundaciones por Falla en Presas), (Karvonen, A., H.K., & A., 2000); podrían estar relacionados con las circunstancias de prueba y el tipo de ropa que las personas estaban usando. Las pruebas FHRC (Centro de Investigación de Riesgo por Inundación), se vestían con ropa similar que en las pruebas por RESCDAM, un traje seco.

En particular, los datos por FHRC, confirman que, para altas velocidades y bajas profundidades, se produce la inestabilidad antes de lo que se esperaría de acuerdo con el producto de la profundidad y velocidad para el momento de inestabilidad. (Ver Figura 2-7).

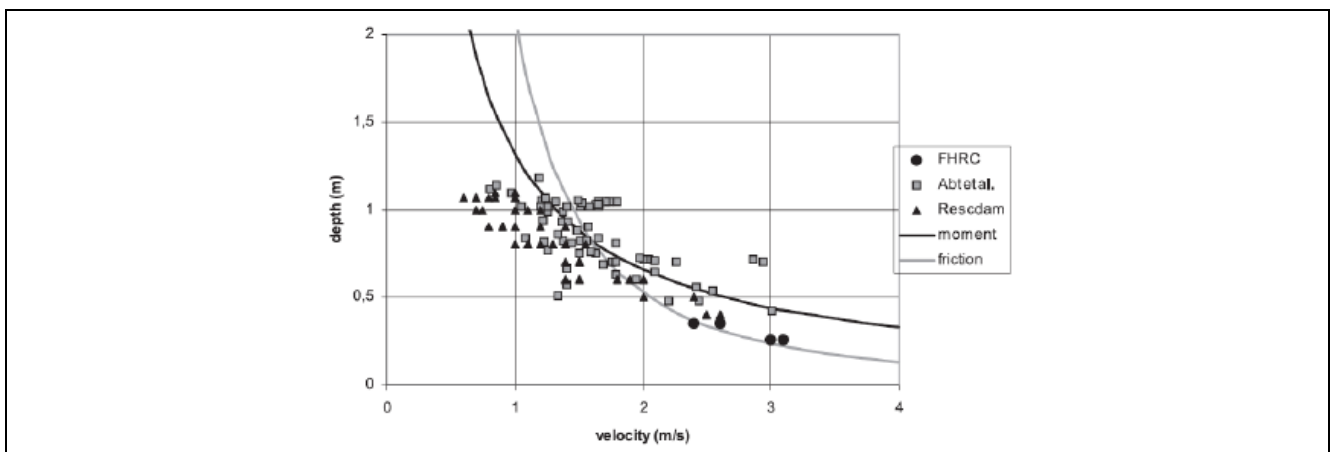


Figura 2-7 Combinaciones de tirante - velocidad

2.6 Metodología numérico – experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles

(Nanía Escobar , 1999)

El objetivo principal fue el desarrollo de un modelo numérico que permita conocer las características del flujo (velocidad, tirante) a lo largo de un conjunto de calles cuando éstas actúen como red de drenaje pluvial (ver Figura 2-8). Para ello se ha diseñado un módulo que simula el comportamiento hidráulico (flujo no permanente unidimensional) en las propias calles. Este módulo utiliza como condiciones de frontera en los extremos de las calles, los resultados obtenidos en un estudio experimental del comportamiento hidráulico de los cruces, supuesto régimen supercrítico en las calles de entrada y salida. A partir de los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo numérico, se proponen unos criterios para definir el peligro por inundación.

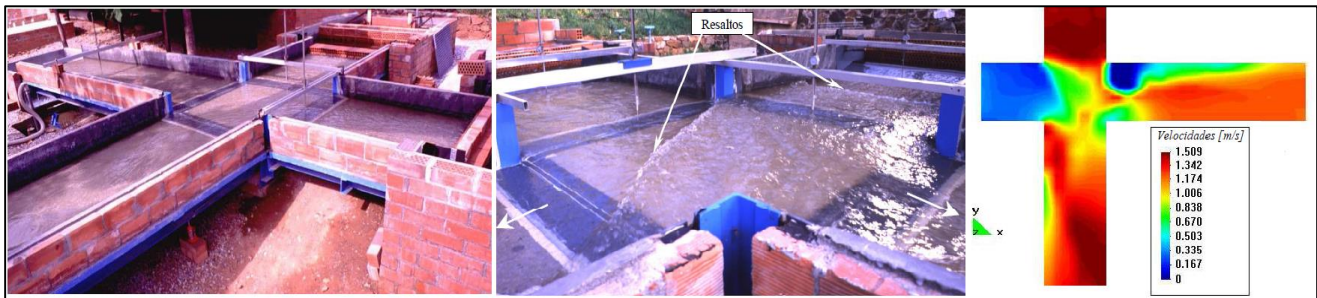


Figura 2-8 Módulos experimental y modelo numérico (distribución de tirantes y velocidades)

Se consideró un tirante máximo admisible a partir del Manual de criterios de Drenaje de Denver, Colorado (Wright - McLaughlin, 1969), tirante < 0.45 m, para protección de viviendas; y (Témez, 1992) tirante < 0.3 m, ya que existe serio riesgo de pérdida de vidas humanas o graves daños personales. (Ver Figura 2-9).

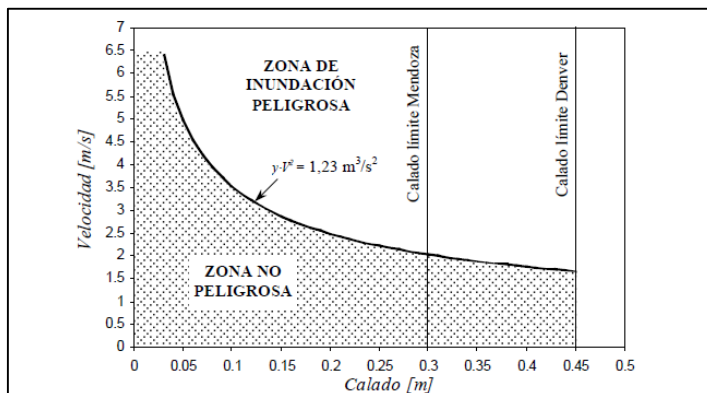


Figura 2-9 Criterio propuesto para la delimitación de la zona de inundación peligrosa

$$v * y^2 \leq \frac{2\mu P}{C_D \rho b} 1.23 \frac{m^3}{s^2}$$

2.7 Módulo físico para el estudio de los criterios de riesgo en zonas urbanas

(Manuel Gómez, Francesco Macchione, Beniamino Russo, 2010)

Tomando en cuenta estudios realizados 1997 por el Grupo de Investigación FLUMEN (Instituto en Dinámica Fluvial e Ingeniería Hidrológica), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) se inició una línea de investigación en el campo de la estructura de drenaje superficial de la hidráulica. La primera campaña experimental refiere a la caracterización hidráulica de varias entradas de uso general en Barcelona. Con este objetivo, fue diseñado un módulo físico y construido en el laboratorio de hidráulica de la UPC (Figura 2-10).



Figura 2-10 Individuo durante un ensayo. Departamento de la UPC

Los parámetros de las condiciones del flujo asociados a riesgo alto se han comparado con los criterios de riesgo teórico de deslizamiento y vuelco (Témez, 1992) y (Nanía, 1999). Como se puede observar en la Figura 2-11, casi todos los puntos están por debajo de las gráficas de (Nanía, 1999), mientras están siempre por encima de la de (Témez, 1992), demostrándose que los criterios teóricos de estabilidad al vuelco y al deslizamiento son inadecuados para representar la realidad de la estabilidad de individuos durante inundaciones en medio urbano.

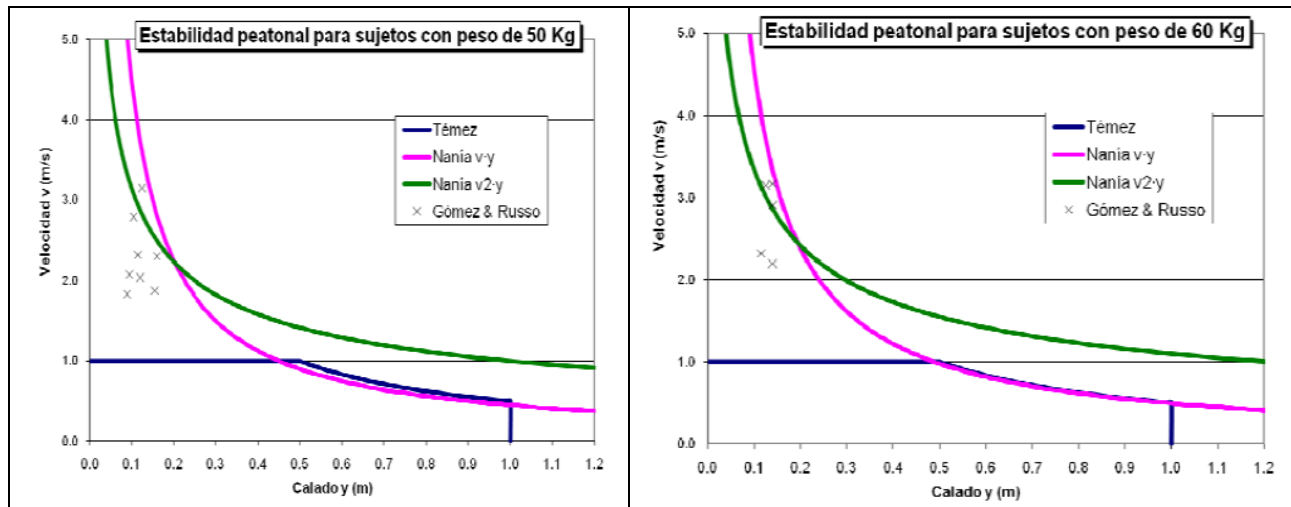


Figura 2-11 Regímenes de riesgo propuesto como una función de la profundidad y la velocidad

2.8 Estabilidad de Personas en Flujos de Agua

(Martínez-Gomariz, Gómez, & Russo, 2016)

Se desarrolló en el laboratorio exterior del Instituto Flumen en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya, se encuentra la plataforma de ensayos que utilizó (Russo, 2009) para su investigación. Se trata de un módulo que presenta unas dimensiones suficientemente importantes para permitir ensayos a escala real, o sea 1:1, y garantizar de esta manera que los efectos de escala no se produzcan. Presenta un ancho de 1.6 m, una longitud de 5.0 m y pendiente variable desde 0 a 10. (Ver Figura 2-12).



Figura 2-12 Módulo físico de calle, ejemplo de pérdida de estabilidad

Una vez analizados todos los resultados se representaron gráficamente las variables tirante y velocidad que generaron situaciones de peligro medio y alto. Seguidamente la representación de la función, como umbral de seguridad para la estabilidad de personas habitual propuesto por diferentes autores (Abt et Al., 1989), (Gómez, 2008) y (Témez, 1992), junto a la representación de la función límite (envolvente inferior de los puntos de peligro medio y alto) propuesta en el presente estudio (Figura 2-13) ofrece la posibilidad de obtener conclusiones al respecto. Se representan, no solo los puntos de inestabilidad obtenidos en la actual campaña experimental, sino también los obtenidos en la campaña de Russo (2009).

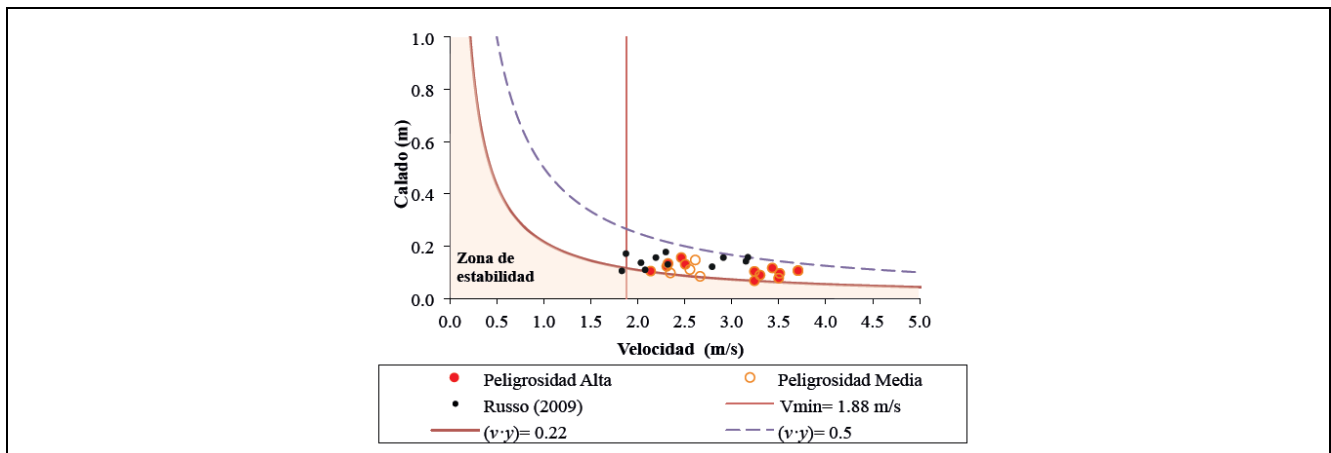


Figura 2-13 Representación de las condiciones hidráulicas (velocidad y tirante) que han generado situaciones de peligro medio y alto. Velocidad crítica 1.88 m/s

2.9 Clasificación de curvas de peligro en una inundación Velocidad-Tirante (Bureau of Reclamation)

(Trieste, 1988)

En E.U. (Trieste, 1988), provee una serie de curvas de peligro derivadas de la velocidad y la profundidad del agua. Los temas específicos son los siguientes:

1. Casas
2. Casas móviles
3. Vehículos
4. Adultos
5. Niños

Esta metodología se refleja en la creación de 5 nomogramas separados para cada tipo de elementos expuestos al peligro. Cabe señalar que si bien esta metodología fue desarrollada en 1988, aún es vigente en diversos estudios. En la Figura 2-14 y Figura 2-15, se muestran los nomogramas de peligro por inundación para niños y adultos:

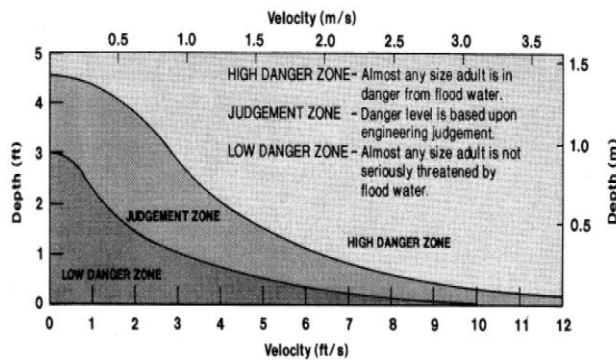


Figura 2-14 Representación de tirante - velocidad relación nivel de peligro de inundaciones en adultos

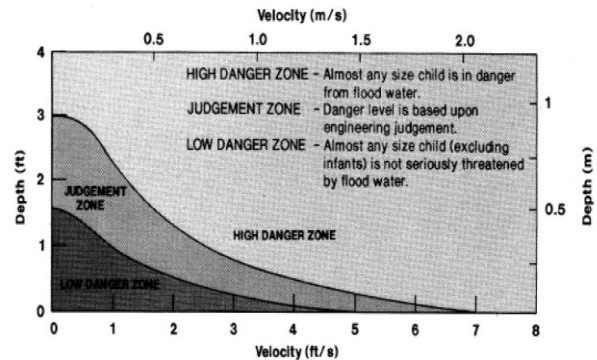


Figura 2-15 Representación de tirante - velocidad relación nivel de peligro de inundaciones en niños

2.10 Criterios de peligro en un medio urbano

El valor máximo del tirante coincide con aquel valor que no permita el ingreso del agua pluvial en los comercios o viviendas particulares (CCRFCD, 1999), (CADPW, 1977) (Gómez, 2008). A continuación se propone la Tabla 2-1 y Tabla 2-2, resumen de los valores máximos para tirantes encontrados en la bibliografía a nivel mundial con algunas informaciones sobre la tipología y el ámbito del estudio.

Tabla 2-1 Criterio de riesgo de tirante máximo: referencias a nivel mundial

Fuente	Referencia	y máx (m)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Manual de Drenaje de la Ciudad de Denver (EEUU)	Wright-Mc Laughlin, 1969	0.45	Altura máxima próxima al límite a partir del cual un vehículo empieza a perder adherencia con el pavimento y flotar en el agua	Urbano
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Altura máxima para una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFCD, 1999	0.30	Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el bordillo	Urbano
Criterio de Mendoza (Argentina)	Nanía, 1999	0.30	Altura máxima para evitar el ingreso de agua pluvial en viviendas y comercios	Urbano
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.20 - 1.50	Este criterio no se refiere sólo a la estabilidad de los individuos sino también a los daños generales que esta altura de inundación puede provocar	Urbano
Riesgos hidrometeorológicos (Suiza)	Belleudy, 2004	0.00 - 1.00	Este criterio propone varios tirantes máximos en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural
Picba06: Plan Integral de Alcantarillado de Barcelona	CLABSA, 2006	0.06	Para una lluvia con periodo de retorno de 10 años, tener los dos carriles laterales inundados dejando el resto de la calzada despejado	Urbano

Existen estudios, desarrollados para contextos rurales, como el de (Témez, 1992), que proponen una velocidad límite de 1 m/s; (ver Tabla 2-2). Es evidente que este valor resulta absolutamente inadecuado para estudiar el comportamiento hidráulico en calles.

Tabla 2-2 Criterio de riesgo de velocidad máxima: referencias a nivel mundial

Fuente	Referencia	vmáx (m/s)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	1.00	Velocidad límite para que un individuo pueda vencer a nado la resistencia del flujo	Rural
Consejo para la Agricultura y la Gestión de los Recursos (Australia y Nueva Zelanda)	ARMC, 2000	1.50	Velocidad límite, para tirantes pequeños, que supone la pérdida de capacidad por parte de un individuo de caminar por el agua	Urbano
Riesgos hidrometeorológicos (Suiza)	Belleudy, 2004	0.25 - 1.00	Este criterio propone varias velocidades máximas en función del uso del suelo y se refiere a inundaciones provocadas por desbordamiento de ríos	Urbano / Rural

Otros estudios han abordado el problema bajo un punto de vista teórico (Abt et Al., 1989) y (Nanía, 1999); considerando un cierto grado de aproximación en el uso de diferentes coeficientes de seguridad. (Ver Tabla 2-3).

Tabla 2-3 Criterios de riesgo basados en la consideración conjunta de tirantes y velocidades

Fuente	Referencia	$v \cdot y$ (m^2/s)	$v^2 \cdot y$ (m^3/s^2)	Justificación del criterio	Ámbito de estudio
Agencia Federal Americana para la Gestión de Emergencias (EEUU)	FEMA, 1979	0.56	-	El valor del producto representa la condición límite a partir de la cual un peatón adulto empieza a perder estabilidad (el estudio argumenta que para niños este producto bajaría sensiblemente) límite representa el comienzo	Urbano / Rural
Estudio sobre la estabilidad humana en zonas de riesgo (EEUU)	Abt, 1999	0.70 - 2.12		Los valores del producto límite hallados a través de pruebas experimentales, varían dependiendo de la altura y del peso de las personas (a mayor producto peso por altura, mayor estabilidad)	Urbano / Rural
Monografía Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (España)	Témez, 1992	0.50	-	Altura máxima para individuar una situación de peligro para individuos en cauces naturales y llanuras de inundación	Rural
Manual de Drenaje del Contado de Clark (EEUU)	CCRFC, 1999	0.55		Altura máxima para garantizar que la escorrentía no sobrepase el borde de la acera	Urbano
UPC (España)	Nanía, 1999	-	1.00	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del deslizamiento	Urbano
Proyecto Europeo RESCDAM (Finlandia)	Reiter, 2000	0.25 - 0.70		Este criterio se refiere a experiencias experimentales. Los dos valores presentados se refieren a pérdida de estabilidad frente al flujo para individuos adultos y niños	Rural
Curso de Hidrología Urbana (España)	Gómez et al, 2008	0.45	-	Estudio teórico de la estabilidad de un peatón frente al fenómeno del vuelco	Urbano

3 CRITERIOS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR INUNDACIÓN Y SU IMPORTANCIA

3.1 Criterio de peligro por inundación

El criterio de peligro tiene por objeto cuantificar con base en parámetros físicos (tirante, velocidad), el daño potencial para los bienes expuestos ante la ocurrencia de un evento (precipitación-inundación).

La intensidad de un evento es la manera de cuantificar el peligro y normalmente se muestra como:

- Bajo
- Medio
- Alto

Las afectaciones por peligro de inundación en zonas urbanas se pueden agrupar debido a su naturaleza, de la siguiente manera:

- Afectaciones al peatón de manera directa.
- Afectaciones a la infraestructura.
- Afectaciones a las vías de comunicación.

Para este estudio se considera únicamente la evaluación de la estabilidad en peatones de manera directa.

El peligro por inundación considera las variables del tirante y velocidad (Kikuchi, 2003) y (Ribera, 2004). El objetivo es proporcionar datos de calidad que incrementen la confianza en el público y permitan tomar acciones que reduzcan las afectaciones a personas.

Es necesario contar con nomogramas de peligro que permitan desarrollar programas de operación, infraestructura o desarrollo urbano para cada ciudad ante inundaciones, ya sea por cauces naturales o antrópicas. Actualmente con el apoyo de nomogramas y las nuevas herramientas computacionales es posible generar y construir, mapas de peligro integrales que consideren tirante (h) máximo admisible, velocidad (v) máxima admisible, estabilidad al vuelco (vh), estabilidad al deslizamiento (v^2h), con un soporte bidimensional. Tener un análisis adecuado del peligro es un paso importante en la prevención, planeación y manejo del uso de suelo en el país.

México es referente Latinoamericano en cuanto a difusión del conocimiento en cuanto a materia del agua se refiere, sin embargo no cuenta con algún estudio que valide de manera teórica y experimental dichos criterios.

3.2 Criterio de vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador. (CENAPRED, 2004). De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad de la lluvia, éste sufre mayores daños. A diferencia del peligro, que está definido por los patrones climáticos (la naturaleza) y debido a ello es difícil modificarlo, la vulnerabilidad es una variable que el hombre tiene la posibilidad de disminuir.

Los elementos o bienes expuestos por su naturaleza, se dividen en tres grupos

- Humana
- Infraestructura de líneas vitales
- Infraestructura susceptible a ser dañada

Para la elaboración de los mapas de vulnerabilidad, la cual identifica la vulnerabilidad por manzana tomando en cuenta las variables recopiladas el Área Geoestadística Base (AGEB). De acuerdo a una recopilación histórica de eventos extremos realizada por CENAPRED – SEGOB (ver Tabla 3-1), en la cual trataron de estimar la vulnerabilidad de cada municipio que componen el país, en la cual se tomó en cuenta la ocurrencia de decesos y monto en daños generados por algún evento hidrometeorológico, se elaboró la clasificación de la vulnerabilidad.

Tabla 3-1 Clasificación de vulnerabilidad. (CENAPRED - SEGOB, 2013)

Vulnerabilidad	Efectos
Alta	• Decesos
	• Daños Extraordinarios
	• Asentamientos irregulares en cauces, planicies de inundación o agua abajo de presas o bordos
Media	• Sin Decesos
	• Daño moderado
Baja	• No hay asentamientos irregulares
	• Sistema de drenaje eficiente
	• Daños mínimos

El grado de pérdida de un elemento dado o de un conjunto de elementos dentro del área afectada por el (los) deslizamiento(s). Se expresa en una escala de 0 (ninguna pérdida) a 1 (pérdida total). Para el caso de una propiedad, la pérdida será el valor de la propiedad; para personas, será la probabilidad de que una vida en particular (el elemento en riesgo) sea pérdida, dada(s) la(s) persona(s) que sean afectadas por el deslizamiento.

(CENAPRED, 2004), determinó la medición de la vulnerabilidad por inundaciones en relación con los bienes que tiene la población dentro de sus viviendas conocido con el termino menaje o enseres, considera que las inundaciones ocurren lentamente, es decir, hay tiempo suficiente para que las personas puedan desalojar de modo tal que sus vidas no corran peligro alguno.

La identificación del tipo de vivienda se realizó a partir de la tipología, que es los materiales que se utilizaron para su construcción tanto en los muros como el techo, por ejemplo: plástico, cartón, lámina, madera, piedra, mampostería, concreto; etc.

3.2.1 Índice de vulnerabilidad

En general, se estudió las combinaciones posibles de materiales que pueden presentarse en nuestro medio sin embargo, no se descarta la posibilidad de encontrar otros materiales, por lo que deberán especificarse y posteriormente evaluarse para finalmente definir su correspondiente vulnerabilidad.

Las viviendas podrán clasificarse en cinco niveles de acuerdo con el material y tipo de construcción, para poder inferir su capacidad de respuesta ante una inundación. El tipo de vivienda, que tiene valores de I a V, puede verse en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Índice de vulnerabilidad

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Color propuesto
I	Alto	Rojo
II	Medio - alto	Naranja
III	Medio	Amarillo
IV	Medio - bajo	Verde
V	Bajo	Blanco

Fuente: (CENAPRED, 2004)

En la Tabla 3-3 se muestra las configuraciones más frecuentes de los materiales utilizados en la construcción de las viviendas; y con ello caracterizar el tipo de vivienda según su vulnerabilidad.

Tabla 3-3 Clasificación del tipo de vivienda según el material usado en techo y muros

Número de combinación	Tipo de vivienda	Combinaciones entre tipo de material para techo y muros
1	I	Vivienda con muros de cartón o plástico y techo de cartón o plástico
2	II	Vivienda con muros de piedra sobre piedra y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
3	III	Vivienda con muros de piedra sobre piedra y techo de palma
4	I	Vivienda con muros de láminas de cartón y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
5	II	Vivienda con muros de bahareque y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
6	III	Vivienda con muros de bahareque y techo de palma
7	II	Vivienda con muros de adobe sin repellido y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
8	III	Vivienda con muros de adobe sin repellido y techo de palma
9	III	Vivienda con muros de adobe sin repellido y techo de teja
10	IV	Vivienda con muros de madera y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
11	IV	Vivienda con muros de madera y techo de palma
12	IV	Vivienda con muros de adobe con repellido y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
13	IV	Vivienda con muros de adobe con repellido y techo de palma
14	IV	Vivienda con muros de adobe con repellido y techo de teja
15	V	Vivienda con muros de adobe con repellido y techo de losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla
16	IV	Vivienda con muros de mampostería sin elementos de concreto y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
17	IV	Vivienda con muros de mampostería sin elementos de concreto y techo de palma
18	IV	Vivienda con muros de mampostería sin elementos de concreto y techo de teja
19	V	Vivienda con muros de mampostería sin elementos de concreto y techo de losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla
20	IV	Vivienda con muros de mampostería con elementos de concreto y techo de lámina (cartón, plástico, asbesto o galvanizada)
21	IV	Vivienda con muros de mampostería con elementos de concreto y techo de palma
22	IV	Vivienda con muros de mampostería con elementos de concreto y techo de teja
23	V	Vivienda con muros de mampostería con elementos de concreto y techo de losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla
24	V	Vivienda con muros de mampostería con elementos de concreto y techo de losa de concreto ligada

Fuente: (CENAPRED, 2004)

3.2.2 Funciones de vulnerabilidad para el menaje

Para estimar las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda se propone una serie de configuraciones de muebles y enseres menores; posteriormente se lleva a cabo una cuantificación del porcentaje de los daños ocasionados en cada caso, en función del nivel que alcance el agua que entra en la casa. En la siguiente figura se muestra la configuración de los tirantes alcanzados en una inundación, para la vivienda tipo I. (Ver Figura 3-1).

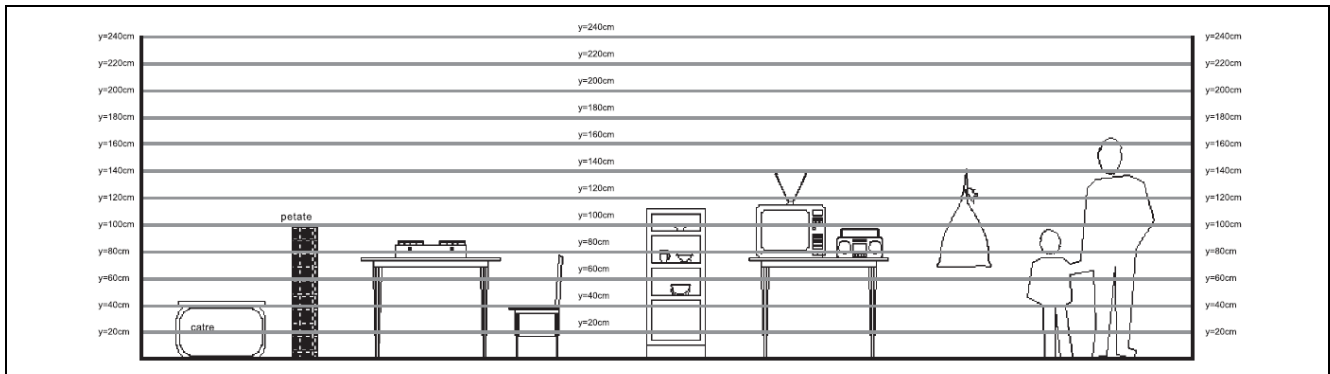


Figura 3-1 Ejemplo de menaje para la vivienda tipo I (una sola planta)

Fuente: (CENAPRED, 2004)

Para la vivienda tipo I, se cuantificó un menaje con un costo aproximado de \$12,500.00. Mientras que para la vivienda tipo V, se cuantificó un menaje con un costo del orden de los \$450,000.00. Entonces la vulnerabilidad es en función del tirante alcanzado en la inundación y con ello corresponde un porcentaje de 0 a 1; donde 1 es una pérdida total del costo de las pertenencias (menaje). En la Figura 3-2 se muestra la función de vulnerabilidad para una vivienda tipo I.

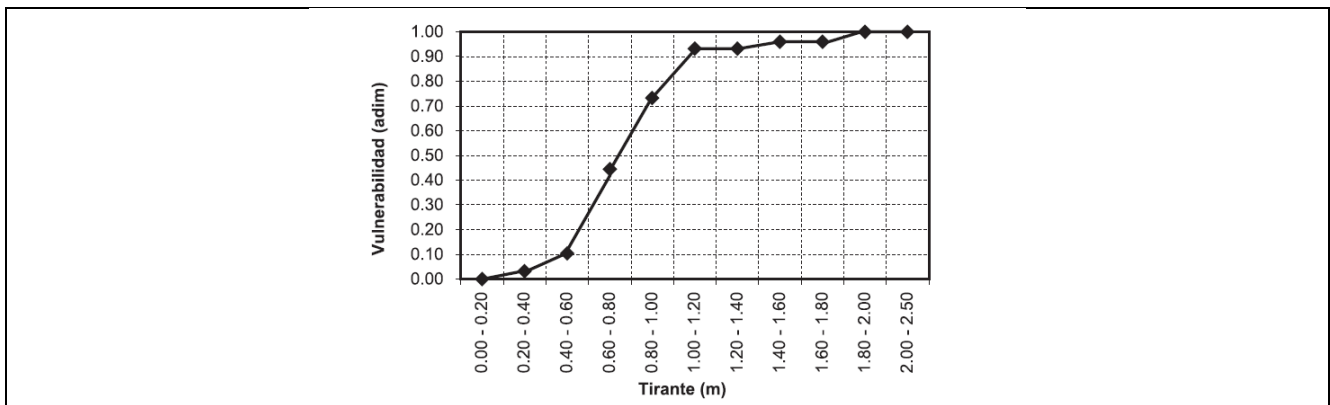


Figura 3-2 Ejemplo de una función de vulnerabilidad para vivienda tipo I

Fuente: (CENAPRED, 2004)

3.3 Criterio de riesgo por inundación

En términos generales, el riesgo es una función matemática denominada “convolución” del peligro y la vulnerabilidad (Ver Figura 3-3). Para fines de protección civil una de las herramientas de mayor utilidad para la toma de decisiones es la construcción de escenarios en los que se detecten las zonas con niveles elevados de riesgo, en términos, por ejemplo, de las pérdidas monetarias derivadas de las consecuencias ocasionadas por la ocurrencia de un fenómeno. Otras medidas de riesgo pueden ser, los metros cuadrados perdidos de construcción, el número de vidas humanas perdidas, etc. (CENAPRED, 2004)

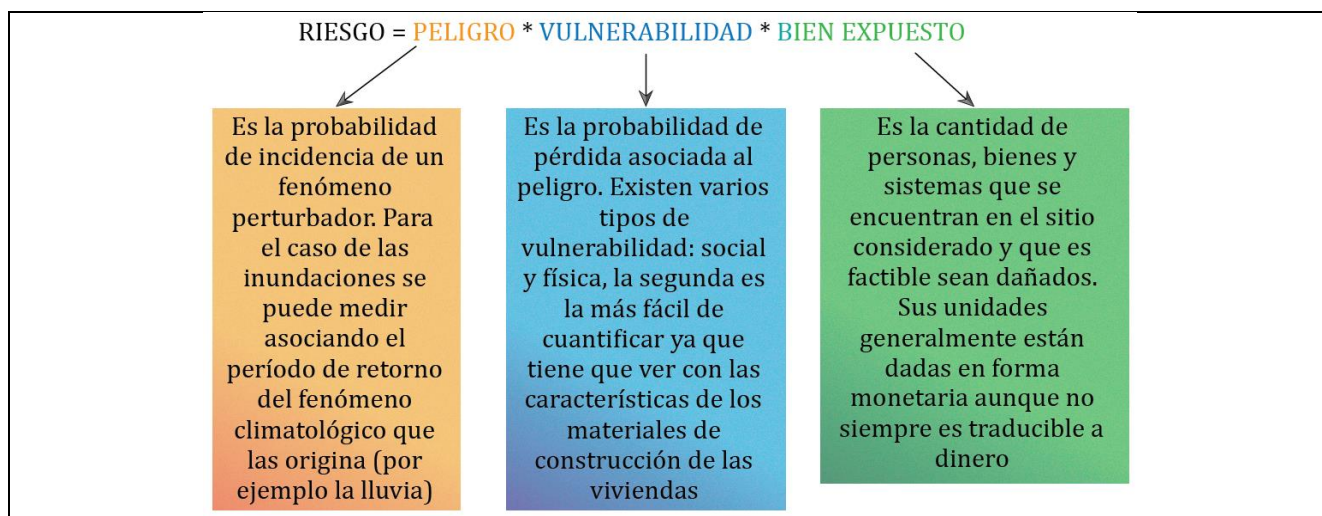


Figura 3-3 Metodología de riesgo

Fuente: Elaboración propia con datos del CENAPRED

Los mapas de riesgo de inundaciones deberían mostrar las inundaciones en relación con los impactos potenciales que éstas pueden llegar a producir en personas, bienes y actividades. Por ello, es preciso añadir el concepto de vulnerabilidad al mero estudio del fenómeno físico. Así pues, los mapas de riesgo de daños por inundación se elaboran, por una parte, a partir de cartografía que localiza y caracteriza el fenómeno físico de las inundaciones, y, por la otra, a partir de cartografía que localiza y caracteriza los elementos expuestos. El uso de las llamadas (nuevas tecnologías), como los SIG, la percepción remota, los sensores hidrológicos o Internet, representa un potencial de gran valor para el desarrollo de los mapas de riesgo de inundaciones, que es, hoy por hoy, un campo abierto a la investigación.

En México se ha trabajado en la construcción de mapas de riesgo por inundación, en el cual se han fijado criterios entorno a la generación del modelación hidrológico-hidráulico y la modelación unidimensional de los ríos (Salas S., 2011), además se han fijado criterios para la construcción del riesgo, como la conformación de la formula siguiente:

$$R = CVP$$

Ecuación 1

Donde:

- R: Riesgo ante un evento dado
- C: Valor de los bienes expuestos
- V: Vulnerabilidad
- P: Probabilidad

Para determinar el riesgo se requiere de la vulnerabilidad y el peligro, los cuales son adimensionales, por lo tanto el riesgo generalmente está dado en unidades monetarias.

Además de los criterios de peligro, vulnerabilidad; se tienen diferentes documentos enfocados a la gestión del riesgo, siendo un libro elemental el Atlas Nacional de Riesgos que contiene metodologías para la construcción del riesgo ante los diferentes fenómenos naturales, se dan lineamientos y generalidades, sin abarcar a detalle cada uno de estos. A últimas fechas, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, se ha enfocado en generar avances en el conocimiento para la construcción de mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo, considerando una modelación en dos dimensiones y analizando que parámetros son esenciales para la construcción de mapas de riesgo en zonas urbanas.

3.4 Evaluación de acciones preventivas ante inundaciones

La evaluación del riesgo implica determinar la magnitud de los daños potenciales que pueda ocasionar una inundación, para ello se requiere conocer el grado de peligro y vulnerabilidad que pueden perturbar propiedades, vías de comunicación, infraestructura y a los habitantes de una población. Determinar el nivel de riesgo, es una primera acción para implementar estrategias de mitigación a daños ocasionados por una inundación.

La importancia de evaluar el riesgo implica disponer de información confiable para determinar distintos escenarios y conocer las posibles consecuencias que puedan presentarse en una inundación. En específico, conocer el riesgo implica lo siguiente:

1. Identificar la causa de la inundación. Por ejemplo falta de drenaje urbano, asentamientos de viviendas en zonas irregulares, falla estructural o desbordamiento de un río o canal, ruptura de una presa.
2. Disponer de información digital de la zona de estudio. Uso de suelo, elevaciones, catastro, planos de drenaje urbano, información histórica de climatológica.
3. Determinar el grado de vulnerabilidad y peligro de inundación.
4. Generar escenarios de acuerdo a periodos de retorno requeridos, para conocer las zonas con mayor amenaza en caso de presentarse una inundación.

Con los escenarios generados o mapas de riesgo por inundación, se puede detallar un costo de daños ocasionados. Para tal efecto se podrán proponer medidas o acciones para la mitigación del riesgo, para ello existen las medidas estructurales y no estructurales.

- Medidas estructurales: se dispone de la construcción de obras civiles, con la finalidad de contener, desviar o desalojar las grandes cantidades de agua de una zona urbana.
- Medidas no estructurales: alertas de eventos hidrometeorológicos, lluvias de intensidades inusuales, niveles de cauces superiores a los históricos, aplicación a la normatividad del uso de suelo y reubicación de viviendas altamente vulnerables.

3.4.1 Acciones para mitigar los efectos causados por una inundación

La importancia de aminorar daños ocasionados por inundaciones requiere planificar y gestionar acciones preventivas. En la Figura 3-4, se muestra un esquema a manera de ejemplo considerando medidas estructurales y no estructurales para la mitigación de daños por inundación.

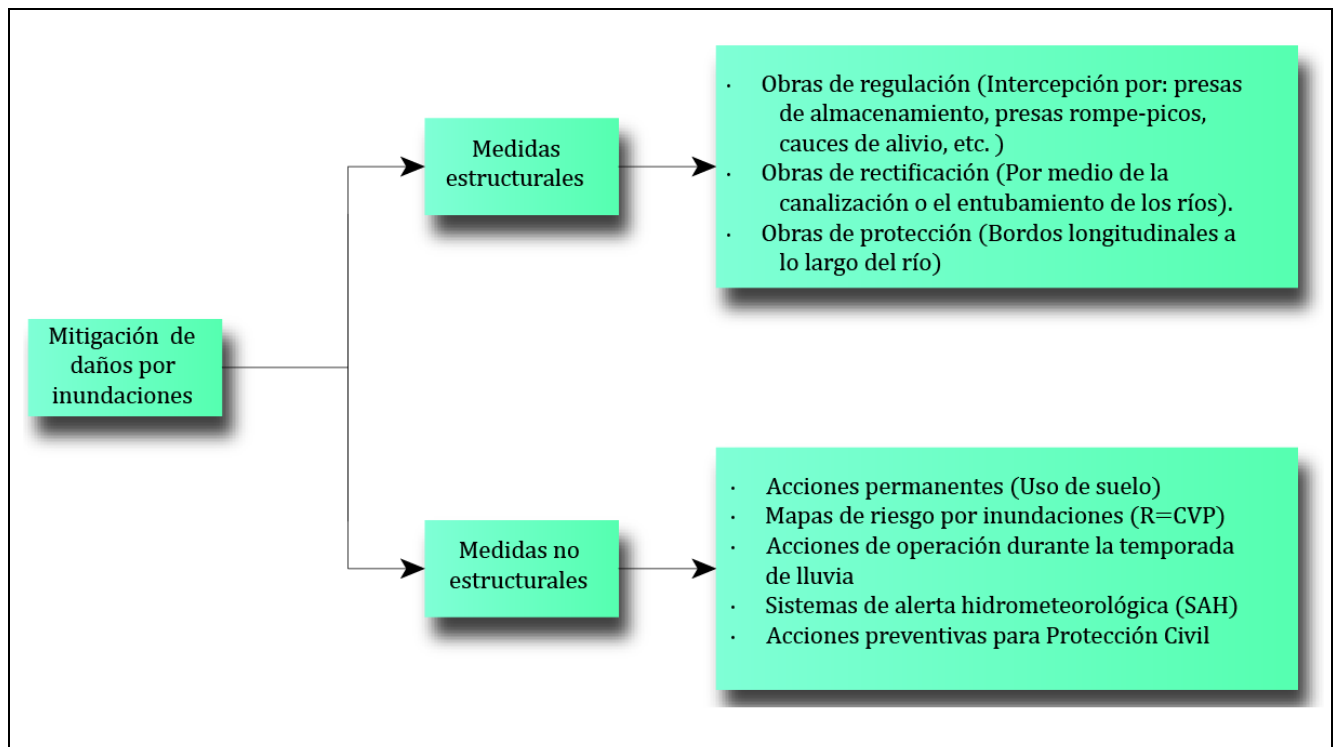


Figura 3-4 Medidas estructurales y no estructurales para mitigación de riesgo por inundación.

Fuente: Elaboración propia con información del (CENAPRED, 2013).

Para controlar una inundación es necesaria la combinación de las medidas estructurales y no estructurales para asegurar daños mínimos en la población y mitigar pérdidas económicas, de infraestructura y sobre todo pérdidas de vidas humanas. Tales acciones requieren medidas de ingeniería e inversiones económicas, así como los estudios de investigación para determinar las zonas de mayor riesgo y proponer acciones de planeación y obras de manera fundamentada en el planteamiento contra inundaciones y sus consecuencias.

Un ejemplo de política de gestión de inundaciones ocurrió en los Estados Unidos. En 1936 fue aprobada una ley en el ámbito federal, sobre el control de avenidas, que identificaba la naturaleza pública de los programas de reducción de inundaciones y caracterizaba la implantación de medidas físicas o estructurales como un medio de reducir estos daños. De esta manera, no era necesario verificar las relaciones de costo/beneficio para justificar la protección de las áreas sujetas a inundaciones. Con esto, se aceleró el desarrollo y la ocupación de las áreas de inundación, lo cual resultó en el aumento de los daños ocasionados por las avenidas. Las pérdidas de los fondos públicos fueron insuficientes para atender a esta tendencia. En 1966, el gobierno reconoció que las medidas anteriores no eran adecuadas y dio énfasis a medidas no estructurales, que permitían a la población convivir con las avenidas.

En 1973, fue aprobada una ley sobre protección contra desastres por inundación, dando énfasis a medidas no estructurales, destacando y exigiendo el seguro por inundaciones y regulación del uso de suelo y protección de las nuevas construcciones para avenidas de un periodo de retorno de 100 años. En 1974 fueron aprobados, dentro de la Legislación de Desarrollo de Recursos Hídricos, artículos específicos sobre inundaciones que preveían medidas no estructurales y la distribución de costos, como en el artículo 73 de la Ley de 1974: “En investigación, planeamiento o proyecto de cualquier Agencia Federal, o de cualquier proyecto involucrando la protección contra inundaciones, debe ser dada prioridad a las alternativas no estructurales para reducción de daños por inundación, incluyendo, pero no limitando las construcciones a prueba de avenidas, reglamentación de las áreas de inundación, utilización de las áreas de inundación para usos recreativos, pesca, vida animal y otras finalidades públicas; con el objetivo de dar una solución económica, social y del medio ambiente más aceptable para reducción de los daños a causa de inundaciones”. (Morelli Tucci, 2006).

3.4.1.1 Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de inundaciones. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que actúan en la cuenca, intentando modificar las relaciones entre precipitación y gasto, como la alteración de la cobertura vegetal del suelo, que reduce y retarda los picos de las avenidas y controla la erosión de la cuenca. Las medidas intensivas son aquellas que reaccionan en el río y pueden ser de tres tipos (Simons, 1977):

- 1) aceleran el escurrimiento: construcción de diques, aumento de la capacidad de descarga de los ríos y corte de meandros;
- 2) retardan el escurrimiento: reservorios y cuencas de amortiguamiento;
- 3) desvío del escurrimiento: obras como canales de desvíos.

En la Tabla 3-4 se resumen las principales características de las medidas estructurales:

Tabla 3-4 Medidas estructurales

Medida	Ventaja principal	Desventaja principal	Aplicación
Medidas extensivas			
Alteración de la cobertura vegetal	Reducción del pico de la avenida	Impracticable para las grandes áreas	Pequeñas cuencas
Control de la erosión del suelo	Reduce la sedimentación	Impracticable para las grandes áreas	Pequeñas cuencas
Medidas intensivas			
Diques	Alto grado de protección de un área	Daños significativos en caso de falla	Grandes ríos y en planicie
Mejoras del canal			
Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento del caudal con poca inversión	Efecto localizado	Pequeños ríos
Corte de meandro	Amplia área protegida y acelera el escurrimiento	Impacto negativo en ríos con fondo aluvial	Área de inundación estrecha
Reservorio			
Todos los reservorios	Control aguas abajo	Ubicación difícil debido a zonas federales	Cuencas
Reservorios con compuertas	Más eficiente con el mismo volumen	Vulnerable a errores humanos	Proyectos de usos múltiples
Reservorio para avenidas	Operación con un mínimo de piedras	Costo no compartido	Restringido al control de avenidas
Modificaciones en el canal			
Sobre el curso de la avenida	Amortiguación del volumen	Depende de la topografía	Grandes cuencas
Desvíos	Reduce el caudal del canal principal	Depende de la topografía	Cuencas medianas y grandes

Fuente: (Simons, 1977)

3.4.1.1.1 Medidas extensivas

Las medidas extensivas son:

Cobertura vegetal: la cobertura vegetal tiene la capacidad de almacenar parte del volumen de agua precipitada por la interceptación vegetal, aumentar la evapotranspiración y reducir la velocidad del escurrimiento superficial por la cuenca hidrográfica. Cuando se retira la cobertura vegetal la tendencia es el aumento del volumen escurrido de las avenidas y la reducción de las sequías, aumentando la variabilidad de los caudales.

El aumento de la cobertura es una medida extensiva para la reducción de las inundaciones, pero aplicable a pequeñas cuencas, donde tiene más efecto ($< 10 \text{ km}^2$). El mayor efecto de este tipo de medida se da sobre los eventos más frecuentes de alto riesgo de ocurrencia. Para eventos de bajo riesgo el efecto de la cobertura vegetal tiende a ser pequeño.

Control de la erosión del suelo: el aumento de la erosión tiene implicaciones ambientales por el transporte de sedimentos y sus agregados, pueden azolvar los ríos aguas abajo, disminuir su sección y alterar el balance de carga y transporte de los ríos. Uno de los factores es la reducción de la sección de los ríos y el aumento de la frecuencia de las inundaciones en lugares de mayor sedimentación. El control de la erosión del suelo puede ser realizado por la reforestación, pequeños reservorios, estabilización de las orillas y prácticas agrícolas correctas. Esta medida contribuye para la reducción de los impactos de las inundaciones.

3.4.1.1.2 Medidas intensivas

Las medidas intensivas son:

Reservorio: El reservorio de control de avenidas funciona reteniendo el volumen del hidrograma durante las avenidas, reduciendo el pico y el impacto aguas abajo del reservorio. En la Figura 3-5 se observa el hidrograma natural de un río. Considerando un volumen V del hidrograma capaz de ser retenido por un reservorio, se puede observar la reducción del caudal máximo y el hidrograma amortiguado.

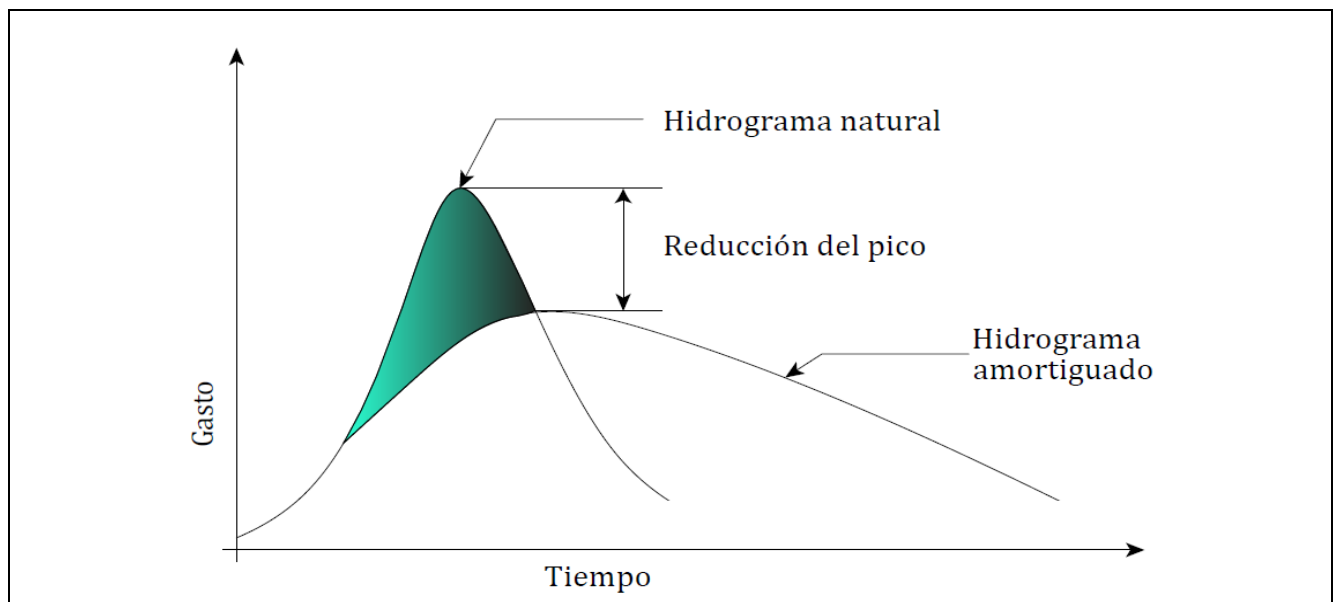


Figura 3-5 Comportamiento de hidrogramas en un reservorio

Fuente: Elaboración propia

Los reservorios proyectados deben considerar los impactos que pueden producir hacia aguas abajo y aguas arriba.

Aguas abajo: Generalmente, existen áreas sujetas a inundación aguas abajo de un reservorio. Con la construcción del reservorio la tendencia es que produzca amortiguamiento de las avenidas. Sin embargo, si el área aguas abajo no está ocupada existe la posibilidad de que sea habitada en un futuro, pasando así a estar sujeta a inundaciones y provocando daños en la población. En los períodos donde se incrementan las avenidas existirán eventos en que el reservorio no tendrá condiciones de amortiguar el caudal y ocurrirán inundaciones. La percepción pública de esta situación, generalmente, es de culpar la capacidad del reservorio por el ocurrido, por lo tanto, es necesario que el diseño tenga un eficiente sistema de observación confiable de los datos hidrológicos necesarios para las condiciones operacionales.

Aguas arriba: La construcción de un reservorio puede producir los siguientes impactos aguas arriba:

- a) El incremento de una avenida en el cauce en conjunto con una mala operación y baja capacidad en el reservorio, puede ocasionar un remanso que involucra inundaciones y represamientos aguas arriba.
- b) Las condiciones del inciso anterior pueden alterarse con el tiempo debido a la sedimentación del reservorio, que ocurre inicialmente en su tramo de aguas arriba. Debido a esto, los niveles de inundación inicialmente proyectados pueden aumentar, alcanzando áreas fuera del límite considerado.

Diques: Son muros laterales de tierra o concreto, inclinados o rectos, construidos a una cierta distancia de las orillas, que protegen las zonas urbanas contra el desbordamiento de cauces. Los efectos de reducción del ancho del escurrimiento y de confinamiento del flujo son el aumento del nivel de agua en la sección para el mismo gasto, aumento de la velocidad y de la erosión de las orillas y de la sección en general, reducción del tiempo de viaje de la onda de la avenida, agravando la situación aguas abajo. El riesgo mayor existente en la construcción de un dique es la definición correcta de la avenida máxima probable, pues existirá siempre un riesgo de colapso, y en este caso los daños serán peores que si no existiera el dique.

El dique permite la protección de una localidad urbana. Se debe evitar diques de grandes alturas, pues existe siempre el riesgo de ruptura en el caso que ocurra una crecida mayor de aquella proyectada, y de este modo, el impacto podría más grande que si éste no existiera.

Hidráulicamente, el dique reduce la sección de escurrimiento y puede provocar el aumento tanto de la velocidad como de los niveles de inundación. Para que esto no ocurra, las condiciones de flujo no deben ser alteradas después de la construcción del dique. Estas condiciones pueden ser simuladas en condición de régimen permanente para los gastos de proyecto. Esta metodología no debe ser usada para escurrimiento sujeto al efecto de la marea, pues resultará en una cota sobredimensionada. Por tanto, se debe utilizar un modelo hidrodinámico.

Los diques son normalmente contruidos de tierra con enrocamiento y de concreto, dependiendo de las condiciones del lugar. En la construcción de diques para la protección de áreas agrícolas, el riesgo de colapso puede ser más alto que en las áreas urbanas, siempre que los daños potenciales sean sólo económicos. Cuando se presenta un colapso puede producir daños a las personas de manera directa, para ello la obra será complementada por un sistema de previsión y alerta en tiempo real. Tanto para cuencas rurales como para cuencas urbanas es necesario planificar el bombeo de las áreas laterales colindantes al dique. En caso contrario las lluvias que caen sobre estas áreas laterales quedarán acumuladas de no existir drenes.

Modificaciones del río: Las modificaciones en la morfología del río objetivan aumentar el gasto para un mismo nivel, reduciendo su frecuencia de ocurrencia. Esto puede ser obtenido por el aumento de la sección transversal o por el aumento de la velocidad. Para aumentar la velocidad es necesario reducir la rugosidad, retirando las obstrucciones al escurrimiento, encausando el río, aumentando el desnivel por el corte de meandros o profundizando el río. Estas medidas, en general, presentan costos elevados.

Para la sección de un río que escurre un gasto Q , la cota resultante depende del área de la sección, de la rugosidad, del radio hidráulico y del desnivel. Para reducir la cota debido a un caudal se puede actuar sobre las variables mencionadas.

Para que la modificación sea efectiva es necesario cambiar estas condiciones para el tramo que actúa hidráulicamente sobre el área de interés. Profundizando el canal, el nivel de agua baja evitando inundaciones, pero las obras podrán involucrar un espacio muy extenso para ser efectiva, lo que aumenta el costo.

3.4.1.2 Medidas no estructurales

Las medidas estructurales no son proyectadas para dar una protección completa. Esto exigiría la protección contra la mayor avenida posible. Esta protección es físicamente y económicamente inviable en la mayoría de las situaciones. La medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, permitiendo la ampliación de la ocupación de las áreas inundables, que en el futuro pueden resultar en daños significativos. Las medidas no estructurales, en conjunto con las anteriores o sin éstas, pueden minimizar significativamente los daños con un costo menor. El costo de protección de un área inundable por medidas estructurales, en general, es superior a las medidas no estructurales.

Las principales medidas no estructurales son del tipo preventiva como: previsión y alerta de inundación, zonificación de las áreas de riesgo de inundación, seguro y protección contra inundación.

Sistema de pronóstico y alerta temprana: El sistema de pronóstico y alerta temprana tiene la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de la inundación, avisando a la población y tomando las medidas necesarias para reducir daños resultantes de la inundación.

Un sistema de alerta de pronóstico en tiempo real involucra los siguientes aspectos:

- Sistema de colecta y transmisión de informaciones del tiempo; sistema de monitoreo por red, telemétrica, satélite o radar y transmisión de estas informaciones para el centro de pronóstico;
- Centro de pronóstico: recepción y procesamiento de informaciones; modelo de previsión, alerta y evaluación;
- Protección Civil: programas de prevención, mapa de evacuación, identificación de puntos críticos, etc.; alerta a los sistemas públicos: escuelas, hospitales, infraestructura, etc.; alerta a la población en general del riesgo, remoción y protección de la población durante la emergencia de inundación.

Este sistema posee tres fases distintas que son: prevención, alerta y mitigación. En la prevención son desarrolladas las actividades preventivas para minimizar los daños provocados por las inundaciones cuando éstas ocurren. Esto involucra el entrenamiento del equipo de la Protección Civil, de la población a través de informaciones, identificación de las áreas inundadas durante su ocurrencia, el planeamiento de albergues para recibir a la población afectada, entre otros.

La alerta en conjunto con la ocurrencia de eventos meteorológicos, se basa en lo siguiente:

1. seguimiento de niveles: el nivel a partir del cual existe un seguimiento por parte de los técnicos y la evolución de la avenida. En este momento, se da una alerta a Protección Civil de la eventualidad de la llegada de una avenida importante. Se inicia en este momento el pronóstico de niveles en tiempo real;
2. niveles de alerta: es el nivel a partir del cual se pronostica que la cota alcanzada puede producir desbordamientos de ríos. Protección Civil y las administraciones municipales reciben regularmente los pronósticos para informar a la población;
3. niveles de emergencia: nivel en el cual ocurren daños materiales y humanos. La población recibe información sobre el nivel actual y pronosticado con anticipación;

La fase de mitigación trata de las acciones que deben ser realizadas para disminuir las afectaciones de la población cuando la inundación ocurre. Incluye acciones tales como aislar calles y áreas de riesgo, traslado de la población, de animales y la protección de lugares de interés público. (Morelli Tucci, 2006)

3.5 Mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones

Desde hace varios años el CENAPRED, preocupado por brindar herramientas útiles para llevar a cabo los atlas de riesgo estatales, ha venido desarrollando una serie de guías y metodologías que ayuden a cumplir con tal objetivo. En México se ha trabajado en la construcción de mapas de riesgo por inundación, en el cual se han fijado criterios entorno a la generación del modelación hidrológico-hidráulico y la modelación unidimensional de los ríos (Salas S., 2011).

A partir de los criterios antes descritos, se puede conocer el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos en las ciudades evaluando tres tipos de mapas: vulnerabilidad, peligro y riesgo por inundación. Los mapas de vulnerabilidad describen la situación económica, poblacional y de actividades de una región (Ribera, 2004).

Los mapas de peligro por inundación son aquellos que contemplan las inundaciones considerando los parámetros de altura y tirante de inundación. Y los mapas de riesgo son una medida no estructural que tiene por objetivo evaluar las pérdidas de un grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que describen la amenaza y las frecuencias de ocurrencia de cada uno de éstos (Ordaz et al., 2013).

Las inundaciones de ríos caudalosos se caracterizan generalmente por su flujo máximo. Los picos más grandes indican eventos de menor frecuencia y un daño más grande si no se toman medidas preventivas. En contraste con el término "riesgo hidrológico", indican inundaciones causadas por exceso de agua en los cuerpos que la contienen así como una posible falla estructural y desbordamiento de cauces. Esto comprende las amenazas a la vida humana y bienestar, pérdidas económicas y daños ecológicos tales como la contaminación, la erosión o la extinción de especies. Hasta ahora, la mayoría de la investigación ha sido dirigida al daño económico que se produce en contacto directo con las inundaciones.

El riesgo de inundaciones en una ciudad se puede expresar como la probabilidad de una inundación combinada con consecuencias por inundaciones. Las consecuencias incluyen personas, desarrollos residenciales y de infraestructura, desarrollos de negocios y actividades en la zona de inundación; actividades comerciales asociadas con el transporte de mercancías y servicios, áreas de valor social e histórico, y áreas de gran valor ecológico. La probabilidad de inundaciones depende de la probabilidad de que los niveles de descarga de un cauce se exceda y obtenga potencial para causar el desbordamiento o falla de las obras de protección contra inundaciones (si es que las hay); en el caso de que se produzcan tales niveles de descarga.

3.6 Zonificación

La zonificación propiamente dicha es la definición de un conjunto de reglas para la ocupación de las áreas de mayor riesgo de inundación, previendo la minimización futura de las pérdidas materiales y humanas en función de las grandes avenidas y/o eventos meteorológicos extremos. Se concluye de esto, que la zonificación urbana permitirá un desarrollo racional de las áreas urbanas.

La reglamentación del uso de las zonas de inundación se apoya en mapas con demarcación de áreas de distintos riesgos y en los criterios de ocupación de éstas, cuanto al uso y a los aspectos constructivos. Para que esta reglamentación sea utilizada, beneficiando las comunidades, ésta debe ser integrada a la legislación municipal sobre loteos (o lotificaciones), construcciones y habitaciones, a fin de garantizar su observancia. De este modo, el contenido de este capítulo tiene la finalidad de servir como base para la reglamentación del área de inundación, a través de los planes directores urbanos, permitiendo a los municipios realizar un control efectivo. (Morelli Tucci, 2006)

4 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE NOMOGRAMAS DE PELIGRO POR INUNDACIÓN EN ZONAS URBANAS

La metodología toma en cuenta los trabajos previos de riesgo de inundación en zonas urbanas en México, retomando los estudios de (Alcocer Yamanaka, 2011), (Cervantes, 2012) (Alcocer-Yamanaka et al., 2012), (Rodríguez et al., 2013), (Ordaz et al., 2013), (Llaguno G., 2013), y tomando como base el trabajo de (Rodríguez et al., 2014); se desarrollaran criterios considerando parámetros de peligro mediante el desarrollo de nomogramas. Para el desarrollo de la tesis se considera como punto de inicio, los estudios realizados por (Rodríguez et al., 2014).

Para estimar criterios de peligro, se emplea el diseño de un módulo físico experimental, tomando en cuenta afectaciones a peatones de manera directa, en base a la estabilidad al vuelco (*vh*). Para la generación de nomogramas de peligro, se plantea el siguiente esquema (ver Figura 4-1), en donde se enmarcan las etapas propuestas a considerar para este estudio; tomando en cuenta las condiciones actuales en vialidades de la República Mexicana.

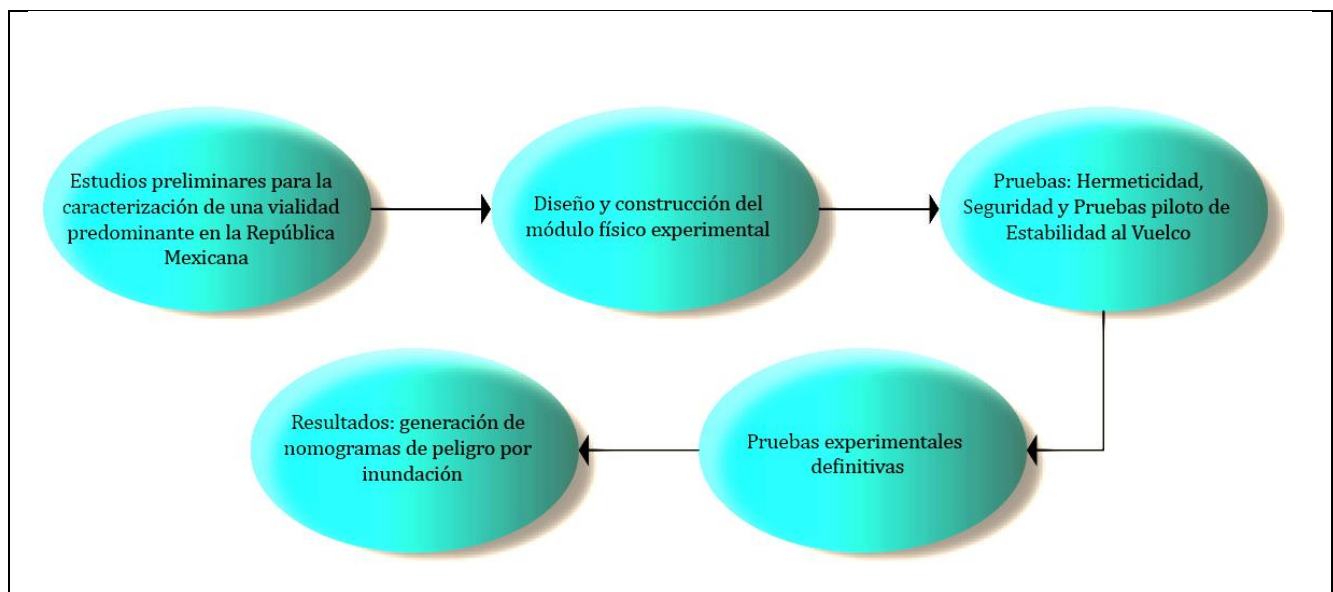


Figura 4-1 Metodología para la estimación de criterios de peligro por inundación

Fuente: Elaboración propia.

4.1 Estudio de pendientes predominantes en vialidades de la República Mexicana

Con base al diseño de un módulo experimental, se realizó un estudio de pendientes en calles y avenidas considerando 9 Estados de la República Mexicana, que han presentado inundaciones históricas. Se proponen tres zonas de estudio: Norte, Centro y Sur del país.

A partir de la publicación de la CENAPRED, FASCICULO INUNDACIONES (2013); en donde señala que México está expuesto regularmente a eventos hidrometeorológicos severos como huracanes y precipitaciones intensas que, si bien incrementan la disponibilidad del agua superficial y la recarga natural de los acuíferos, también provocan daños a la población, la infraestructura, los servicios y los sistemas productivos. Entre 1980 y 2010 las lluvias intensas afectaron a más de ocho millones de personas y ocasionaron daños económicos superiores a 214 mil millones de pesos.

En la Figura 4-2 se muestra el índice de impacto de inundaciones. El mayor impacto histórico y la propensión de inundaciones se concentra en 17 entidades federativas que albergan al 62 por ciento de la población.

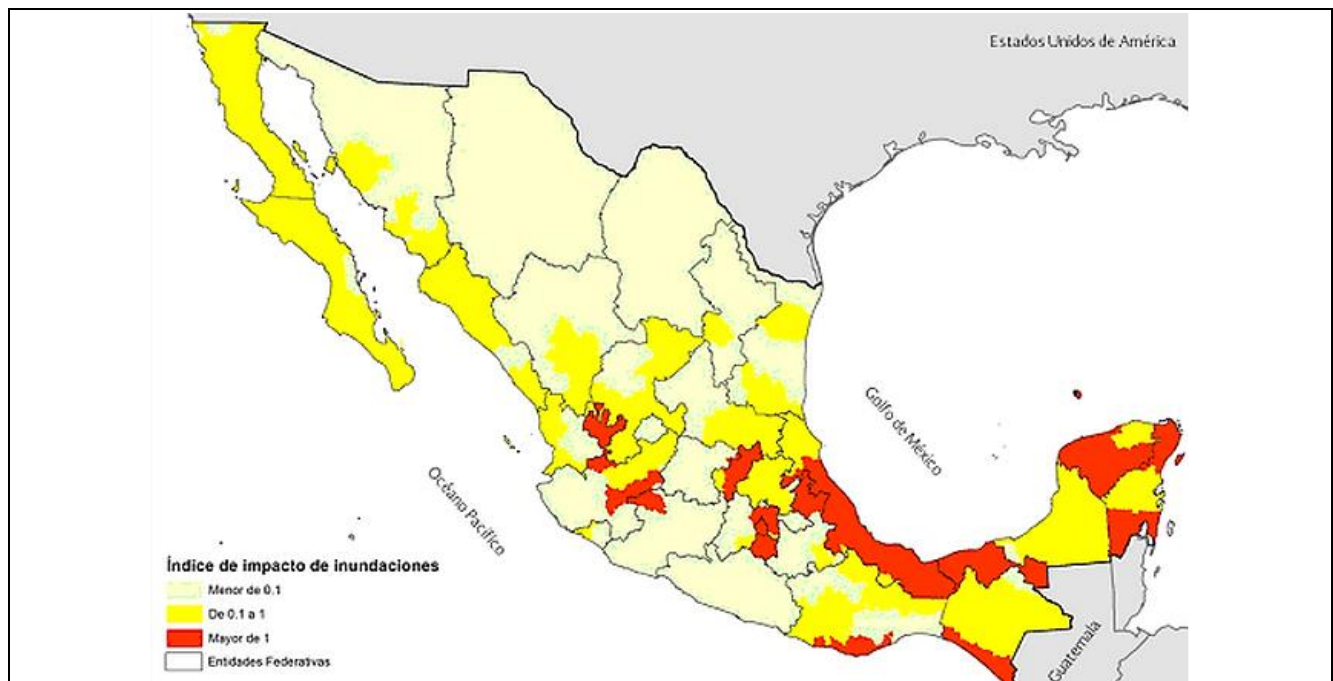


Figura 4-2 Índices de impacto de inundaciones.

Fuente: (CONAGUA, 2011)

Con el apoyo de la Figura 4-3 se identificaron las ciudades más vulnerables a inundaciones:

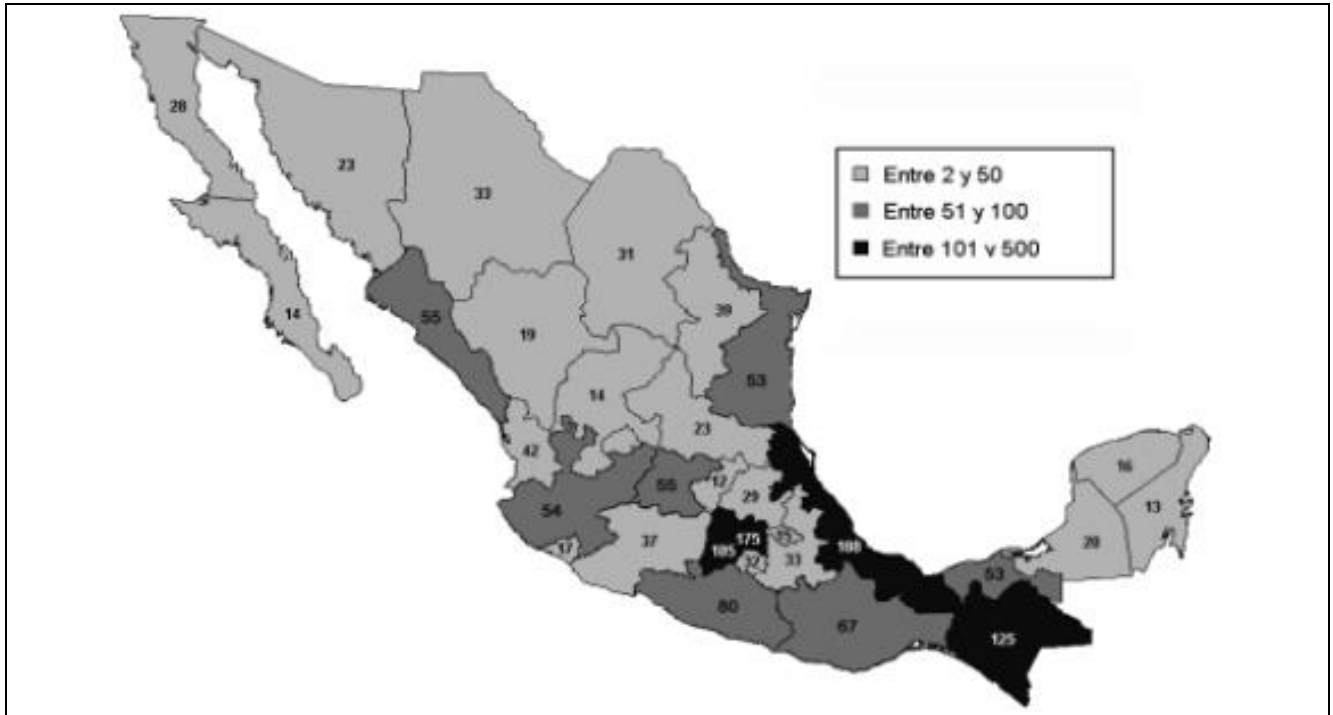


Figura 4-3 Inundaciones registradas entre 1950 y 2000.
Fuente: (CENAPRED, 2013)

Tabla 4-1 Resumen de eventos por inundación

Año	Evento	Estado	Muertes	Población Afectada
1943	Lluvias de invierno	Sinaloa	27	600
1949	Lluvias de invierno	Sinaloa y Sonora	10	159,000
1955	Huracanes Gladys, Hilda y Janet	Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí, Yucatán y Quintana Roo	110	
1959	Ciclón de Manzanillo	Colima y Jalisco	1500	1,600
1960	Lluvias de invierno	Sonora, Sinaloa y Chihuahua	3	96,000
1967	Huracán Beulah	Tamaulipas, Nuevo León, Yucatán y Quintana R.		

Tabla 4 1 Resumen de eventos por inundación (continuación)

Año	Evento	Estado	Muertes	Población afectada
1967	Huracán Katrina	Guerrero, Península de Baja California, Sonora y Nayarit	15	30,000
1968	Huracán Naomi	Colima, Sinaloa, Durango, Coahuila, Sonora y Chihuahua	10	50,000
1976	Huracán Liza	Baja California Sur y Sonora	600	10,000
1982	Huracán Paul	Sinaloa	0	256,800
1985	Lluvias de invierno	Nayarit	0	47,927
1988	Huracán Gilbert	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila	225	139,374
1990	Lluvias de invierno	Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Chihuahua		40,000
	Huracán Diana	Veracruz e Hidalgo	139	50,000
1992	Lluvias de invierno	Nayarit	64	100,000
1993	Lluvias de invierno	Baja California	33	10,000
	Lluvias de invierno	Baja California Sur	3	10,000
	Huracán Gert	Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí y Tamaulipas	40	97,943
1995	Huracán Ismae	Sonora, Sinaloa y Baja California Sur	200	24,111
	Huracán Opal	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo	23	26,874
	Huracán Roxanne	Veracruz, Campeche, Tabasco y Quintana Roo		13,860
1997	Huracán Pauline	Guerrero y Oaxaca	228	8,500
1998	Lluvias	Chiapas	229	28,753
		Baja California	92	3,000
1999	Depresión Tropical 11	Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco	387	1,904,000

Tabla 4 1 Resumen de eventos por inundación (continuación)

Año	Evento	Estado	Muertes	Población afectada
2000	Huracán Keith	Quintana Roo, Chiapas, Tamaulipas y Nuevo León	9	
2001	Huracán Juliette	Sonora y Baja California Sur	9	38,730
	Lluvias	Varios estados	95	126,954
2002	Huracán Isidore	Yucatán, Campeche	4	500,000
	Huracán Kenna	Nayarit, Jalisco	2	374,500
2003	Lluvias de verano	Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas	14	256,301
2004	Frente Frío no. 49	Coahuila	38	6,692

Fuente: (CENAPRED, 2013)

En relación a la tabla de resumen de eventos por inundación (Tabla 4-1); los eventos más recientes que han afectado a la República Mexicana han sido el Huracán Diana que en 1990 provocó 139 decesos en Veracruz e Hidalgo; El Huracán Ismae que causó 200 decesos en las ciudades de Baja California Sur, Sonora Sinaloa y Chihuahua; el huracán Pauline que en 1997 causó 228 muertes en los Estados de Guerrero y Oaxaca; en el mes de Octubre de 1999 la Depresión Tropical No. 11 afectó a los Estados de Veracruz, Puebla, Hidalgo y Tabasco provocando 387 muertes. A partir del año 2000 el índice de decesos se han reducido, sin embargo la población afectada aún sigue siendo un número importante durante inundaciones a causa de eventos meteorológicos extremos. De acuerdo con datos de la CONAGUA, se estima un 8% de área total de la República Mexicana, como área inundable. (Ver Figura 4-4).

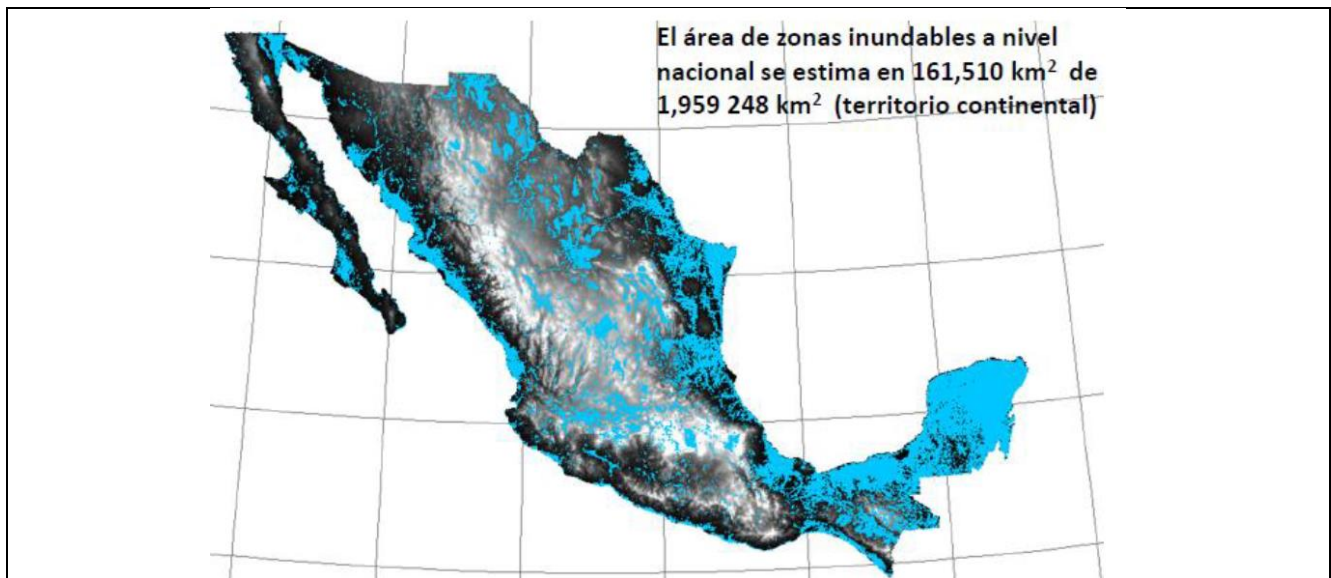


Figura 4-4 Atlas Nacional de riesgo por inundación de la República Mexicana (CONAGUA, 2011)

Con el mapa *Atlas Nacional de Riesgos*, se delimitan las zonas con mayor riesgo a inundaciones; de acuerdo con el *CENAPRED*. (Ver Figura 4-5).

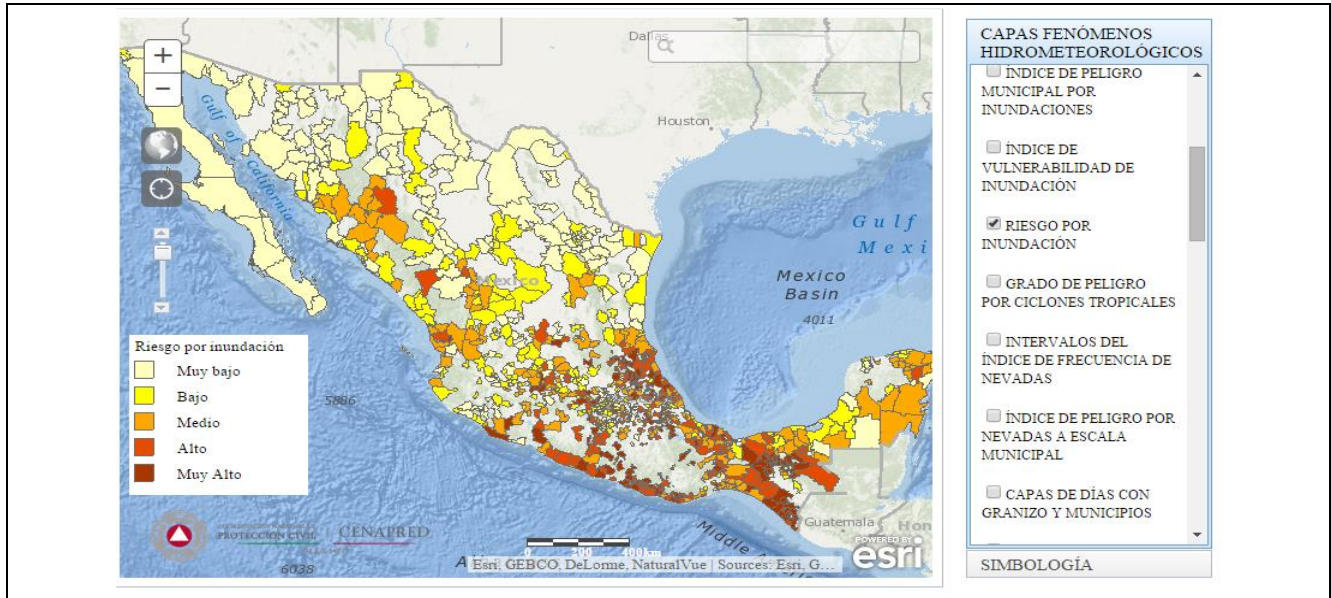


Figura 4-5 Atlas de riesgo por inundación

Fuente: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/images/PHPcenapred/index/fase1/Hidros/>

Utilizando las planimetrías de INEGI, se evaluaron 9 municipios considerando una división por zonas como se muestra a continuación:

Zona Norte:

- Culiacán, Sinaloa
- Monterrey, Nuevo León
- La Paz, Baja California Sur

Zona Centro:

- Tlalpan, D.F.
- Acapulco de Juárez, Guerrero
- Orizaba, Veracruz

Zona Sur:

- Huatulco, Oaxaca
- Tapachula, Chiapas
- Villahermosa, Tabasco

4.1.1 Sistemas de Información Geográfica

Un modelo digital de elevación (MDE) representa de manera de distribución espacial y en una estructura de celdas la elevación del terreno o el valor Z de una región geográfica. Esta malla compuesta por las celdas antes mencionadas, comúnmente se le conoce como *RASTER* manipulable en archivos de extensión Shapefile y compatibles con programas como ArcGIS. Los modelos digitales de elevación contienen datos vectoriales que son utilizados como componentes preliminares en los estudios de Hidrología e Hidráulica, debido a que abarcan extensas áreas y suelen remplazar las cartas topográficas impresas. La utilidad de los SIG simplifica los procesos de obtención de parámetros geomorfológicos de cuencas, se pueden obtener valores de áreas longitudes, elevaciones de manera sencilla. Con base a los modelos digitales de elevación disponibles en INEGI disponibles en archivos ShapeFile, se extrajeron valores con ayuda del programa ArcGIS, para obtener puntos de elevación en vialidades principales de las entidades antes enlistadas, con ello se definieron pendientes predominantes por entidad. (Ver Figura 4-6 a Figura 4-14).

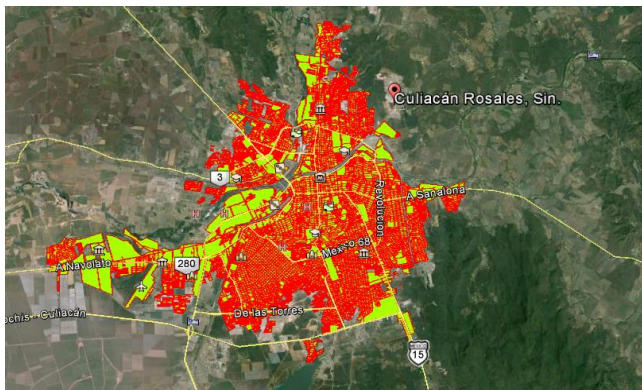


Figura 4-6 Culiacán, Sinaloa

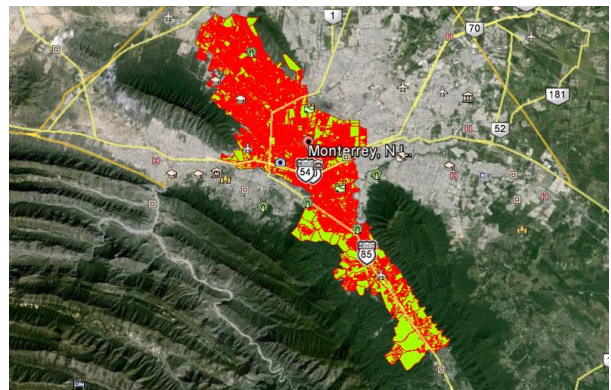


Figura 4-7 Monterrey, Nuevo León

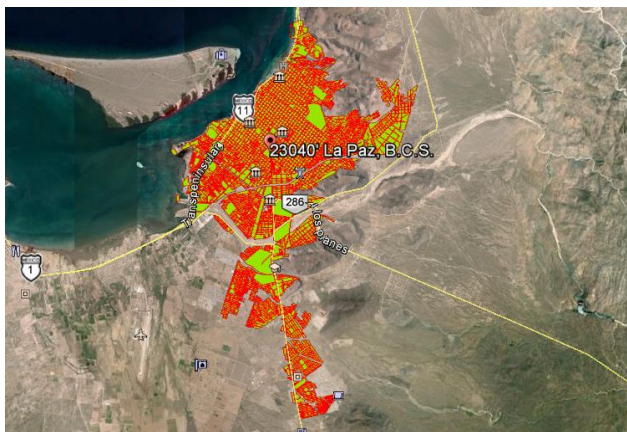


Figura 4-8 La Paz, Baja California Sur

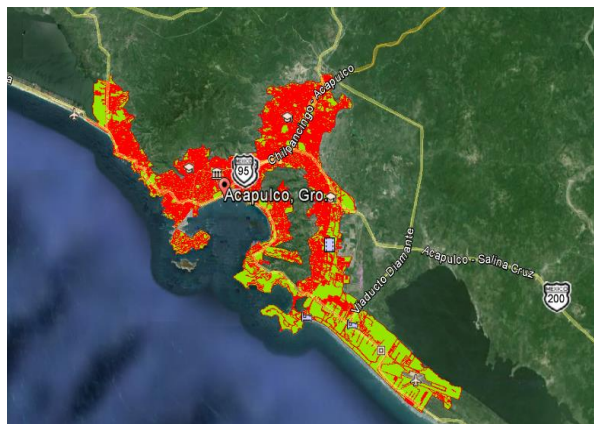


Figura 4-9 Acapulco de Juárez, Guerrero

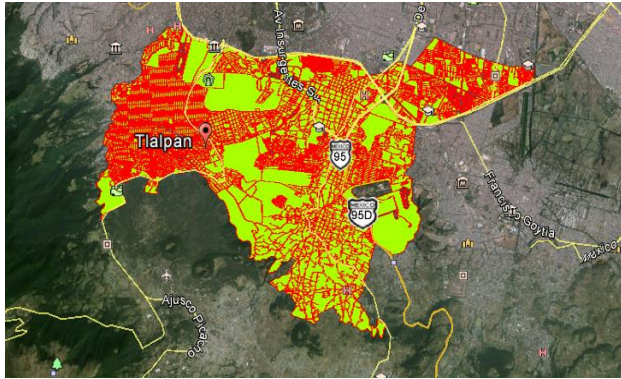


Figura 4-10 Tlalpan, CDMX.

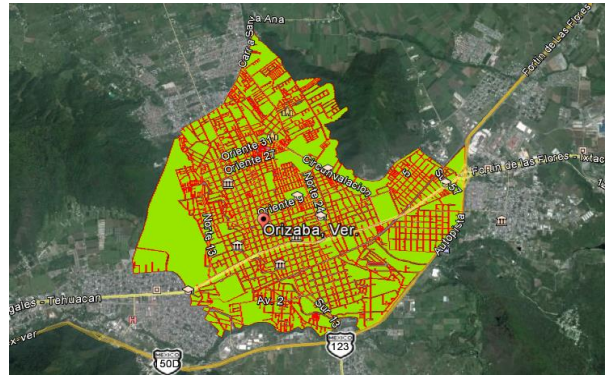


Figura 4-11 Orizaba, Veracruz

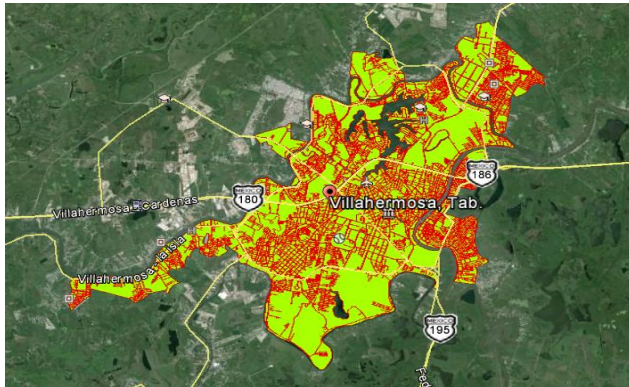


Figura 4-12 Villahermosa, Tabasco

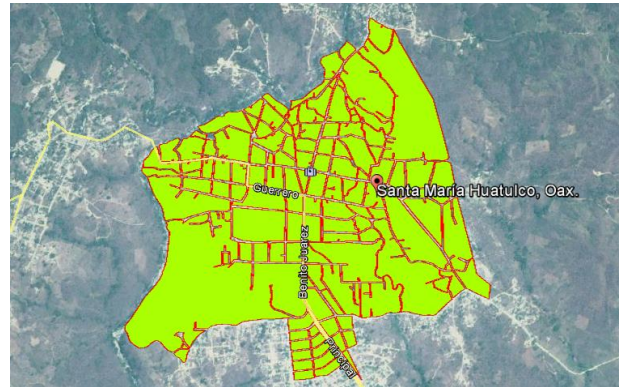


Figura 4-13 Huatulco, Oaxaca

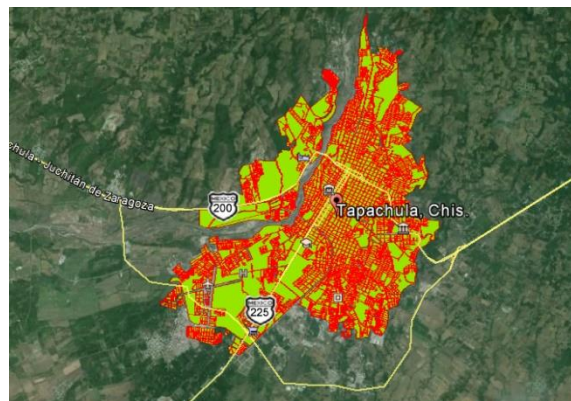


Figura 4-14 Tapachula, Chiapas

Se utilizaron las planimetrías de las entidades propuestas para este estudio, con la finalidad de trazar puntos y extraer su elevación, considerando las vialidades definidas entre cada polígono que representa áreas urbanas. En el caso de la República Mexicana, los MDE se obtienen en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, los *RASTER* del INEGI tienen un tamaño de celda de 30 x 30 m y fueron obtenidos por el mismo instituto a partir de sus propias cartas topográficas con escala 1:50 000. (Ver Figura 4-15 a Figura 4-23).

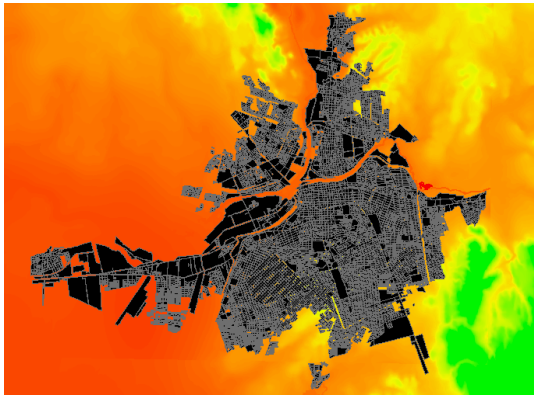


Figura 4-15 Culiacán Sinaloa

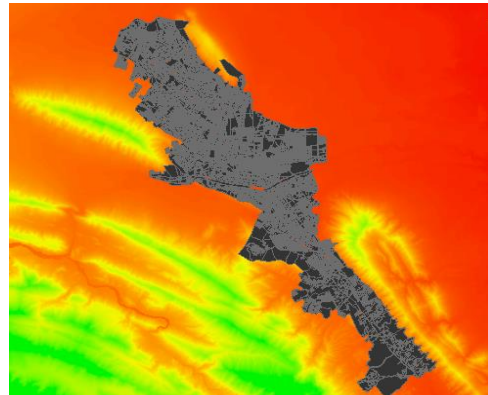


Figura 4-16 Monterrey, Nuevo León

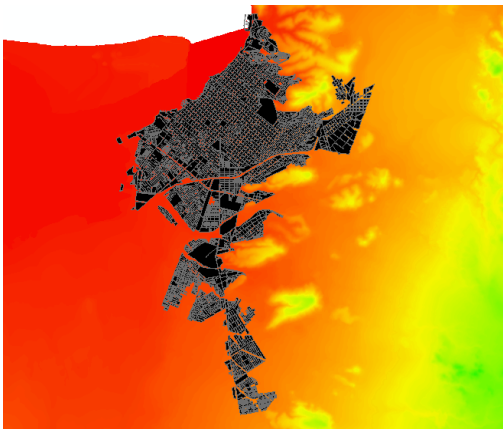


Figura 4-17 La Paz, BCS

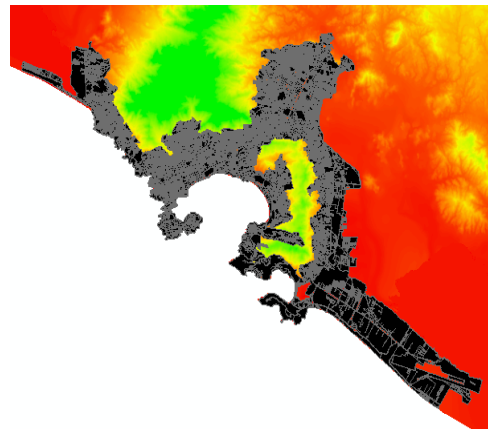


Figura 4-18 Acapulco de Juárez, Guerrero

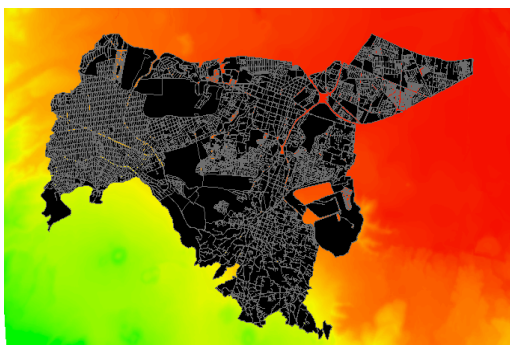


Figura 4-19 Tlalpan, D.F.



Figura 4-20 Orizaba, Veracruz

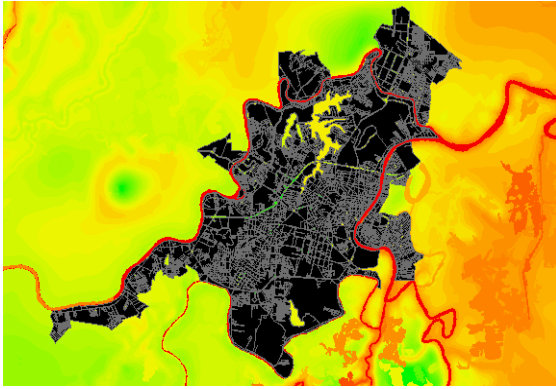


Figura 4-21 Villahermosa, Tabasco

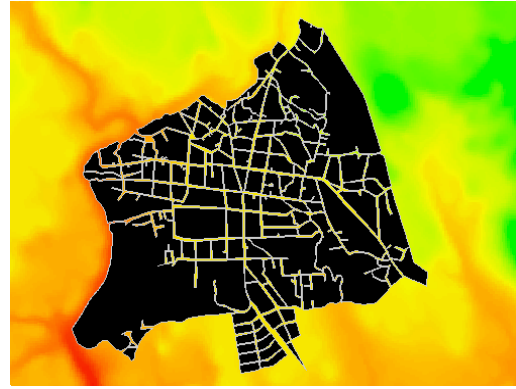


Figura 4-22 Huatulco, Oaxaca

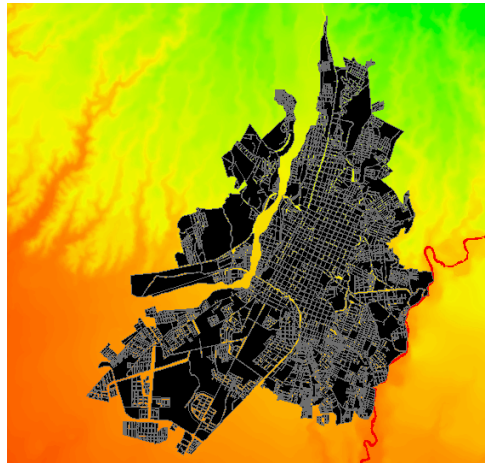


Figura 4-23 Tapachula, Chiapas

4.1.2 Vialidades consideradas por zona propuesta

1. Vialidades Culiacán, Sinaloa

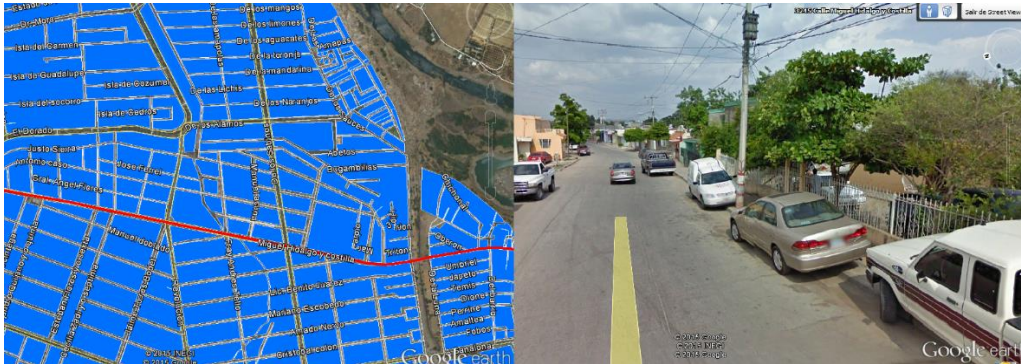


Figura 4-24 Calle Miguel Hidalgo y Costilla



Figura 4-25 Calle Pedro María Anaya



Figura 4-26 Av. Enrique Félix Castro

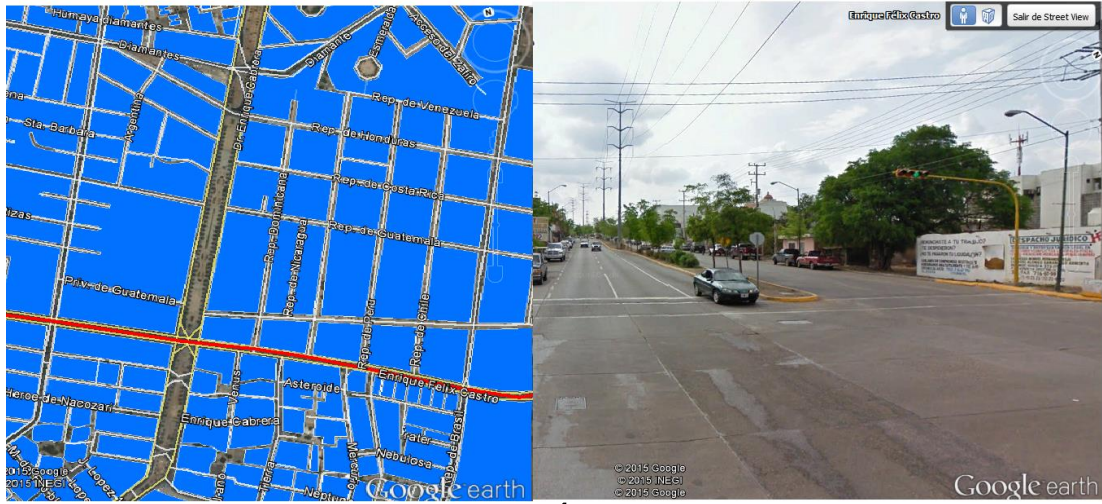


Figura 4-27 Av. Álvaro Obregón

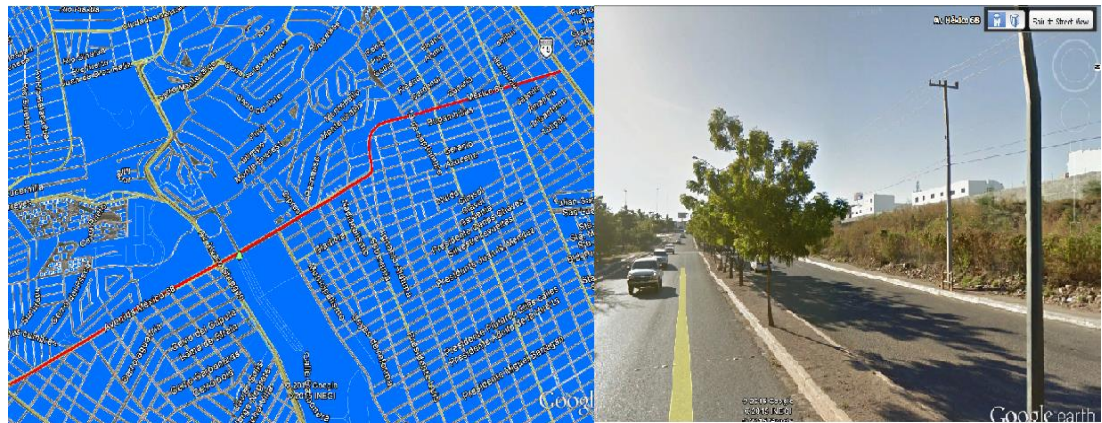


Figura 4-28 Av. México 68

2. Vialidades Monterrey, Nuevo León



Figura 4-29 Av. Revolución

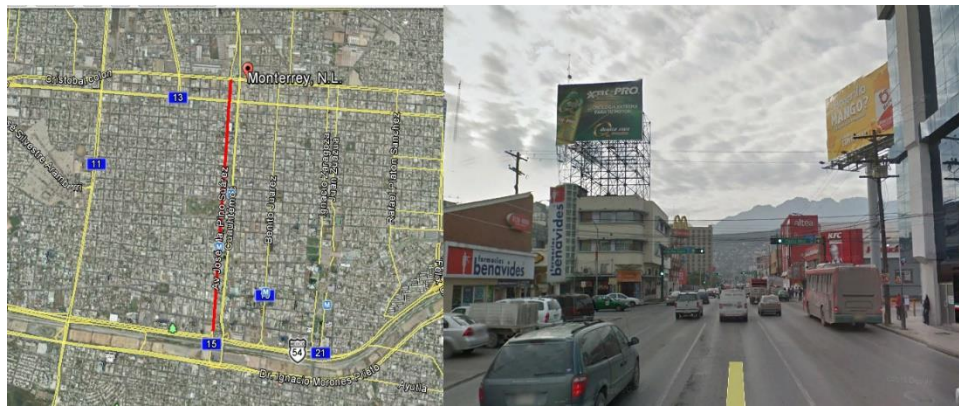


Figura 4-30 Av. José Ma. Pino Suárez

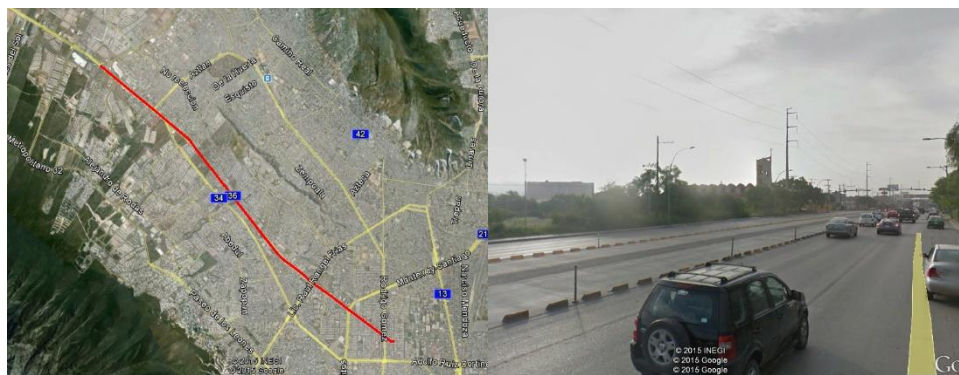


Figura 4-31 Av. Abraham Lincoln



Figura 4-32 Anillo Periférico

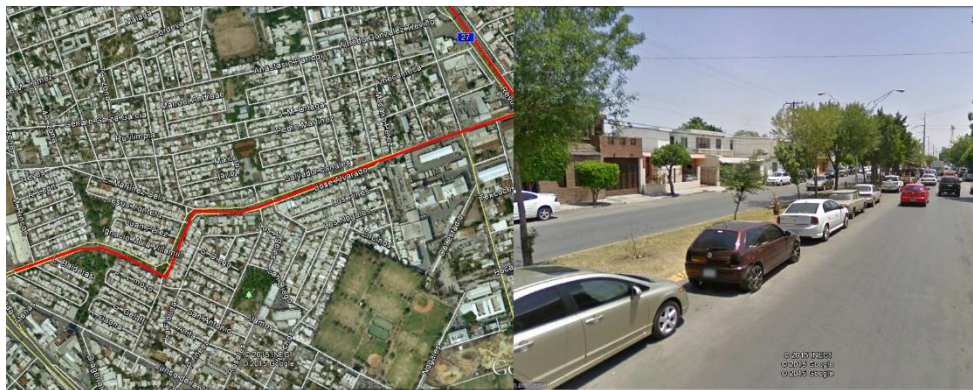


Figura 4-33 Av. José Alvarado

3. Vialidades BCS, La Paz



Figura 4-34 Av. 5 de Febrero

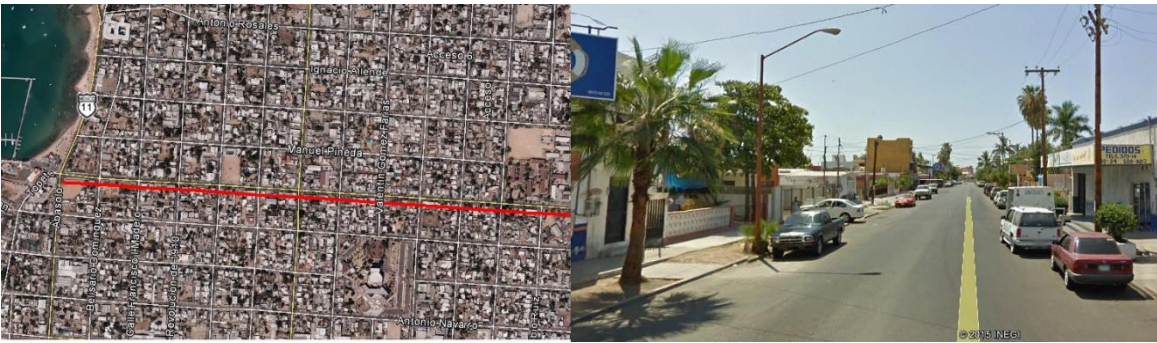


Figura 4-35 Av. General Manuel Márquez de León



Figura 4-36 Calle 5 de Mayo



Figura 4-37 Calle Fco. King Rondero



Figura 4-38 Calle Mangle

4. Vialidades Acapulco de Juárez, Guerrero



Figura 4-39 Av. Diego Hurtado de Mendoza



Figura 4-40 Av. Almirante Cristóbal Colón

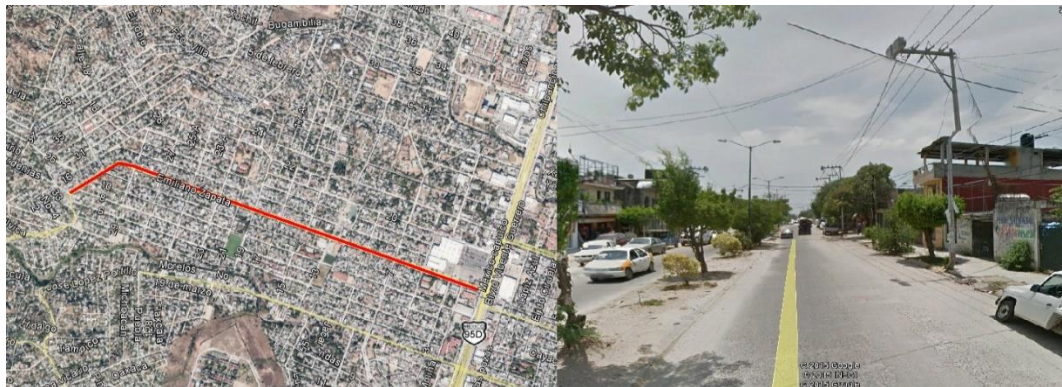


Figura 4-41 Av. Emiliano Zapata



Figura 4-42 Av. Niños Héroes

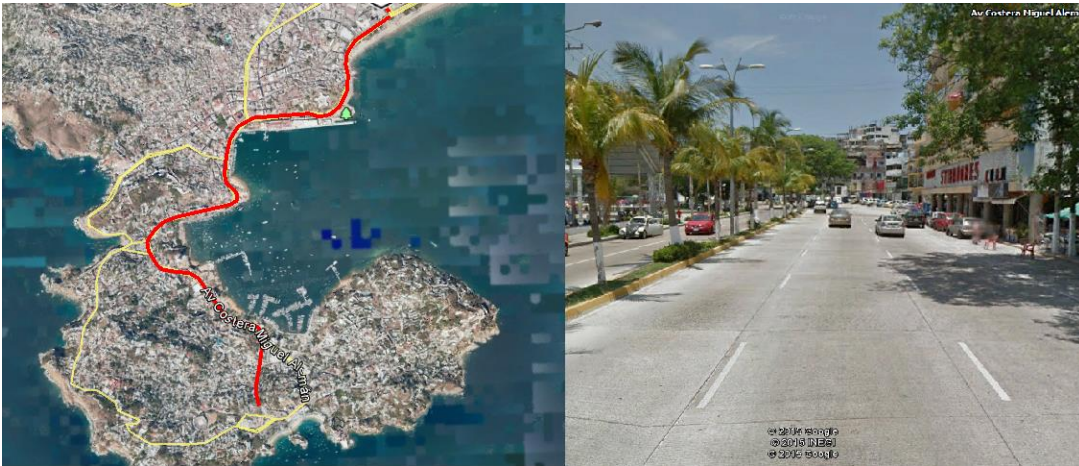


Figura 4-43 Av. Costera Miguel Alemán

5. Vialidades Tlalpan, D.F.



Figura 4-44 Calle Tepeximilpa



Figura 4-45 Eje 2 Ote Calzada de la Viga

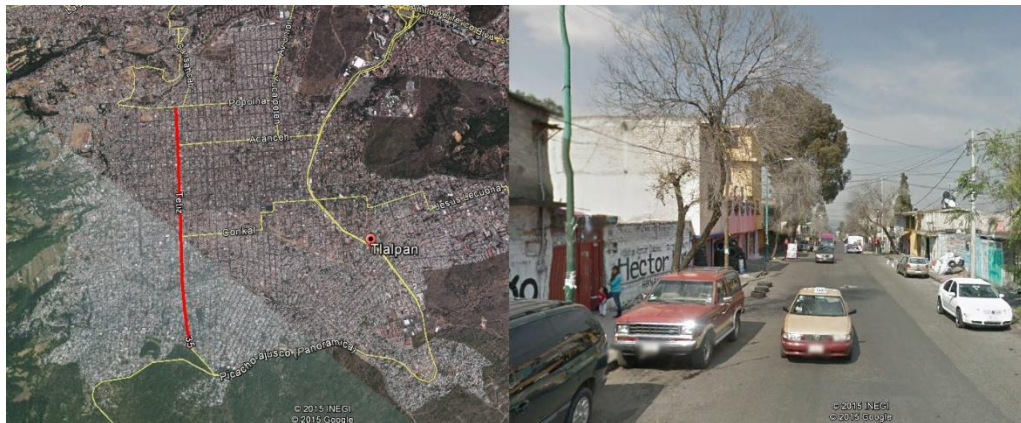


Figura 4-46 Calle Telitz

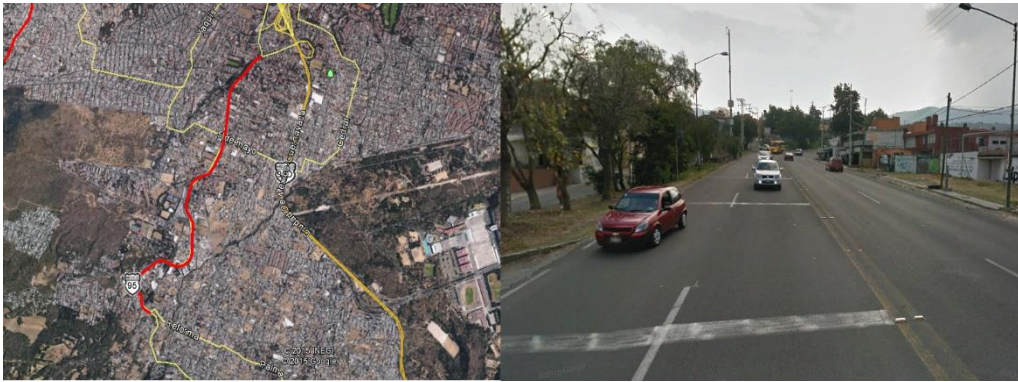


Figura 4-47 Carretera Federal a Cuernavaca

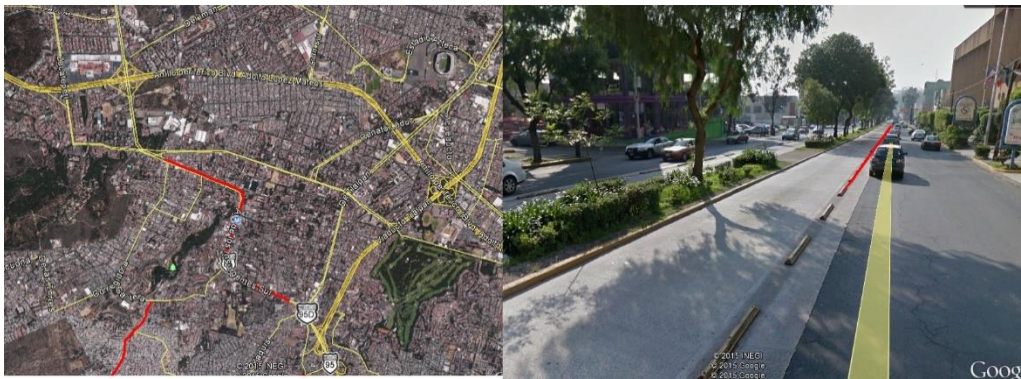


Figura 4-48 Av. De los Insurgentes Sur

6. Vialidades Orizaba, Veracruz,

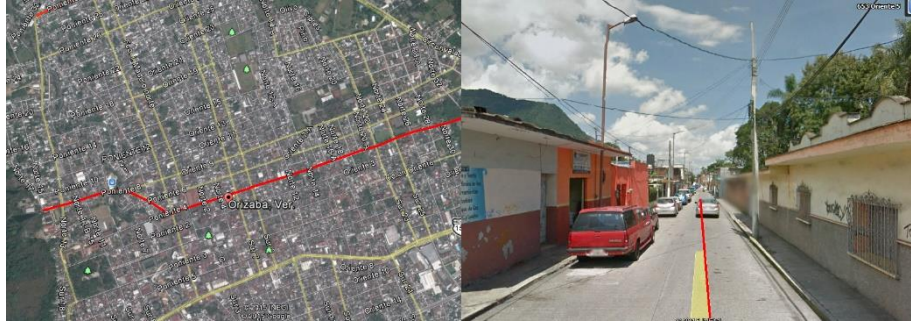


Figura 4-49 Calle Norte 5 - Calle Oriente 5

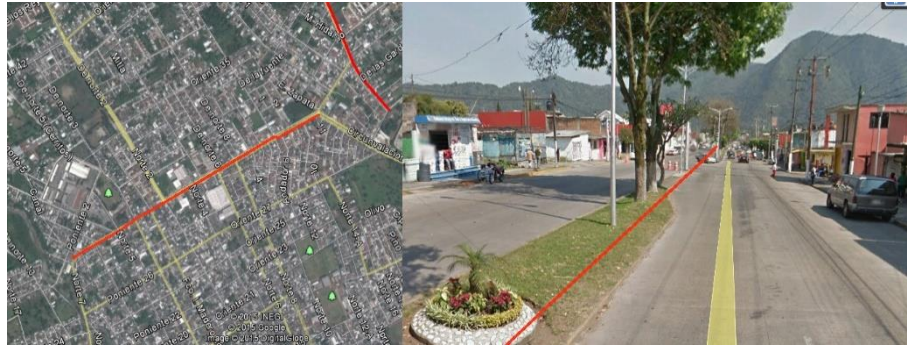


Figura 4-50 Calle Oriente 31

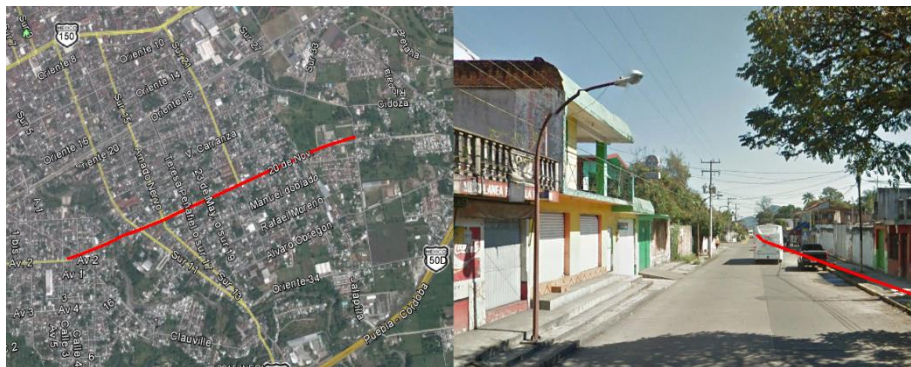


Figura 4-51 Calle 20 de Noviembre

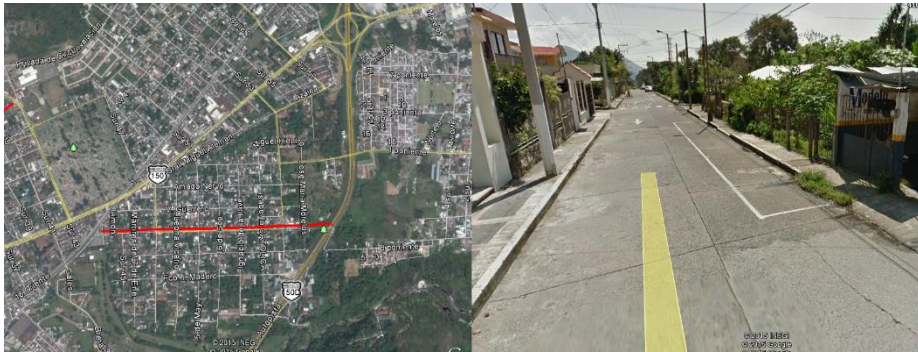


Figura 4-52 Av. Independencia

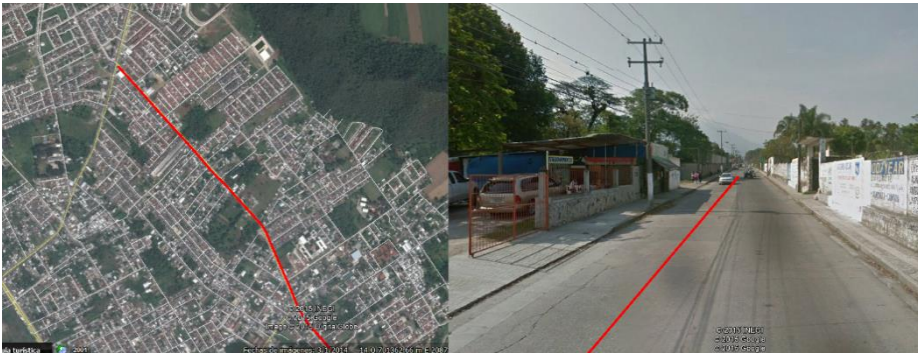


Figura 4-53 Calle De los Censos

7. Vialidades Villahermosa, Tabasco



Figura 4-54 Paseo Usumacinta



Figura 4-55 Av. México

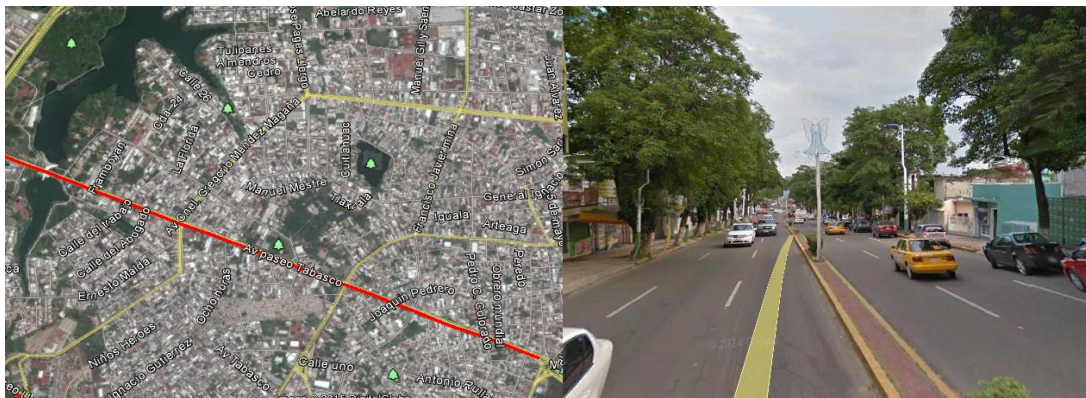


Figura 4-56 Av. Paseo Tabasco

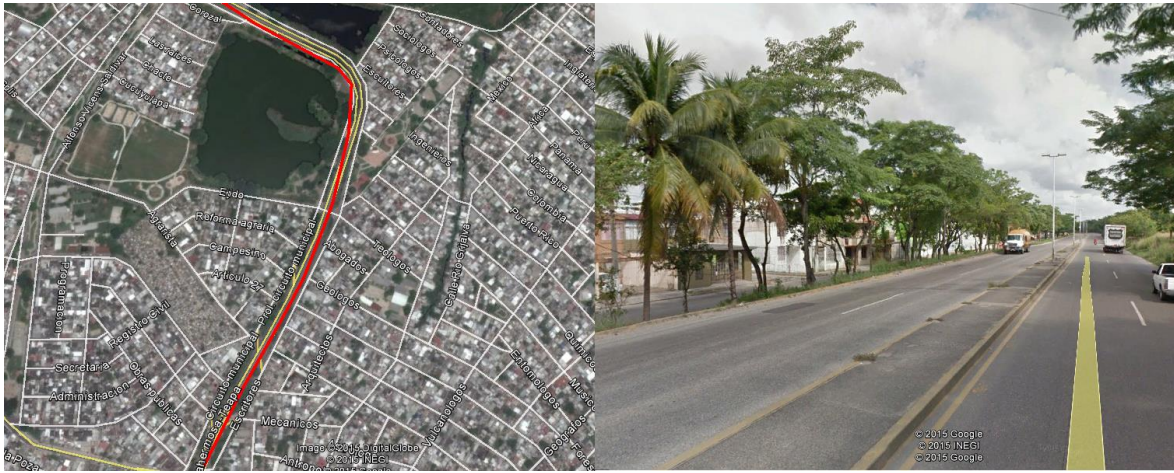


Figura 4-57 Prolongación Circuito Municipal

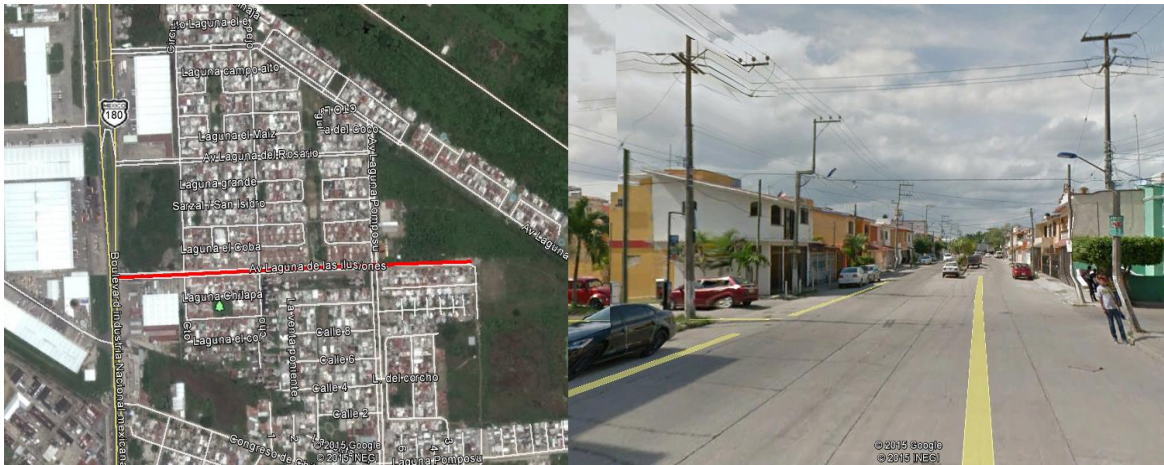


Figura 4-58 Av. Laguna de Ilusiones

8. Vialidades Tapachula, Chiapas



Figura 4-59 19A Poniente - 19A Oriente

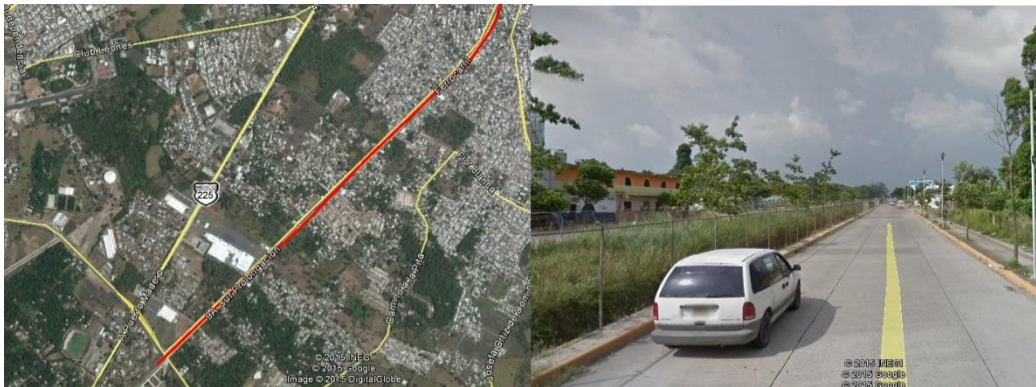


Figura 4-60 19A Sur Prolongación

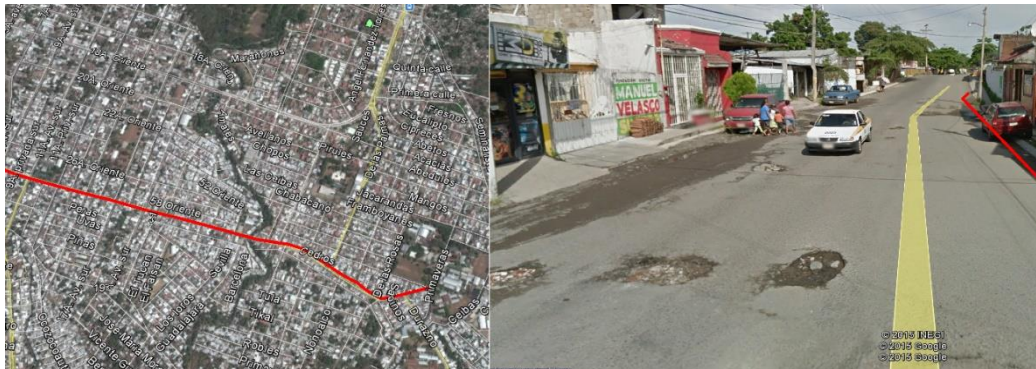


Figura 4-61 28A. Oriente



Figura 4-62 1A Oriente



Figura 4-63 29A. Poniente

9. Vialidades Huatulco, Oaxaca



Figura 4-64 Calle Juan de la Barrera



Figura 4-65 Calle Guerrero

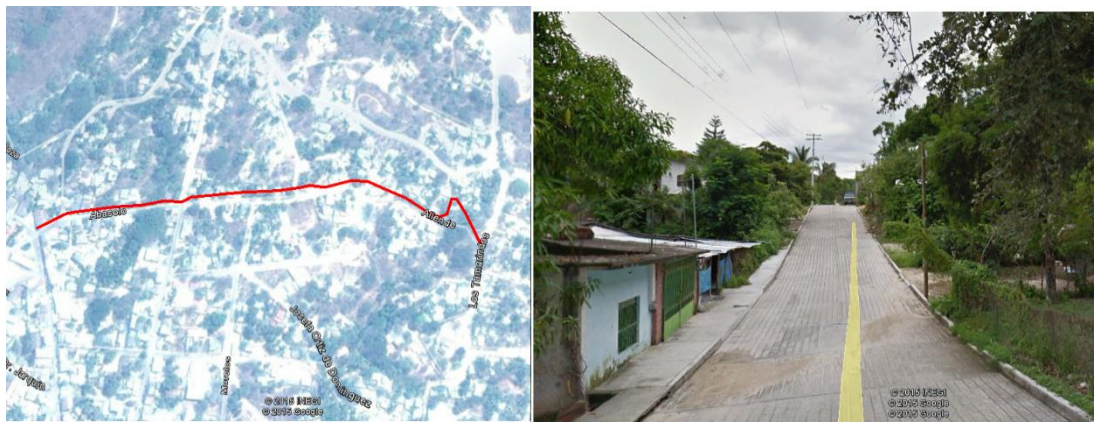


Figura 4-66 Calle Abasolo - Calle Allende

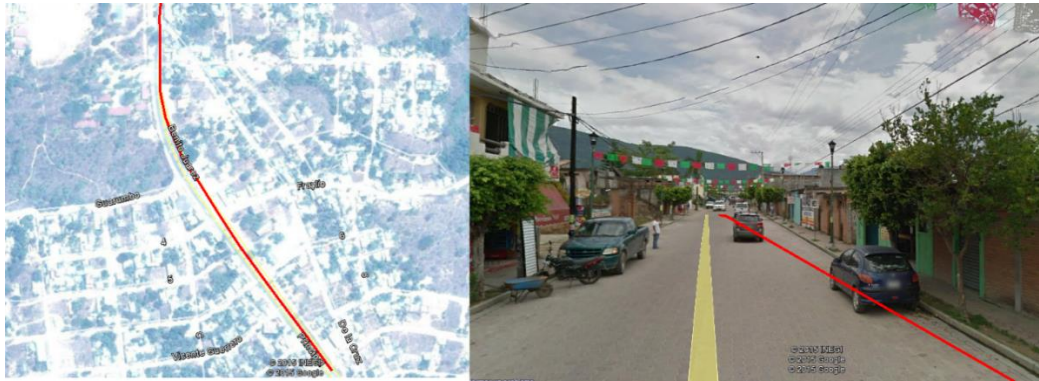


Figura 4-67 Av. Benito Juárez



Figura 4-68 Calle Juan Escutia

En conclusión, el estudio de pendientes predominantes arrojó una gran similitud en calles o avenidas de todo el país; en contraste con la zona Centro, las pendientes resultaron mayores que en la zona Sur y Norte del país, sin embargo las pendientes no sobrepasan el 5% por lo que se concluye este sea el valor límite en el estudio realizado. En la Tabla 4-2 se presentan los valores obtenidos a partir de los modelos digitales de elevación de INEGI, las pendientes predominantes en avenidas y calles que se consideraron de acuerdo con los registros en ciudades donde se han presentado mayores afectaciones debido a las inundaciones, resultan ser menores a 5%:

Tabla 4-2 Pendientes promedio en vialidades de la República Mexicana

Zona Norte	
Pendiente Promedio	1.36 %
Zona Centro	
Pendiente Promedio	3.47 %
Zona Sur	
Pendiente Promedio	1.47 %

4.2 Diseño de módulo físico experimental

El módulo físico experimental se implementara en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en el laboratorio de hidráulica Enzo Levi. A partir del manual de diseño de espacio público de la Dirección General de Obras Públicas de Zapopan, el cual caracteriza dos tipos de sistemas viales (Primario y Secundario). El primario contempla accesos principales y de acceso controlado; y el secundario engloba vialidades colectoras, colectoras menores, subcolectoras, locales, tranquilizadas, peatonales y ciclovistas. El tipo de vialidad que se seleccionó es la tipo D, al ser una calle con una circulación de longitud moderada, consideración fundamental para realizar la construcción del módulo experimental. (Ver Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Tipo de vialidad: Local D (considerando un sentido)

Tipo de Vialidad	tipos	Derecho de vía mínimo total	Sentido	Banqueta			Ciclovía		Arroyo Vehicular Carriles Centrales						Camellón Central
				total de banqueta	Sendero	Borde			Carril derecho (preferencial al TP)		Carril Central (Derecho)		Carril Central (Otro)		
				MIN	MIN	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
Sistema Vial Primario															
ACCESO CONTROLADO	a	45.30	↑↓	2.4	1.60	0.80	1.9	3.5	•	•	3.60	3.90	3.30	3.60	1.50
	b	50.30	↑↓	2.4	1.60	0.80	1.9	3.5	•	•	3.60	3.90	3.30	3.60	1.50
PRINCIPAL	a	27.00	↑↓	2.4	1.60	0.80	1.9	3.5	3.60	3.90	3.60	3.90	3.00	3.50	4.00
	b	23.00	↑	2.4	1.60	0.80	1.9	2.5	3.60	3.90	3.60	3.90	3.00	3.50	•
Sistema Vial Secundario															
COLECTORA	a	25.00	↑↓	3.00	1.60	1.00	1.4	2.0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.00
	b	20.00	↑↓	3.00	1.60	1.00	1.4	2.0	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.00
COLECTORA MENOR	a	17.00	↑↓	2.80	1.60	1.00	1.4	2.0	3.50	3.50	3.30	3.30	•	•	1.50
	b	15.00	↑↓	2.10	1.60	0.50	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
SUBCOLECTORA	a	13.00	↑	3.50	1.60	1.00	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
	b	13.00	↑	2.30	1.60	0.70	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
	c	13.00	↑	2.30	1.60	0.70	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
LOCALES	a	16.00	↑	3.00	1.60	1.00	1.4	2.0	3.50	3.50	3.50	3.50	•	•	•
	b	12.00	↑	3.00	1.60	1.00	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
	c	12.00	↑	1.80	1.40	0.40	1.4	2.0	3.00	3.50	3.00	3.50	•	•	•
	d	10.00	↑	1.20	1.00	0.20	1.4	2.0	2.75	3.50	2.75	3.50	•	•	•
LOCAL MÍNIMA*		8.00	↑	1.20	1.00	0.20	•	•	2.75	3.50	•	•	•	•	•
TRANQUILIZADA		7.00	↑↓	•	•	•	•	•	3.50	3.50	•	•	•	•	•
PEATONAL	a	8.00	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	b	6.00	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
CICLOVÍA		Las medidas de derecho de vía mínimo total no tienen considerada una ciclovía, para su consideración ver apartado 2.4 ciclovía													

Fuente: (Obras Públicas Zapopan), Dirección General.

Se propone una vialidad con una banqueta de 1.20 m, y un carril de circulación de 2.75 m con una longitud de 5.00 m. (Ver Figura 4-69).

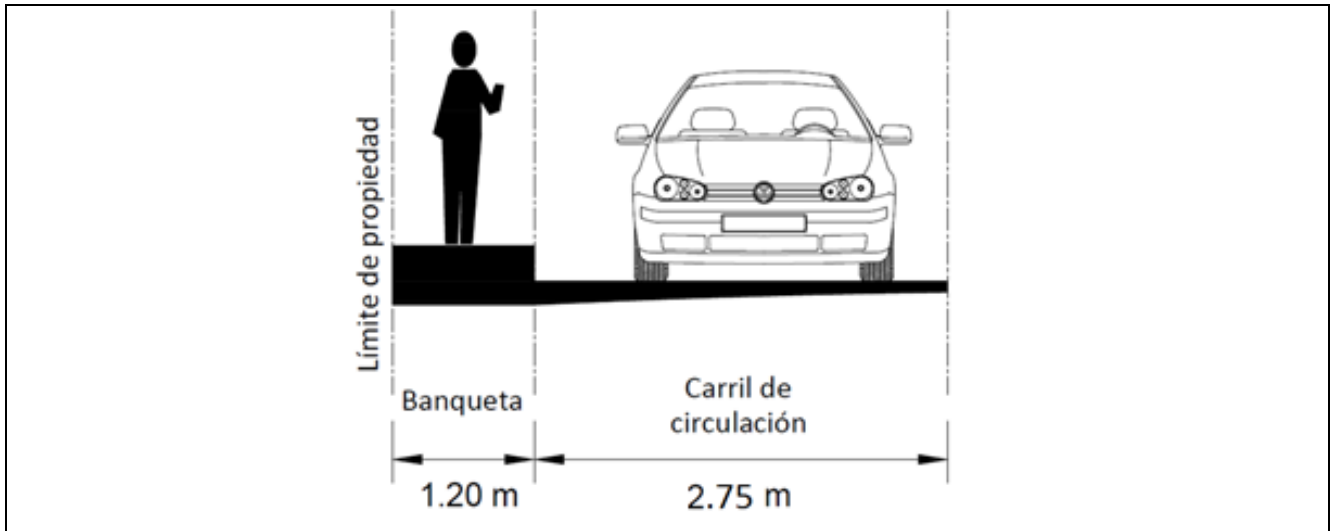


Figura 4-69 Propuesta de vialidad

Fuente: Elaboración propia con datos de la Dirección General de Obras Públicas de Zapopan.

Se considera una calle con las siguientes dimensiones, en base a los criterios mencionados anteriormente; (vialidad tipo D):

- Ancho de banqueta: 1.20 m
- Altura de banqueta: 0.20 m
- Pendiente de banqueta: 1%
- Carril de circulación: 2.75 m (un solo sentido)
- Pendiente transversal del carril de circulación hacía la banqueta: 1%
- Pendientes de calle longitudinales consideradas: 2%, 3%, 4% y 5%; (Estudio de pendientes predominantes en vialidades de la República Mexicana).

Se antecede el estudio de la disponibilidad de espacio y gasto requerido para llevar a cabo pruebas experimentales satisfactoriamente, tomando en cuenta consideraciones y limitaciones descritas a continuación:

- Consideraciones

- Construir e instrumentar un canal, representando una vialidad con el mayor detalle de sus componentes, posteriormente se hará circular distintos gastos sobre la vialidad con la finalidad de obtener diferentes tirantes y velocidades, esto para el estudio de los efectos en peatones,
- Modificar las condiciones en el módulo experimental, implementando distintas pendientes y rugosidades en el estudio,
- Considerar todas las medidas de seguridad necesarias para las personas sometidas a pruebas en el estudio.

- Limitaciones

El gasto máximo que pueden aportar las bombas en el laboratorio Enzo Levi es de 400 l/s; utilizando simulaciones con el programa HEC-RAS, los tirantes que se presentan en el módulo experimental propuesto, son alrededor de 0.1 m; se requieren de tirantes mayores para este estudio. Considerando las condiciones de geometría en el módulo, se estima un gasto de 1000 l/s para alcanzar tirantes mayores a 0.3 m. Para solucionar esta limitante se propone un tanque de almacenamiento capaz de aportar dicho gasto, se plantea operar una compuerta a la salida del tanque, con la finalidad de operar en función de una regulación de velocidades y tirantes requeridos en las pruebas experimentales.

- Coeficiente de rugosidad

A partir de la Norma N PYR CAR 1 06; de la (SCT) dicha norma determina el grado de influencia sobre la velocidad del escurrimiento que tienen las condiciones del cauce y sus llanuras de inundación, tales como las características de los materiales que lo constituyen (ver Tabla 4-4).

Tabla 4-4 Coeficientes de rugosidad de Manning (*n*) para canales recubiertos

Tipo de recubrimiento o relleno y condiciones del cauce	Coeficiente de rugosidad (<i>n</i>)		
	Mínimo	Normal	Máximo
Asfalto:			
Liso	0.013	0.013	--
Rugoso	0.016	0.016	--
Limpio, intemperizado	0.018	0.022	0.02

4.3 Tanque de almacenamiento

Es necesario tener en cuenta cual es el gasto que se necesita para poder obtener los tirantes y las velocidades con los cuales se va realizar el estudio y si consideramos una longitud de 5 m de la calle (esto debido al espacio con que se cuenta para la instalación del módulo experimental, fue necesario usar el programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) para poder obtener el gasto que se necesita para representar los tirantes y velocidades seleccionados.

El programa HEC-RAS el cuál fue desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers). Es un programa de hidráulica para modelar el comportamiento de un caudal en un canal artificial (calle) o en un cauce natural; sirve para saber si dicho caudal se desborda del cauce o no. Teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas anteriormente, se realizaron simulaciones hidráulicas para conocer el tirante en el módulo experimental considerando los 400 l/s que aportan las bombas en el laboratorio. Se considera la geometría propuesta del manual de diseño de espacio público de la Dirección General de Obras Públicas de Zapopan y se simula con una pendiente nula. (Ver Figura 4-70).

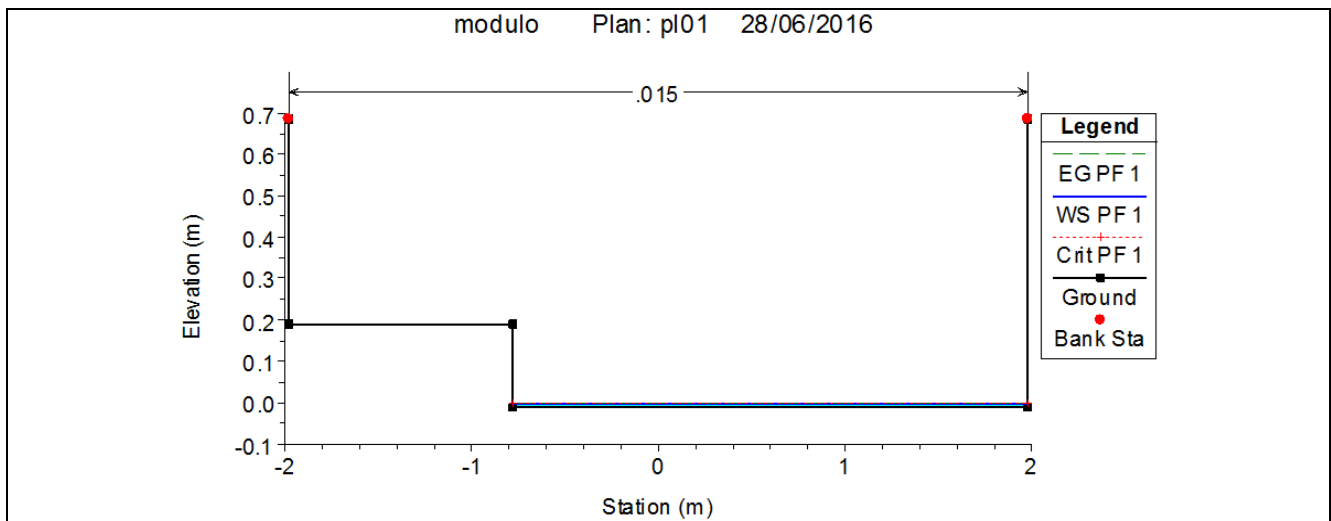


Figura 4-70 Sección transversal del módulo experimental en HEC - RAS
Fuente: elaboración propia.

Se realizó una simulación con un gasto de 400 l/s y con la geometría de la calle anteriormente propuesta; los tirantes alcanzados para este estudio considerando una pendiente del 1%, son de 0.2 m aproximadamente, con números de Froude menores a 0.5, es decir, se presenta un flujo subcrítico. (Ver Figura 4-71 y Tabla 4-5).

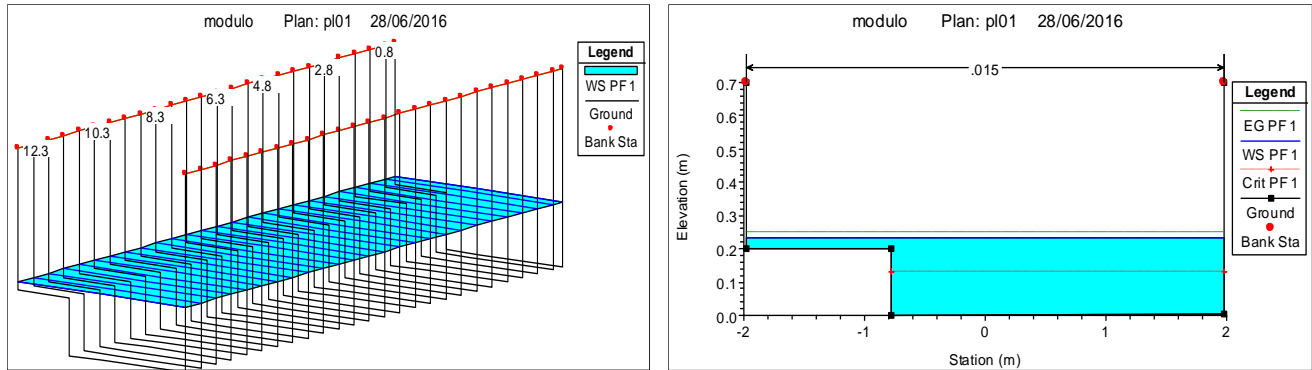


Figura 4-71 Perfil longitudinal y sección transversal del módulo experimental en HEC – RAS para 400 l/s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4-5 Resultados de simulación en HEC-RAS para 400 l/s

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
único	12.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	11.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	11.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	10.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	10.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	9.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	9.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	8.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	8.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	7.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	7.3	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	6.8	PF 1	0.40	0.00	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	6.3	PF 1	0.40	-0.01	0.23	0.60	0.67	3.95	0.46
único	5.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	5.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	4.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	4.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	3.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.47
único	3.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	2.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.47
único	2.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	1.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.47
único	1.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	0.8	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.47
único	0.3	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.46
único	0	PF 1	0.40	-0.01	0.22	0.60	0.67	3.95	0.47

En una segunda simulación hidráulica se incorporó un gasto de 1000 l/s, generando tirantes de 0.36 m, considerable para realizar pruebas experimentales de estabilidad al vuelco. (Ver Figura 4-72 y Tabla 4-6).

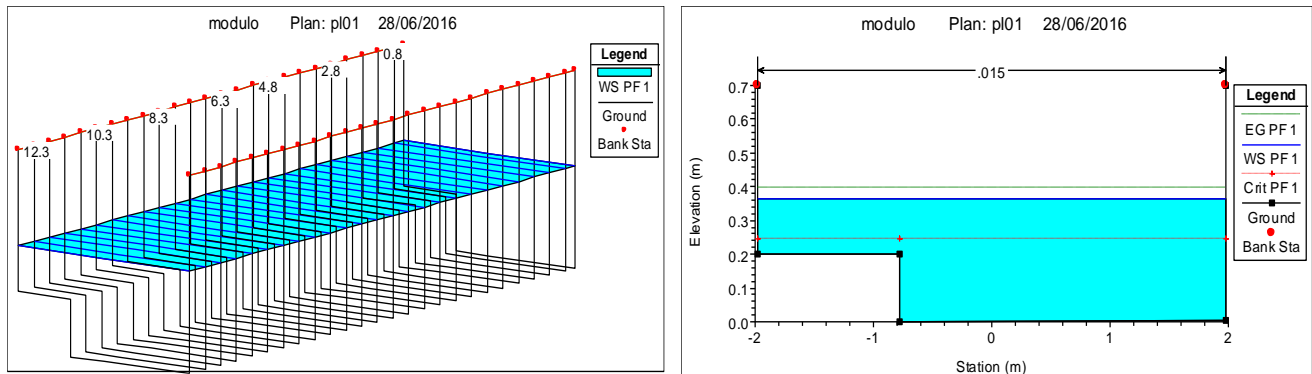


Figura 4-72 Perfil longitudinal y sección transversal del módulo experimental en HEC – RAS para 1000 l/s
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4-6 Resultados de simulación en HEC-RAS para 1000 l/s

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
único	12.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	11.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	11.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	10.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	10.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	9.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	9.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	8.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	8.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	7.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	7.3	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	6.8	PF 1	1.00	0.00	0.36	0.84	1.18	3.95	0.49
único	6.3	PF 1	1.00	-0.01	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	5.8	PF 1	1.00	-0.01	0.36	0.84	1.18	3.95	0.49
único	5.3	PF 1	1.00	-0.01	0.36	0.84	1.19	3.95	0.49
único	4.8	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.18	3.95	0.49
único	4.3	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.19	3.95	0.49
único	3.8	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.18	3.95	0.49
único	3.3	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.19	3.95	0.49
único	2.8	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.18	3.95	0.49
único	2.3	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.19	3.95	0.49
único	1.8	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.85	1.18	3.95	0.49
único	1.3	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.19	3.95	0.49
único	0.8	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.85	1.18	3.95	0.49
único	0.3	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.18	3.95	0.49
único	0	PF 1	1.00	-0.01	0.35	0.84	1.18	3.95	0.49

Debido a las limitaciones que se presentan en el laboratorio de hidráulica para proporcionar un gasto superior 0.4 m^3 , se considera incorporar un gasto de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que se obtienen tirantes considerables para la realización de pruebas experimentales en el módulo. Se estima un tiempo aproximado de 4 minutos para la acción de cruzar una calle en repetidas ocasiones y realizar un registro de tirantes y velocidades para cada prueba. Se realizó el siguiente cálculo para determinar las dimensiones del tanque, considerando el espacio disponible para su construcción:

$Q_{\text{salida}}: 1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Para 4 minutos requeridos)

$4 \text{ minutos} = 240 \text{ seg} \therefore \text{se requiere un volumen de almacenamiento de } 240 \text{ m}^3$

Se proponen las siguientes dimensiones del tanque de almacenamiento (ver Tabla 4-7):

Tabla 4-7 Dimensiones de tanque de almacenamiento

b en m	h en m	l en m
11.6	2	11.30

$$\text{volumen total} = 262.2 \text{ m}^3$$

Se tiene una holgura de 12.2 m^3 , ya que existe un volumen que se pierde durante la operación de la compuerta; al realizar las aberturas requeridas para obtener diferentes tirantes y velocidades en el flujo del agua.

A continuación se muestra el diseño del módulo físico experimental (ver Figura 4-73 y Tabla 4-8); se emplearan 3.95 m de ancho para la zona de estudio (calle de pendiente variable), la cual tendrá una longitud de 5.0 m. Se considera un tanque de almacenamiento con una capacidad de 280 m³. A la salida del tanque se contempla una zona de amortiguamiento y una transición a manera de aquietador, con la finalidad que la profundidad del flujo no cambie durante las pruebas experimentales en la zona de estudio, y conseguir que la entrada del flujo a la calle con pendiente variable, tenga un comportamiento uniforme.

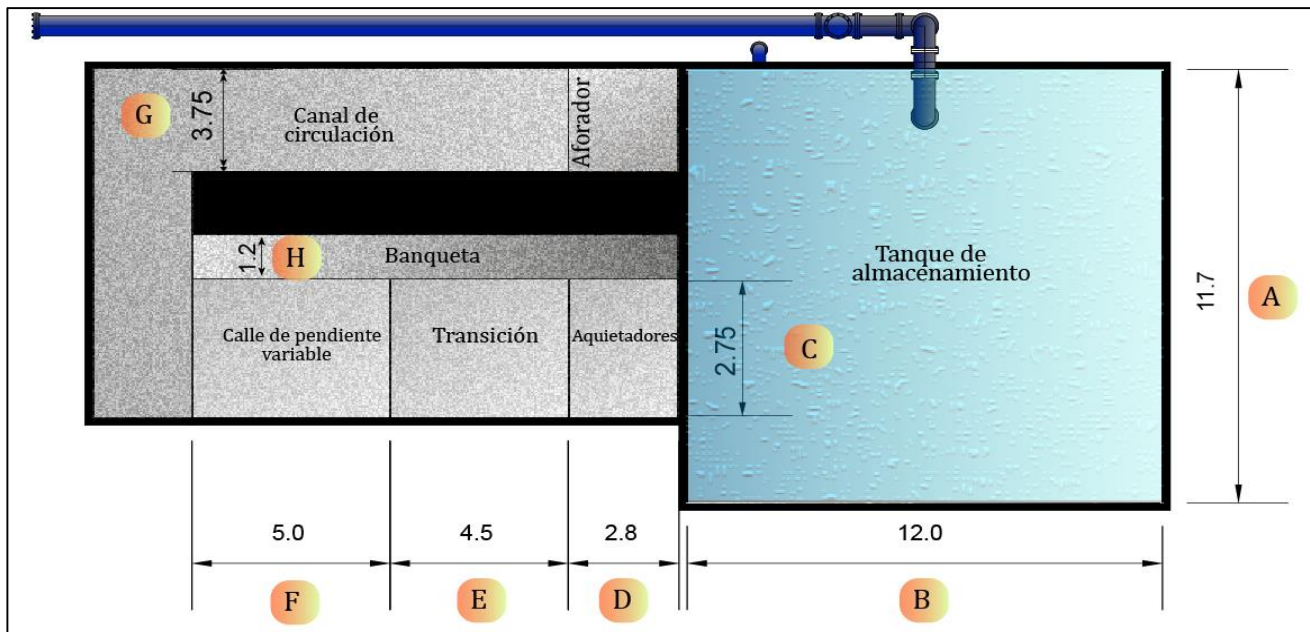


Figura 4-73 Módulo físico experimental propuesto en planta
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4-8 Dimensiones del módulo experimental

ID	Características	Longitud (m)
A	Ancho del tanque de almacenamiento	11.70
B	Largo del tanque de almacenamiento	12.00
C	Ancho de la zona de aquietadores	2.75
	Ancho de transición	2.75
	Ancho de calle de pendiente variable	2.75
D	Longitud de la zona de aquietadores	2.80
E	Longitud de transición	4.50
F	Longitud de la calle de pendiente variable	5.00
G	Ancho de canal de circulación	3.75
H	Ancho de banqueta	1.20
	Altura del tanque de almacenamiento	2.00

4.4 Construcción de módulo físico experimental

El módulo fue construido en las instalaciones del IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua); debido al espacio requerido, no se pudo realizar su construcción dentro del laboratorio de Hidráulica Enzo Levi, situando el módulo a un costado de este laboratorio.

Con la disponibilidad del terreno y espacio suficiente se realizaron trabajos de nivelación y compactado del suelo. La ventaja de este espacio fue la existencia de una tubería que podrá abastecer al tanque de almacenamiento, a partir de la operación de las bombas situadas dentro del laboratorio de Hidráulica. (Ver Figura 4-74).



Figura 4-74 Nivelación y compactación del terreno

Los trabajos de construcción continuaron con un firme de mampostería y armado de varilla, así como la colocación de cimbra para las paredes del tanque de almacenamiento. (Ver Figura 4-75).



Figura 4-75 Armado de varilla sobre firme de mampostería

Se realizó el detalle de mampostería y armado de varilla para dar lugar a la compuerta, se anclaron polines de madera para contener presiones que serán generadas por el concreto al momento de colar los muros del tanque de almacenamiento. (Ver Figura 4-76 a Figura 4-80).



Figura 4-76 Detalle en armado de compuerta



Figura 4-77 Cimbrado final del tanque de almacenamiento



Figura 4-78 Firme de concreto para dar estabilidad a la calle de pendiente variable



Figura 4-79 Colado del tanque de almacenamiento con ayuda de pluma para vaciado de concreto



Figura 4-80 Construcción de muros de block y tabique recocado

Posteriormente de haber descimbrado y curado el tanque de almacenamiento, se realizaron trabajos de colocación de estructura metálica para dar soporte a la zona de transición de descarga de la compuerta. Así como también se colocó la estructura para dar pendiente variable a la zona de estudio. (Ver Figura 4-81 a Figura 4-85).



Figura 4-81 Armado y colocación de estructura metálica



Figura 4-82 Trabajos de soldadura en estructura metálica



Figura 4-83 Colocación de acrílico en las paredes del módulo y maquinaria de compuerta



Figura 4-84 Compuerta y tubería de llenado del tanque de almacenamiento



Figura 4-85 Elementos en el interior del tanque de almacenamiento

4.5 Prueba de hermeticidad del módulo

Para verificar que no se presenten fugas en el módulo, se realizó un llenado del tanque de almacenamiento a su máxima capacidad, se mantuvo lleno el tanque durante 30 minutos y se inspeccionó sin encontrar alguna filtración en las paredes. Se observaron pequeñas filtraciones en la compuerta debido a la presión que ejerce el agua sobre ella. (Ver Figura 4-86 y Figura 4-87).



Figura 4-86 Primer llenado de tanque de almacenamiento



Figura 4-87 Filtración en la compuerta durante inspección de hermeticidad

Para verificar que las paredes de acrílico y la estructura en general no presentaran fallas y/o fugas, se accionó la compuerta del tanque de almacenamiento con una abertura máxima de 0.50 m. A pesar de haber hecho la prueba sin pendiente en la estructura, a simple vista las velocidades que se alcanzaron fueron muy altas. No se realizaron mediciones de ningún tipo, ya que solo se requería observar el comportamiento del primer evento en el módulo. (Ver Figura 4-88 y Figura 4-89).



Figura 4-88 Comportamiento del flujo en el módulo experimental



Figura 4-89 Velocidades altas y desbordamiento a la salida del módulo

4.6 Estructuras de seguridad

Se implementó una estructura como guía para la acción de caminar sobre la calle de pendiente variable, el principal objetivo de esta estructura es sujetar una línea de vida con amortiguador a un cable de acero, y dar protección al individuo que está realizando el experimento, en caso de presentarse una caída debido a fuerza que ejerce el agua. La línea de vida estará sujeta en todo momento a un arnés de seguridad de tres argollas en espalda y costados. (Ver Figura 4-90 a Figura 4-93).



Figura 4-90 Vista de estructura metálica de seguridad



Figura 4-91 Cable de acero sujeto a estructura metálica



Figura 4-92 Cable de acero en posición longitudinal a la calle con pendiente variable



Figura 4-93 Escalera de acceso al área de experimentación

4.7 Equipo de seguridad

La seguridad es una de las prioridades en los experimentos de inestabilidad por inundación en zonas urbanas, para ello se consideraron las medidas pertinentes, equipos y estructuras de seguridad (ver Figura 4-94). Como medidas para las pruebas en el módulo, se cuenta con lo siguiente:

- Impermeable de alta visibilidad.
- Arnés con 3 anillos en espalda y costados.
- Cable de vida banda plana amortiguador.
- Botas industriales con suela antiderrapante.
- Casco de seguridad con ajuste de matraca.



Figura 4-94 Equipo de seguridad utilizado en pruebas de estabilidad de personas

4.8 Pruebas piloto

Dentro de las primeras pruebas demostrativas y de revisión de seguridad, se implementaron dos eventos para definir el número de personas que participaran en las pruebas experimentales definitivas. Se integrara personal de operación de compuerta, medición de velocidad y tirante, medición de gasto, personal para documentar eventos con registro de datos, fotografía y video; operador de equipos de bombeo y participantes en las pruebas de inestabilidad. (Ver Figura 4-95 y Figura 4-96).



Figura 4-95 Primer prueba para revisión de equipo de seguridad en módulo físico experimental



Figura 4-96 Simulacro para definir el número de participantes en las pruebas experimentales

Las velocidades que se generan en el módulo, alcanzan los 2 m/s, e inclusive superiores, sin necesidad de incluir alguna pendiente en la calle. Debido a ello, se colocaron reductores de energía para disminuir las velocidades a la salida de la compuerta del tanque de almacenamiento (zona de transición). (Ver Figura 4-97).



Figura 4-97 Elementos disipadores de energía

Se realizó la aplicación de asfalto para implementar rugosidad sobre la calle de pendiente variable para el primer bloque de pruebas. (Ver Figura 4-98).



Figura 4-98 Superficie de asfalto en calle con pendiente variable

4.9 Equipos de medición

Para la medición de variables de tirante y velocidad; se emplearan los siguientes instrumentos:

- **Piezómetros:**

La colocación de 5 piezómetros de manera longitudinal a través de la calle con pendiente variable, con la finalidad de medir tirantes simultáneamente durante los ensayos realizados. Ver Figura 4-99:



Figura 4-99 Piezómetros y empleo para la medición de tirantes simultáneos

- **FlowTracker**

Con este instrumento se puede obtener datos de velocidad mediante sensores acústicos, montado en un soporte y varilla vertical (Figura 4-100). Las direcciones de medición de los instrumentos puede ser en los ejes coordenados X, Y o X, Y y Z; según el modelo del equipo empleado.

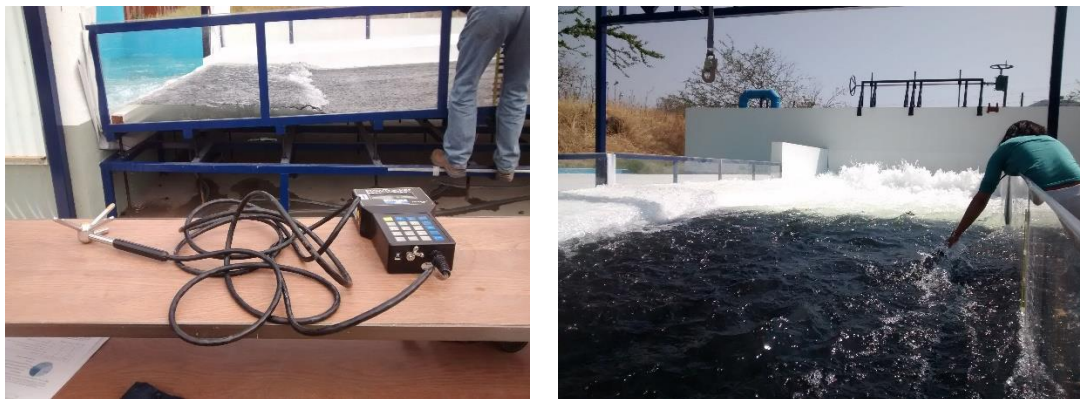


Figura 4-100 FlowTracker y empleo para medición de variables de velocidad

- **Vertedor:**

Se tiene instalado un vertedor rectangular de pared delgada, para la medición de gastos. Figura 4-101:



Figura 4-101 Vertedor rectangular de pared delgada, situado al final del canal de circulación

4.10 Consideraciones experimentales

Para obtener parámetros de peligro por inundación, se emplearan criterios de estabilidad, con las siguientes consideraciones que pudieran presentarse en los ensayos realizados. Tabla 4-9:

Tabla 4-9 Niveles de peligro por inundación propuestos

Nivel de peligro	Consideraciones
Alto	Durante los experimentos realizados, la persona perdió la estabilidad completamente al realizar la acción de cruzar la calle.
Medio	Esta consideración aplicará cuando la persona en estudio tenga una notoria dificultad de estabilidad, un avance lento, detenerse inusualmente, completando los experimentos con un notorio esfuerzo.
Bajo	Para esta consideración experimental, el individuo no presenta grandes esfuerzos durante las actividades, la estabilidad no se ve comprometida durante el proceso.

4.11 Consideraciones físicas promedio de habitantes en la República Mexicana

Se realizó una búsqueda para obtener las estaturas promedios de hombres y mujeres en la República Mexicana. La información se encuentra disponible en un estudio que realizó la Cámara Nacional de la Industria del Vestido (CANAVE), el cual lleva por nombre “¿Cuánto mide México? El tamaño sí importa”; con datos tomados a 17 mil 364 personas con grupos de edades a partir de los 18 años.

México es el primer País de Latinoamérica en realizar el estudio de las dimensiones antropométricas promedio de su población, a través de la toma de medidas del cuerpo entre una muestra validada estadísticamente por el INEGI.

Zonas de estudio:

- Zona Norte: Monterrey, Chihuahua y Tijuana
- Zona Centro: DF, Puebla y Toluca
- Sureste: Mérida, Veracruz, Acapulco, Tuxtla Gutiérrez y Cancún (Sureste)
- Bajío: Guadalajara, León y San Luis Potosí

En total, se aplicaron a una muestra de 17 mil 364 personas, 51% de mujeres y 49% de hombres,

Tabla 10 Rango de pesos y estaturas promedio de habitantes en México

Género	Rango promedio de peso(kg)	Rango promedio de estatura (m)
Femenino	1.55 - 1.62	67.35 - 72.62
Masculino	1.60 - 1.72	72.37 - 86.1

5 RESULTADOS

5.1 Descripción de las pruebas de estabilidad al vuelco

Se realizaron pruebas por un periodo de aproximadamente 4 meses, con un total de 14 participantes de los cuales 5 eran mujeres y 8 hombres. Se registraron sus pesos y estaturas de cada participante; lo registros preliminares de cada individuo se muestran en la Tabla 5-1:

Tabla 5-1 Datos físicos de personas participantes en pruebas de estabilidad al vuelco

Peatón	Masculino	Femenino	Peso	Altura
1	✓		56.9	1.70
2	✓		62.2	1.65
3	✓		57.8	1.76
4		✓	51.0	1.43
5		✓	72.0	1.56
6	✓		72.6	1.65
7		✓	59.0	1.54
8	✓		73.0	1.63
9	✓		94.1	1.84
10	✓		99.5	1.72
11	✓		60.0	1.68
12		✓	75.0	1.53
13	✓		92.1	1.73
14		✓	52.0	1.55

5.1.1 Criterios a considerar durante las pruebas experimentales

Para la obtención de parámetros de peligro, el individuo dictaminaba el grado de peligro al que se había sentido expuesto, y generalmente fue de la siguiente manera:

- Peligro bajo: el individuo no presentó ningún problema en realizar la prueba de estabilidad.
- Peligro medio: el individuo presento ligeros problemas, caminaba con precaución y con menor velocidad a la que habitualmente se desplaza, pero completando la prueba de estabilidad satisfactoriamente.
- Peligro alto: el individuo presentó una caída generalmente a los pocos segundos del inicio de la prueba de estabilidad.

Con cada individuo se realizaron diversas pruebas, ocupando variantes de carga en el tanque de almacenamiento y regulando un gasto de salida mediante el engranaje de la compuerta.

5.1.2 Medición de parámetros – Tirantes y Velocidades

Como primera instancia se realizaron mediciones preliminares de tirantes y velocidades obtenidas para diferentes aberturas de la compuerta, donde también se hacía variar la carga del tanque para cada abertura; para estos registros, no se utilizaron sujetos de prueba. Los tirantes alcanzaron 1.5 hasta 25.5 cm de altura y velocidades fueron de 1.57 hasta 2.5 m/s; con cargas en el tanque de 0.57 hasta 2.0 m. Posteriormente estas aberturas registradas se utilizaban para realizar las pruebas definitivas (con personas); y realizando mediciones pertinentes durante cada prueba, a manera de registrar datos exactos, ya que podrían variar con los registrados en las mediciones preliminares.

Para la obtención de valores de tirantes y velocidades, se realizó la medición durante cada prueba vinculando el nivel de peligro valorado por cada individuo, en conjunto con los registros en las mediciones. Los tirantes fueron registrados con reglas graduadas y piezómetros al inicio, durante y al final de cada prueba, generando posteriormente un promedio del resultado; de manera simultánea se medía la velocidad utilizando un Flowtracker y realizando tres registros para cada prueba, se realizó el mismo procedimiento de igual manera con las mediciones de los tirantes.

Los ensayos se realizaron por cada individuo con distintas cargas en el tanque y aberturas de la compuerta, con la finalidad de obtener diversos tirantes y velocidades. Con los criterios de peligro definidos con anterioridad, se representan los resultados en una gráfica de dispersión y se definen puntos (pruebas), para establecer fronteras en los límites de peligro bajo, medio o alto. Algunas experiencias de las pruebas se muestran en la Figura 5-1 a la Figura 5-5:



Figura 5-1 Prueba de estabilidad al vuelco (1)



Figura 5-2 Prueba de estabilidad al vuelco (2)

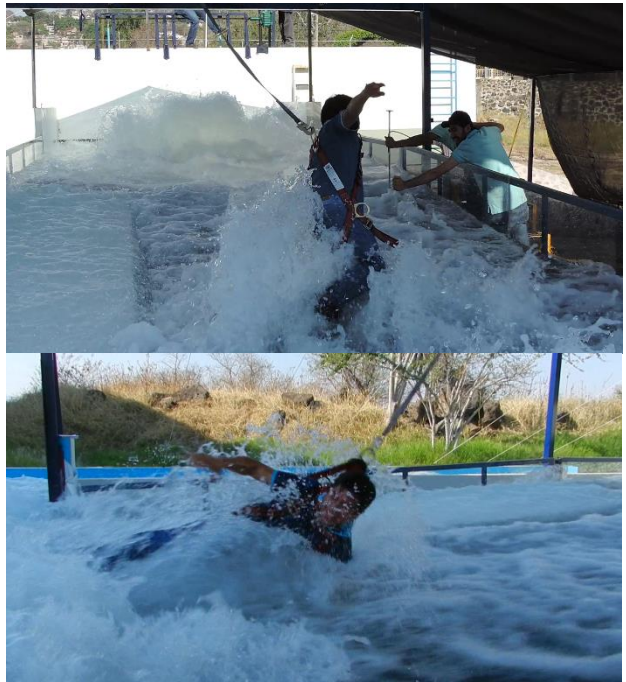


Figura 5-3 Prueba de estabilidad al vuelco (3)



Figura 5-4 Prueba de estabilidad al vuelco (4)



Figura 5-5 Prueba de estabilidad al vuelco (5)

5.2 Descripción de generación de nomogramas

Con las mediciones obtenidas en las pruebas de estabilidad (tirantes y velocidades), se determinó realizar nomogramas de peligro para personas; estos nomogramas se dividen en dos:

- Nomogramas de peligro para mujeres
- Nomogramas de peligro para hombres

Las condiciones a las que fueron expuestos los individuos durante las pruebas fueron las mismas, esto con el fin de obtener valores bajo las mismas circunstancias. Los valores registrados se vincularon con el nivel de peligro considerado por cada individuo, separando los tres niveles de peligro. Se generalizaron en un plano X, Y como valores puntuales.

Se analizaron los datos obtenidos al final de la jornada de pruebas de estabilidad, posteriormente se vinculaban los tirantes y velocidades registrados con la carga existente en el tanque a manera de verificar las pruebas con las mediciones preliminares realizadas en un principio; esto con el fin de obtener coherencia en los registros finales; todos los registros de parámetros fueron considerados. Al final de las pruebas de estabilidad en personas, se obtuvo una dispersión de puntos que representan cada uno de los ensayos para diferentes personas en cuanto a su edad, peso y estatura. (Ver Figura 5-6 y Figura 5-7).

La dispersión de puntos se vinculó con el nivel de peligro considerado por el sujeto de prueba; es decir; durante los ensayos el sujeto justificaba el peligro al cual se sintió expuesto. Finalmente se representan los puntos en graficas que contienen parámetros de velocidad y tirante:

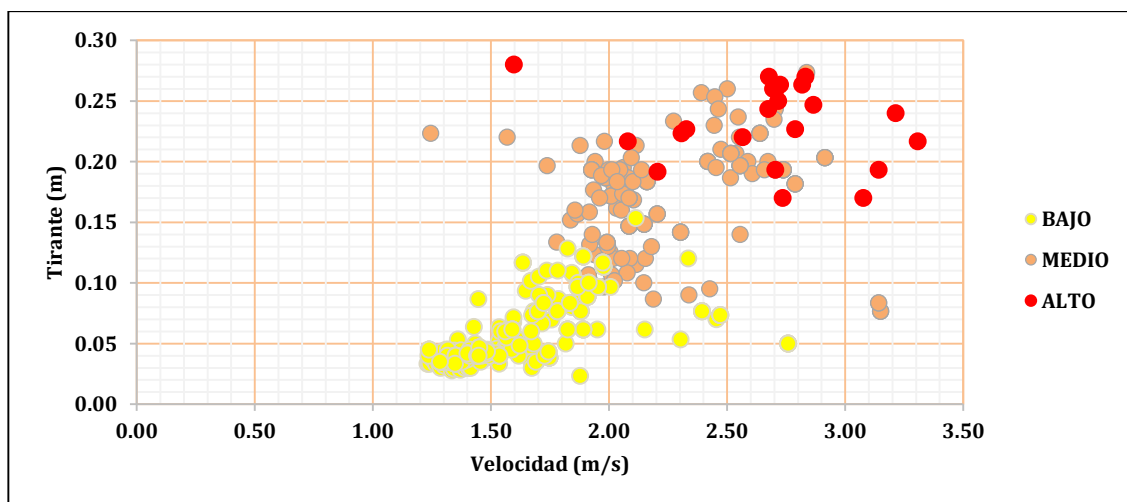


Figura 5-6 Dispersión de puntos - pruebas de estabilidad (Hombres)

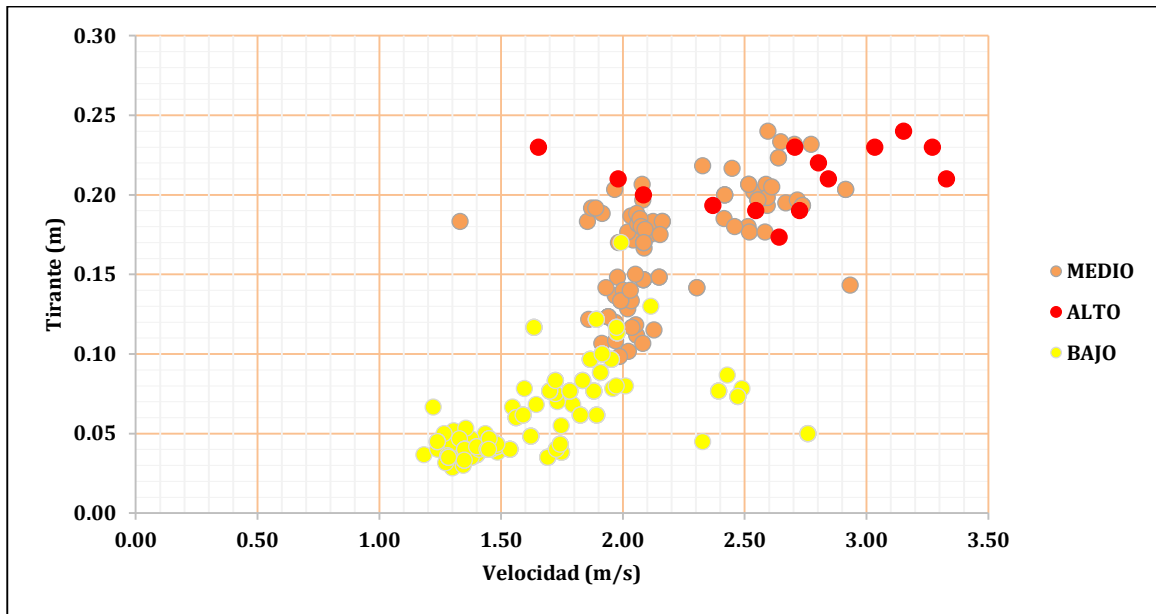


Figura 5-7 Dispersión de puntos - pruebas de estabilidad (Mujeres)

5.2.1 Nomogramas propuestos

Posteriormente se realizó una envolvente para los puntos, considerando los niveles de peligro bajo, medio y alto. Con ello se obtienen los polígonos que conforman los nomogramas de peligro por inundación para personas, como primer resultado para esta tesis. Los polígonos resultantes, se generaron a partir de una dispersión de puntos en donde la envolvente va para cada nivel de peligro observado en el plano, el objetivo de este punto, es conocer las fronteras entre cada nivel de peligro. En la Figura 5-8 y Figura 5-9 se observan los nomogramas generados para mujeres y hombres.

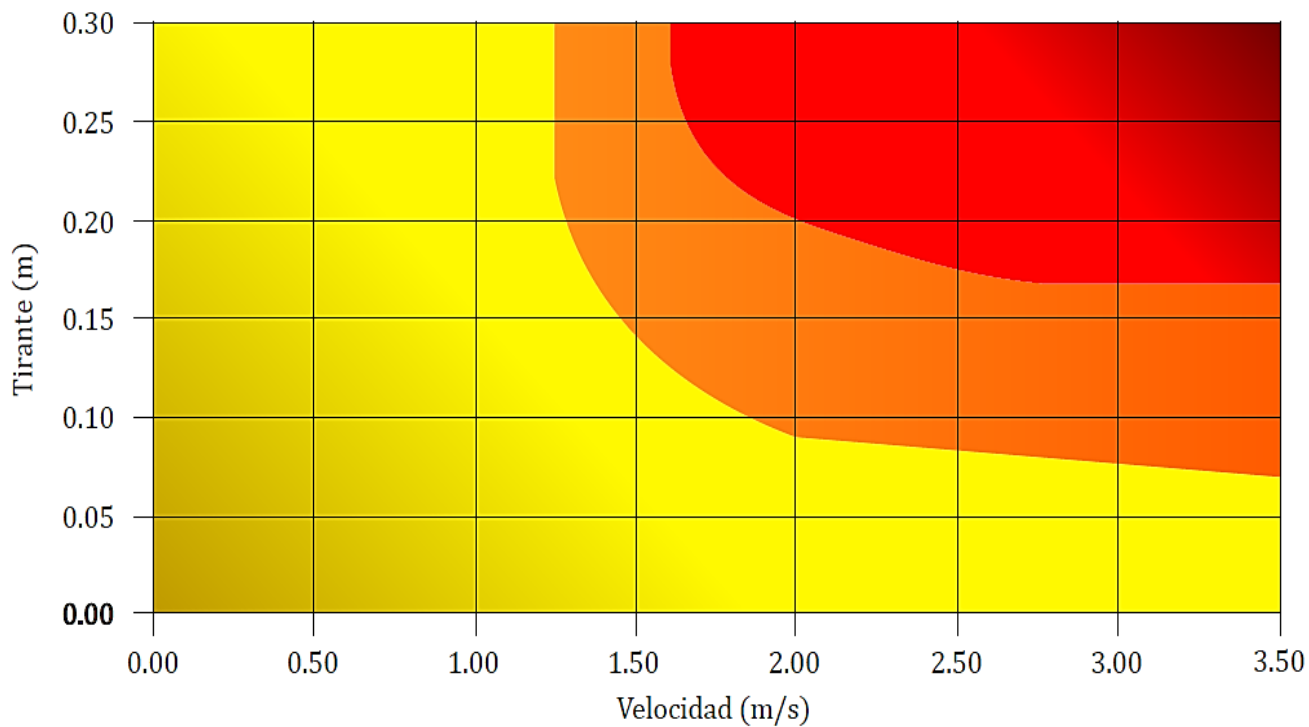


Figura 5-8 Nomograma propuesto para Hombres

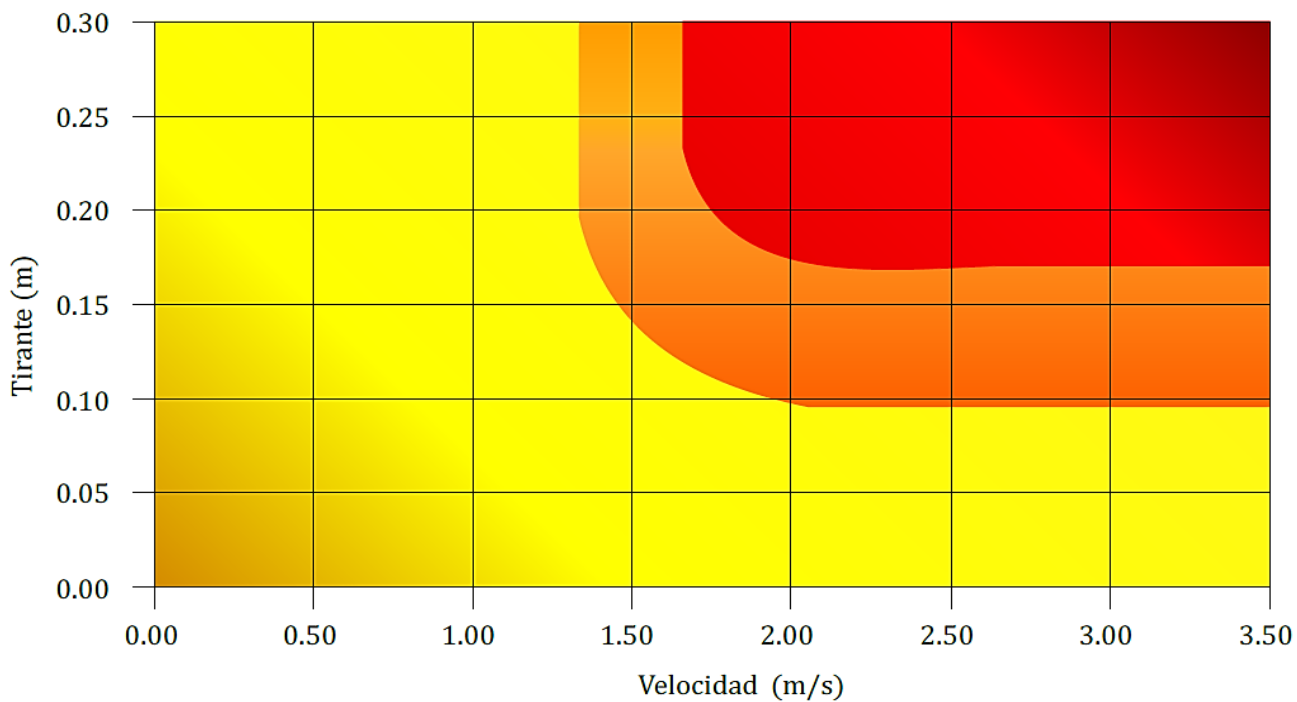


Figura 5-9 Nomograma propuesto para Mujeres

5.3 Metodología para la generación de modelo de simulación de escurrimiento urbano

Generalmente el peligro por inundación se genera por ejemplo, a causa del desbordamiento de un río a consecuencia de intensas lluvias, falta de drenaje pluvial, asentamientos urbanos en zonas bajas propensas a encharcamientos; etcétera, por tanto la cuenca de estudio deberá ser analizada con el mayor detalle. Los modelos que se utilizan para determinar los escurrimientos a partir de una precipitación y validar parámetros tirante – velocidad, están basados en las relaciones lluvia-escurrimiento en zonas urbanas. Estos estudios se dividen en el análisis hidrológico, información física de la zona de estudio y la modelación bidimensional del escurrimiento en zonas urbanas.

I. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico se determina a partir de una precipitación obtenida que pertenece a la cuenca de estudio. Está precipitación puede ser de gran intensidad lo que provoca inundaciones constantes en el transcurso del escurrimiento hacia los colectores y/o ríos o en su caso generar encharcamientos considerables. Las precipitaciones se vinculan al período de retorno que se desee estudiar.

II. Información física de la zona de estudio

Para caracterizar la cuenca de manera específica y con el mayor detalle posible, se debe emplear un MDE para conocer la configuración del terreno, la planimetría que actuara como obstrucciones del flujo en la superficie, determinar las subcuencas y microcuencas en la zona de estudio y considerar las obras de drenaje pluvial existente y sus generalidades.

III. Características geomorfológicas de la cuenca

Se refiere a las características físicas de una cuenca. Se deben determinar sus parámetros físicos como la pendiente de la cuenca, el ancho, el área, perímetro, longitud y pendiente del cauce principal, porcentaje de área permeable e impermeable; que son parámetros de entrada para generar con detalle el modelo de simulación de escurrimiento.

IV. Modelo de simulación de escurrimiento

La construcción metodológica se establecerá mediante los tres puntos anteriormente mencionados: análisis de hidrología, análisis de información física de la zona y los parámetros geomorfológicos de la región, todo lo anterior se conjuntará y analizará en un modelo bidimensional, que permita obtener en una retícula definida, tirantes y velocidades para cada escenario. Para el análisis hidráulico, el modelo bidimensional considera las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones (Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{ox} - S_{fx}) + S_{t1} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{oy} - S_{fy}) + S_{t2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde h es el tirante, u y v son los componentes del vector velocidad en las direcciones x y y respectivamente, en cada punto del plano horizontal, g es la aceleración de la gravedad, C refleja el efecto de la fuerza de coriolis τ_{sx} y τ_{sy} están asociados con el efecto del viento en la superficie del fluido. Los términos S_{ox} y S_{oy} miden la pendiente del terreno en las direcciones x y y respectivamente, siendo z una función que describe el fondo o terreno. S_{fx} y S_{fy} Refleja el efecto de fricción del fluido con el terreno y S_{t1} y S_{t2} representan los flujos turbulentos del fluido.

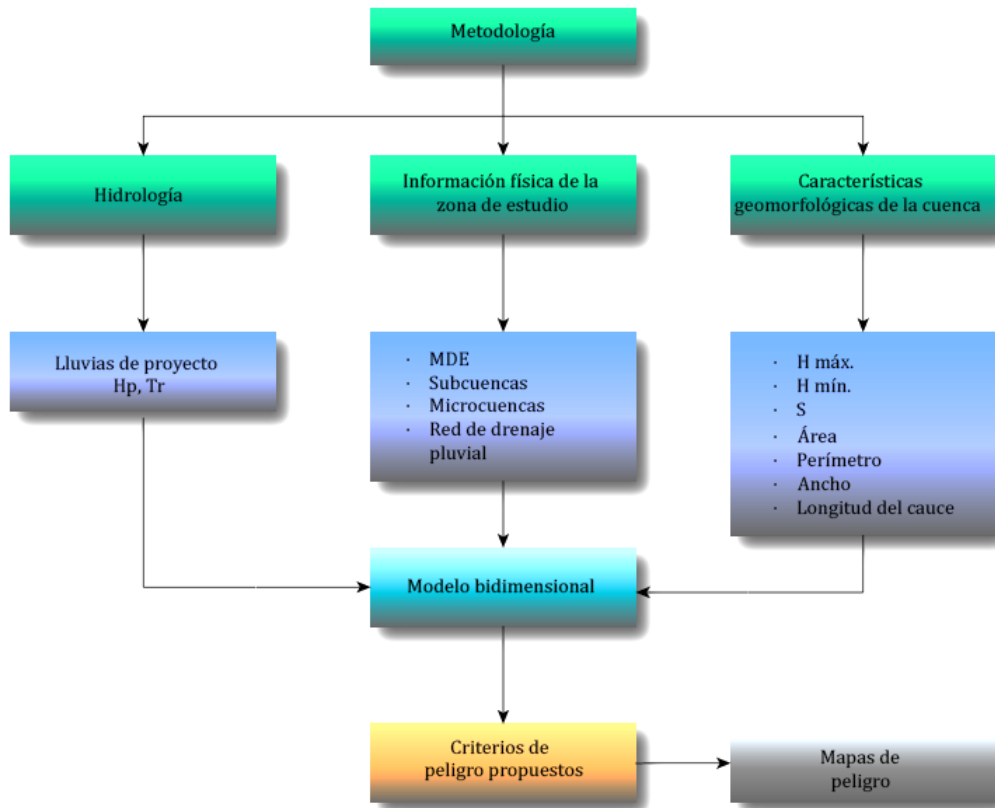


Figura 5-10 Metodología propuesta para la generación de mapas de peligro por inundación

5.4 Generación de modelo para la simulación de inundaciones urbanas en Chetumal

A partir del proyecto realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y La Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), denominado “*PROGRAMA PARA EL MANEJO DEL AGUA PLUVIAL DE LA CIUDAD DE CHETUMAL, QUINTANA ROO*”; donde se presentan 124 puntos de inundación y encharcamiento, se desarrollaron simulaciones con ayuda de un modelo hidráulico con el objetivo de identificar niveles de riesgo por inundaciones y mitigar daños en las zonas detectadas mediante propuestas de solución a inundaciones.

La ciudad de Chetumal (Figura 5-11), capital del estado de Quintana Roo, sufre de periódicas inundaciones debidas a las intensas lluvias que se presentan en la región (Figura 5-12). La Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) comisionó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) un plan integral del manejo de las aguas pluviales en Chetumal (*Rodríguez et al., 2012*).



Figura 5-11 Zona de estudio en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo,

Rodríguez et al. (2012) generaron mapas de peligro para la ciudad de Chetumal por medio de la integración de los siguientes componentes en un modelo de simulación de inundaciones:

- (i) Información de la infraestructura pluvial;
- (ii) Análisis hidrológico en base a la información recopilada de las estaciones climatológicas en la zona de estudio;
- (iii) Análisis hidrográfico en base a los usos de suelo y coeficientes de escurrimiento;
- (iv) Modelo digital de elevaciones de la ciudad; y
- (v) Modelo de simulación de la red de alcantarillado pluvial.

Rodríguez et al. (2012) crearon un modelo bidimensional del flujo en calles de Chetumal usando el programa de cómputo FLO-2D. El modelo usa una malla regular para discretizar la superficie del terreno e incorpora la información topográfica correspondiente al modelo digital de elevaciones. Los gastos de descarga en las celdas del modelo bidimensional fueron calculados por medio del modelo de colectores pluviales generado con el uso del programa de cómputo SWMM (Modelo para el Manejo de Tormentas de la Agencia para la protección del medio ambiente de los Estados Unidos).

Los mapas de peligro obtenidos para la zona urbana de Chetumal con un periodo de retorno (TR) de 2, 10 y 25 años. (Figura 5-12).

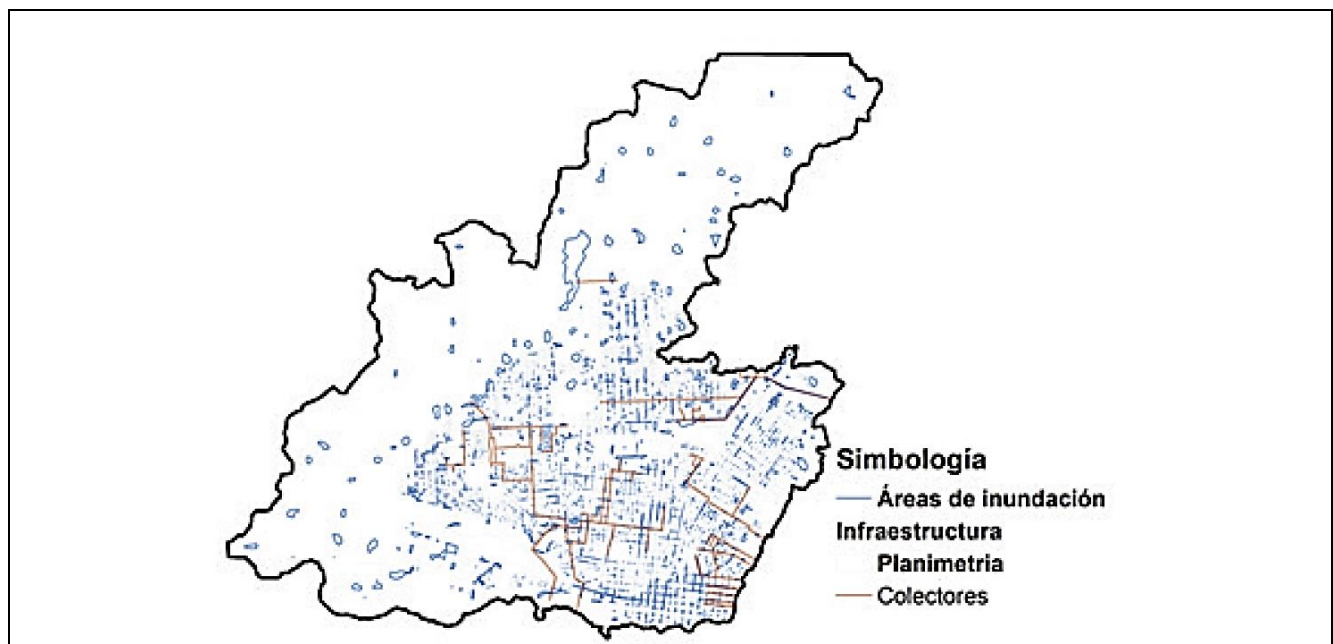


Figura 5-12 Zonas planas en la ciudad de Chetumal inundadas por drenaje natural lento

5.4.1 Modelación Hidráulica para la obtención de tirantes y velocidades en la zona de estudio

5.4.1.1 Modelo FLO – 2D herramienta de predicción y evaluación

Como se mencionó anteriormente, *Rodríguez et al. (2012)*, realizaron un modelo bidimensional con la finalidad de representar el comportamiento hidráulico e hidrológico en la zona de estudio de Chetumal, el cual mediante datos de entrada realiza simulaciones resolviendo complejas ecuaciones a través de métodos matemáticos. Los resultados que arroja el programa de simulación FLO-2D son las profundidades de flujo y velocidades, entre otras variables.

El modelo de simulación FLO-2D es una herramienta computacional de diferencias finitas, aprobado por la *FEMA (Federal Emergency Management Agency, USA)*; que simula escurrimientos superficiales donde se pueden visualizar zonas de inundación, velocidades y profundidades de flujo así como de sedimentación, y obtener fuerzas de impacto sobre estructuras.

El flujo que simula el programa es en dos dimensiones y en 8 direcciones, simula flujo de agua, lodos y transporte de sedimentos. Realiza cálculos de tránsito en canales de distintas geometrías; simulaciones de intercambio de flujo entre canales y llanuras de inundación considerando precipitación, infiltración y evaporación. Permite considerar componentes urbanas como calles, edificaciones; e hidráulicas como puentes, alcantarillas y diques.

Los datos de entrada que requiere el programa FLO-2D son:

- Malla digital: que representa el modelo digital de elevaciones del terreno (MDE).
- Caracterización de calles y componentes hidráulicos.
- Coeficientes de rugosidad.
- Hidrogramas de entrada.
- Edificaciones y obstrucciones del flujo.

5.4.2 Variación de velocidades y tirantes y generación de malla

El modelo de simulación hidráulica utilizado es un modelo bidimensional, es decir si se encuentra en un plano de referencia x, y ; el agua se pueda desplazar en ambos ejes en el tiempo, este desplazamiento se obtiene a partir de la solución numérica de las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant por el método de diferencias finitas por medio de una malla de cálculo, ver Figura 5-13

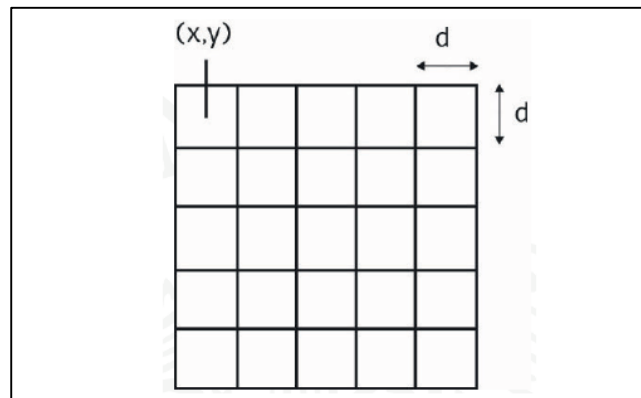


Figura 5-13 Malla de cálculo rectangular (Fuente: Estudio Geohidrológico en El Acuífero De Chetumal, Quintana Roo)

El objetivo de la malla es puntualizar resultados dentro de cada cuadrícula, es decir, obtener valores para cada celda de la malla construida, como puede ser velocidades y tirantes que generan los escurrimientos, considerando la simulación de lluvias para diferentes periodos de retorno.

Para generar un mallado (Figura 5-14), se toma una ponderación de las elevaciones de acuerdo con tamaño de la retícula, este valor permite analizar el sentido del flujo, la velocidad y nivel del agua para cada intervalo de análisis. Además se pueden trazar diferentes tipos de mallas

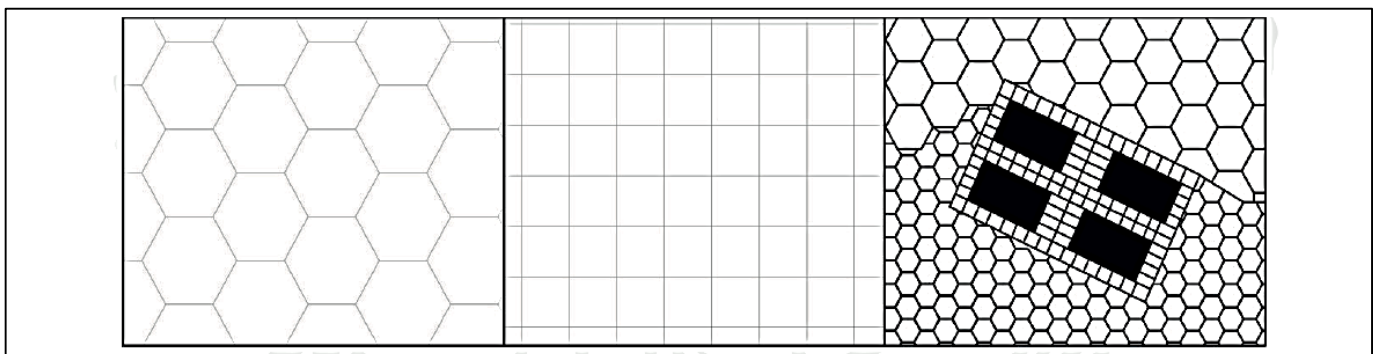


Figura 5-14 Tipos de mallas de cálculo (Fuente: Estudio Geohidrológico en El Acuífero De Chetumal, Quintana Roo)

5.4.2.1 Características de la malla de cálculo

La malla de cálculo para el análisis del escurrimiento del flujo superficial en la Ciudad de Chetumal, tiene dimensiones de 20 X 20 m, los resultados de la simulación, son los de conocer el sentido del flujo y los parámetros de velocidad y tirante que se presentaran en cada celda y variaran de acuerdo a las intensidades utilizadas para los diferentes períodos de retorno establecidos. Los espacios en blanco (vacíos), representan las obstrucciones del flujo, es decir; las manzanas y construcciones en la zona de estudio. (Ver Figura 5-15).

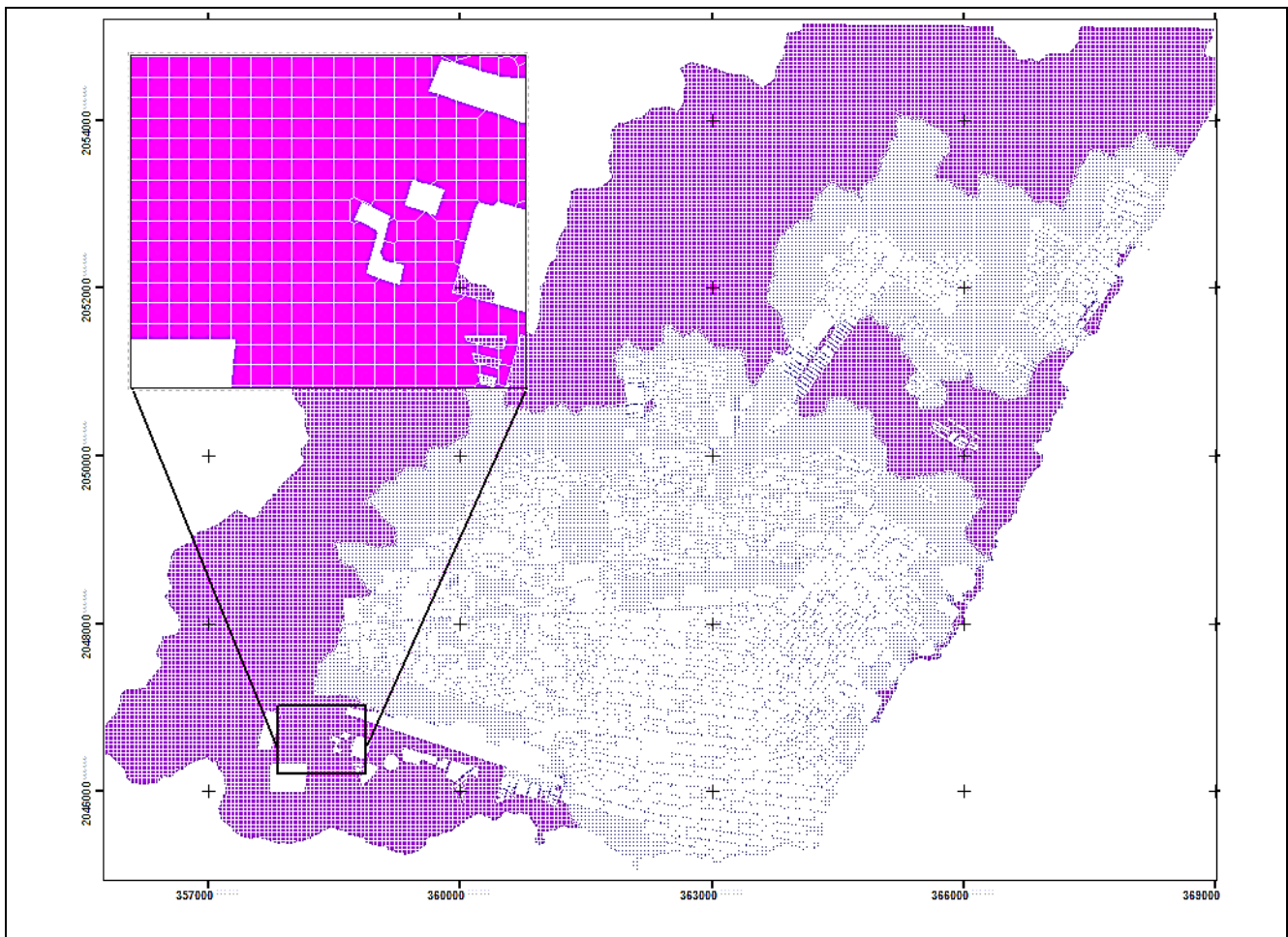


Figura 5-15 Malla de cálculo para el análisis de escurrimiento superficial

5.4.3 Descripción de puntos – datos de tirantes y velocidades

De los resultados obtenidos en la simulación de FLO-2D, se tienen velocidades y tirantes para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Figura 5-16 se presenta una dispersión de puntos que conforman los ejes x, y en el plano, donde los valores de x están vinculados por las velocidades en m/s y los valores de y conforman los tirantes en metros. Estos valores son el resultado de las simulaciones para los diferentes escenarios y lluvias con respecto a los periodos de retorno antes mencionados; es decir; de la malla se extraen los valores de velocidad y tirante, para otorgar propiedades de nivel de peligro en cada uno de los puntos, dependiendo de la zona de peligro (polígono), donde se ubica cada punto; para posteriormente asignar este atributo a los archivos SHP de cada malla y su correspondiente periodo de retorno, y así visualizar las zonas de peligro bajo, medio y alto de la Ciudad de Chetumal.

Cabe mencionar que los puntos que se encuentra fuera de los tres polígonos de peligro, se consideran con valores de nivel de peligro alto, ya que exceden los parámetros de tirante y velocidad máximos.

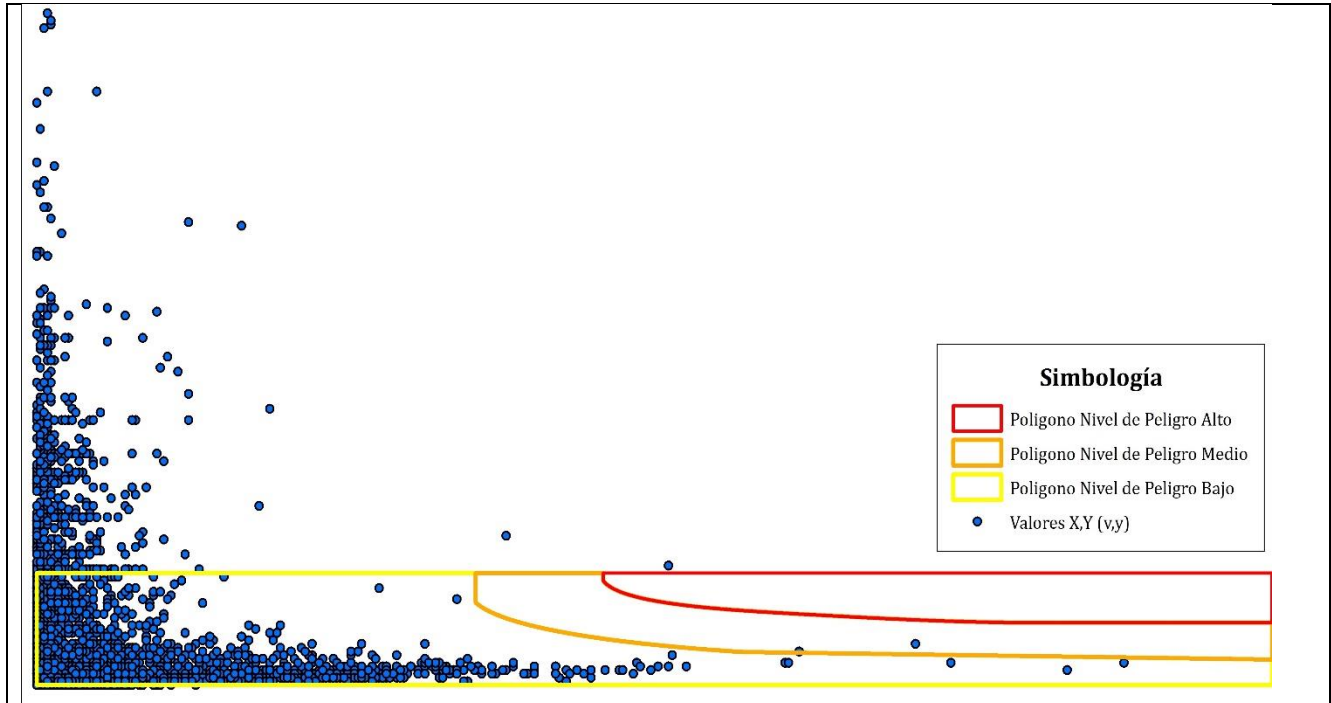


Figura 5-16 Dispersión de puntos x,y (Velocidad y Tirantes)

6 CONCLUSIONES

6.1 Generación de escenarios – Mapas de Peligro

Los mapas son una base cartográfica que permiten representar un conjunto de elementos de un mismo tipo o categoría que presentan una distribución espacial determinada. A lo largo del tiempo estos mapas han proporcionado la información que ha permitido a la población establecerse en diferentes lugares, conociéndose sus límites, propiedades y su entorno. Siendo de gran apoyo a las diferentes ramas de las ciencias. Para la Hidrología urbana; su funcionalidad reside en conocer el escurrimiento en zonas urbanas a causa de las precipitaciones, tomando en cuenta los cambios que han existido en las cuencas urbanas por diferentes factores (cambio de uso de suelo, alteraciones de cauces, aumento de la población, etc.), causando problemas en los sectores económicos, sociales y políticos.

Los mapas de peligro por inundación representan de manera gráfica las magnitudes de una inundación con base a la combinación de parámetros de velocidad y tirante de los escurrimientos sobre las calles de la zona de estudio. Los mapas de peligro se construyeron a partir de una modelación bidimensional y simulaciones de flujo sobre las calles de la Ciudad de Chetumal, a partir de la malla anteriormente descrita. Se obtuvieron datos necesarios de tirantes y velocidades para vincularlos con los valores medidos en las pruebas de estabilidad al vuelco y poder señalar cuales son las zonas de peligro establecidas, bajo los rangos propuestos en esta tesis.

Las inundaciones son consideradas como eventos de gran impacto y que pueden causar afectaciones a gran escala, debido a las grandes extensiones territoriales que pueden perturbar. Para ello se han realizado diversos estudios con la finalidad de mitigar daños a las estructuras, caminos y como se realizó en esta tesis, el límite de parámetros velocidad y tirante durante una inundación para los cuales una persona puede establecer como un peligro considerable si se llegarán a exceder dichos parámetros permisibles y propuestos en este estudio.

En este capítulo se ejemplifica la zona de estudio de la Ciudad de Chetumal para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años; se muestran las zonas de inundación que pudieran presentarse durante estos eventos. En conclusión se generaron 12 mapas de peligro que se clasifican en 6 periodos de retorno donde se consideró el estudio de hombres y mujeres por separado (Figura 6-1 a Figura 6-12). Los estudios de análisis de peligro por inundación deberían de ser fundamentales para determinar las distribuciones de futuros asentamientos y una adecuada planeación, debido a que se pueden apreciar zonas de inundación considerables. En este caso se pueden observar zonas de peligro referente a la seguridad de las personas, a partir de las cuales se pueden proponer, por ejemplo, la planeación de rutas de evacuación y albergues de manera fundamentada.

En la Figura 6-1 a la Figura 6-12, se representan los mapas de peligro para la Ciudad de Chetumal, considerando el criterio de peligro obtenido en las pruebas realizadas en esta tesis:

6.1.1 Mapas de peligro - Mujeres

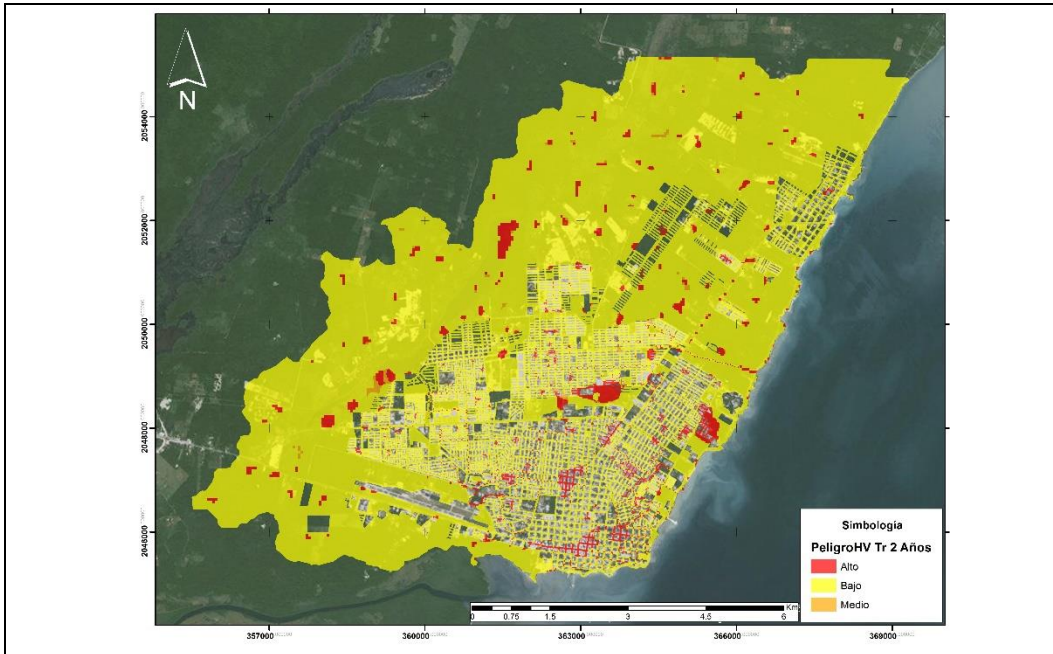


Figura 6-1 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 2 años

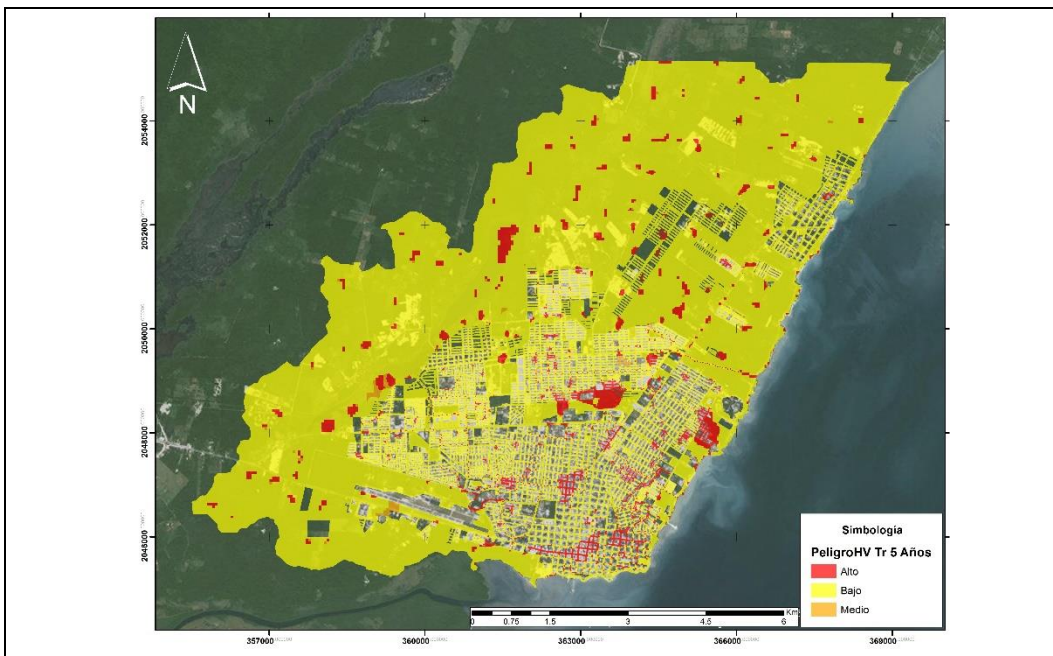


Figura 6-2 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 5 años

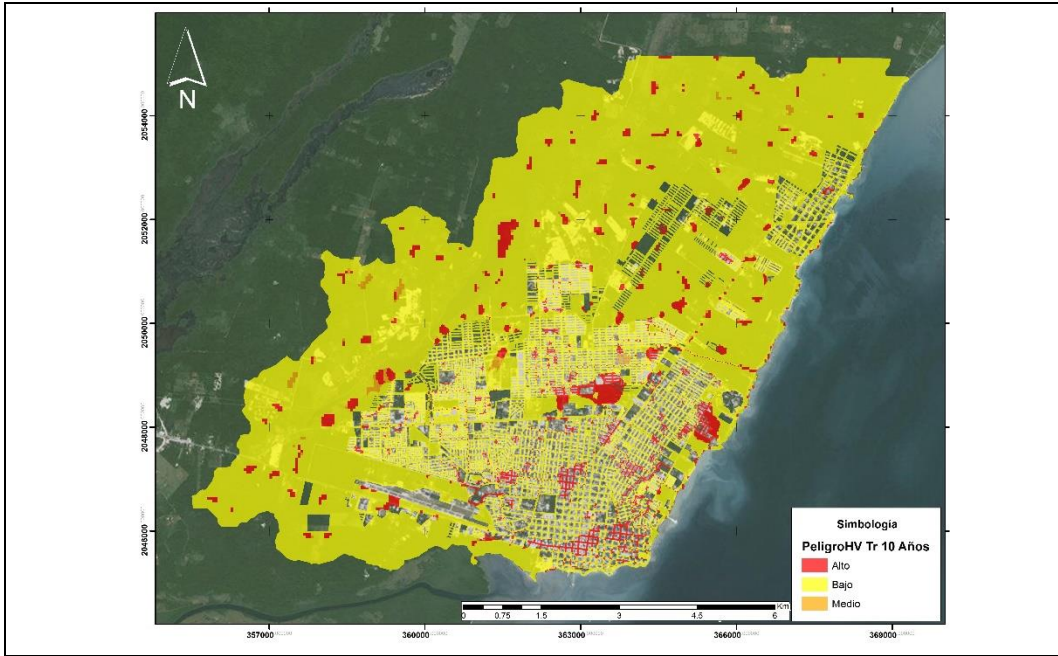


Figura 6-3 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 10 años

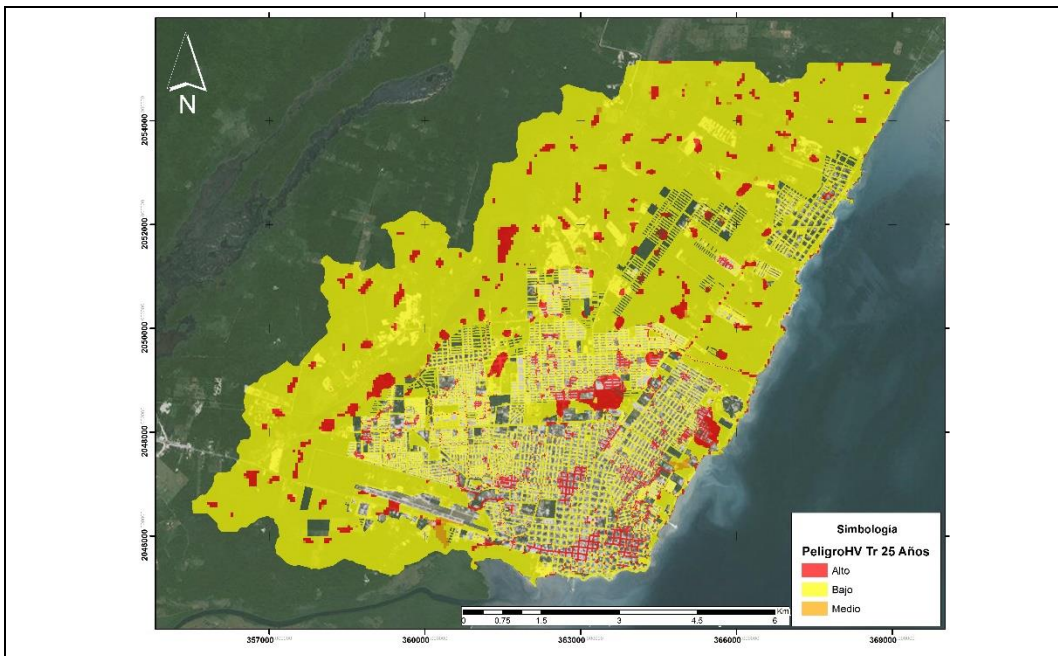


Figura 6-4 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 25 años

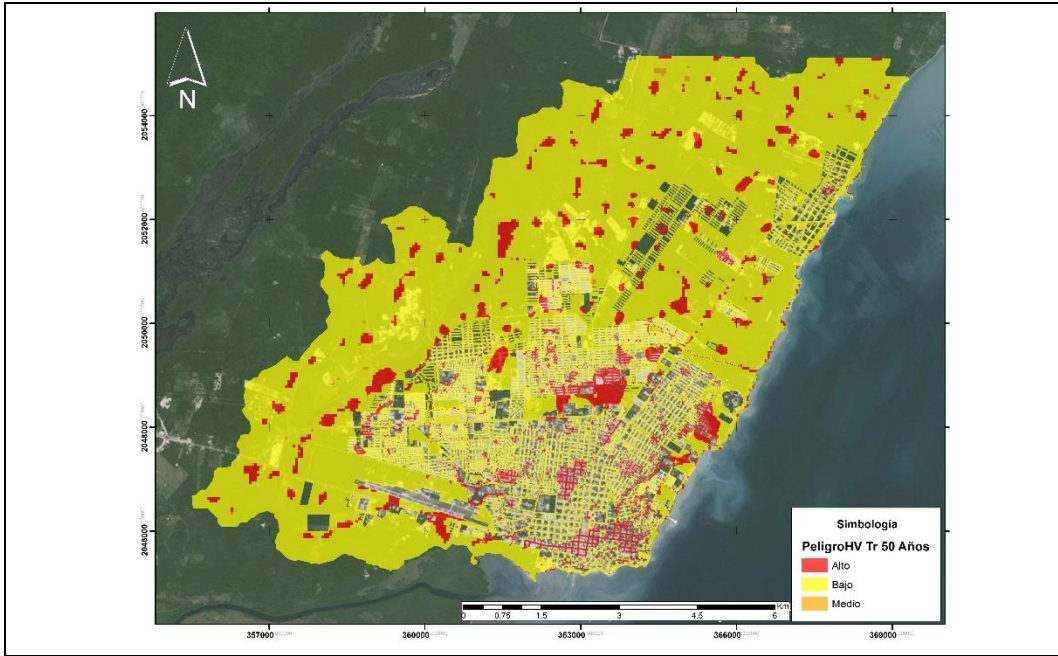


Figura 6-5 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 50 años

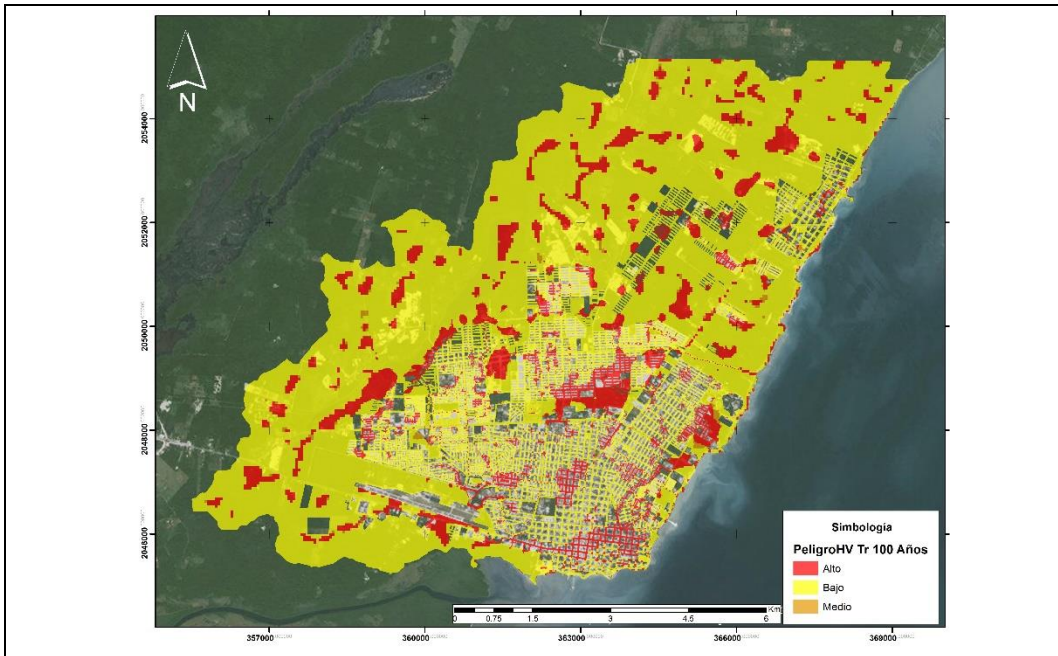


Figura 6-6 Mapa de peligro para mujeres, correspondiente a un Tr de 100 años

6.1.2 Mapas de peligro - Hombres

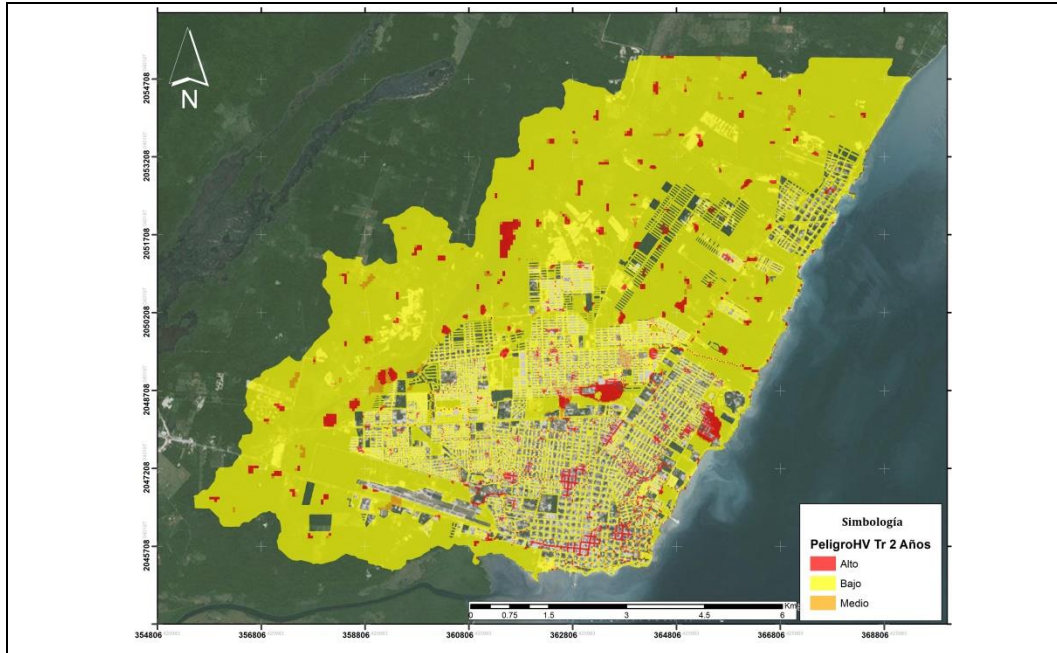


Figura 6-7 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 2 años

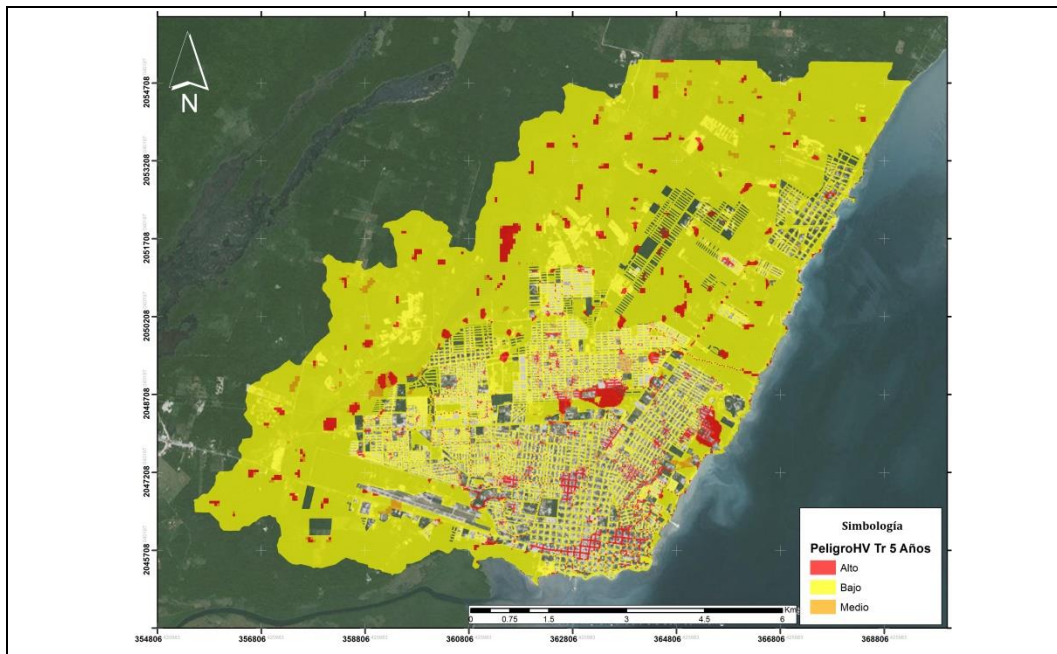


Figura 6-8 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 5 años

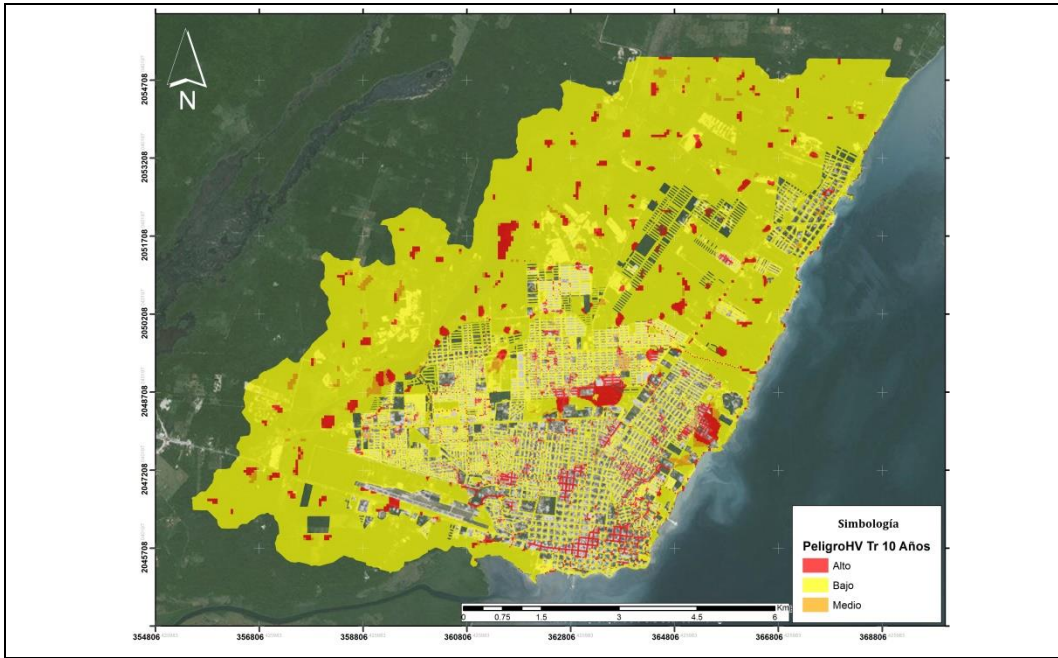


Figura 6-9 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 5 años

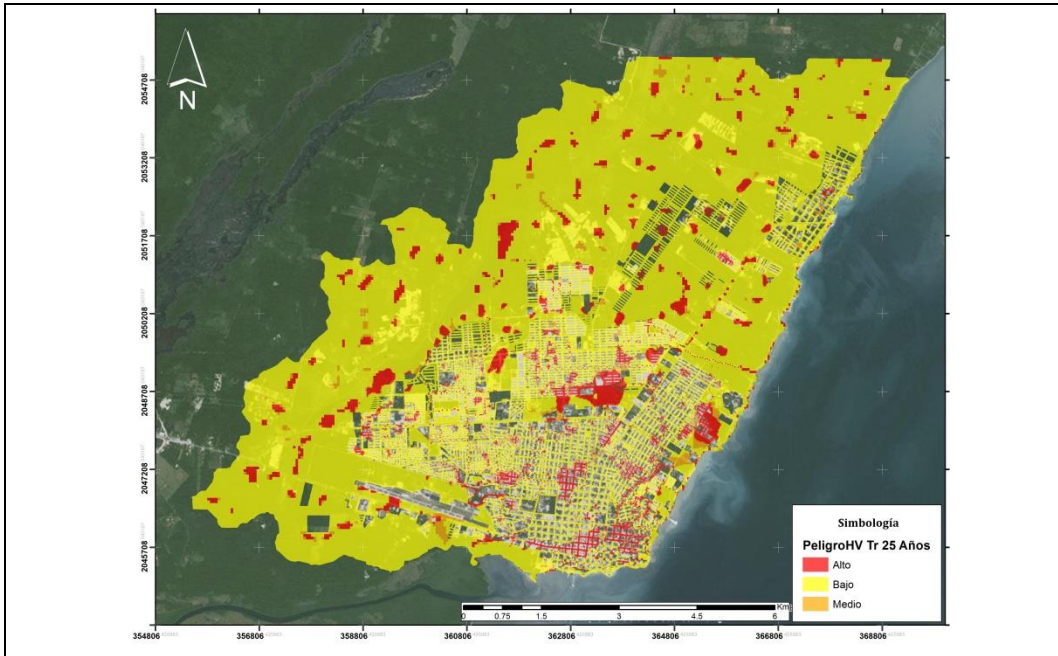


Figura 6-10 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 25 años

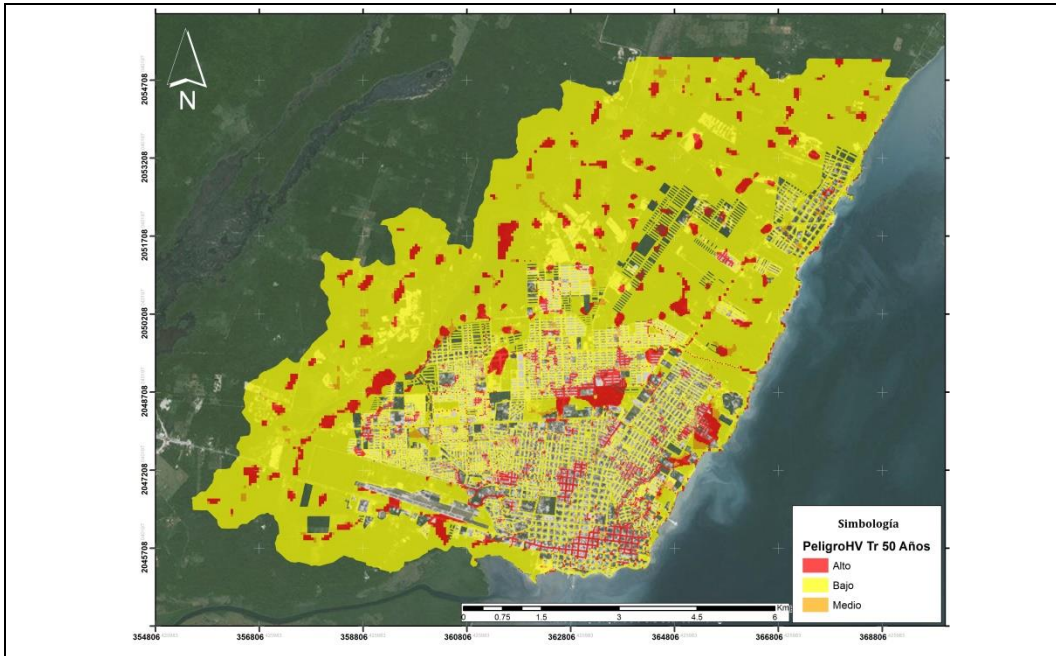


Figura 6-11 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 50 años

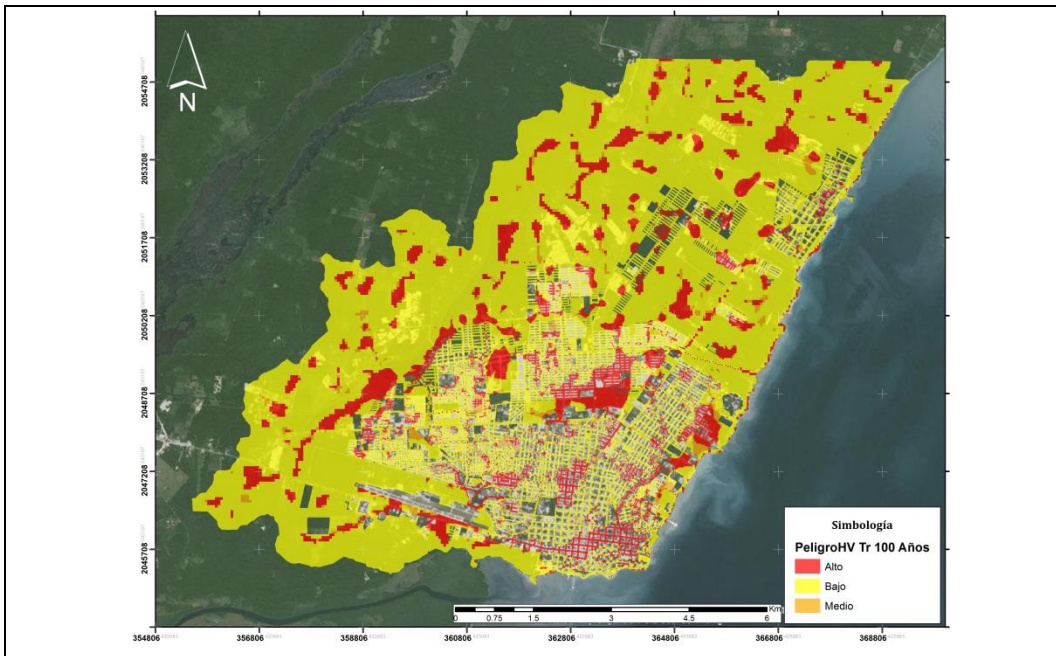


Figura 6-12 Mapa de peligro para hombres, correspondiente a un Tr de 100 años

Como primer resultado, al comparar los mapas de peligro entre mujeres y hombres no se tiene una diferencia considerable, por lo que el peligro entre ambos se puede considerar el mismo.

6.2 Comparación de resultados

6.2.1 Comparación de mapas de peligro por inundación

Parte de esta tesis se realizó una comparativa de resultados obtenidos con los nomogramas utilizados por *Rodríguez et al. 2012*; las mallas se sobreponen con la finalidad de comparar las manchas en las celdas y definir diferencias entre los nomogramas generados en esta tesis y los nomogramas de DORRIGO, utilizados en el estudio de Chetumal en 2012.

Como primera apreciación en las figuras anteriores y en las posteriores, se puede observar que cuando existe un Tr de 2 años, el peligro por inundación es muy bajo en comparación con los Tr's posteriores, de 10, 25, 50 ó 100 años; es decir; los mapas de peligro para el periodo de retorno mínimo considerado, es significativamente menor. Se determinó incluir una comparativa en las siguientes figuras en donde se puede apreciar una notoria amplitud en los mapas de peligro generados a partir del modelo físico experimental. Los mapas se realizaron bajos las mismas consideraciones de tirantes y velocidades diferenciados únicamente por la utilización de nomogramas correspondientes.

A partir de estos resultados se podrá definir la diferencia en los mapas de peligro por inundación estudiados, que es el área de peligro en la zona de estudio. Posteriormente se realizó el conteo de áreas de inundación bajo las categorías de los peligros bajo, medio y alto; y considerando los 6 periodos de retorno utilizados en los estudios (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

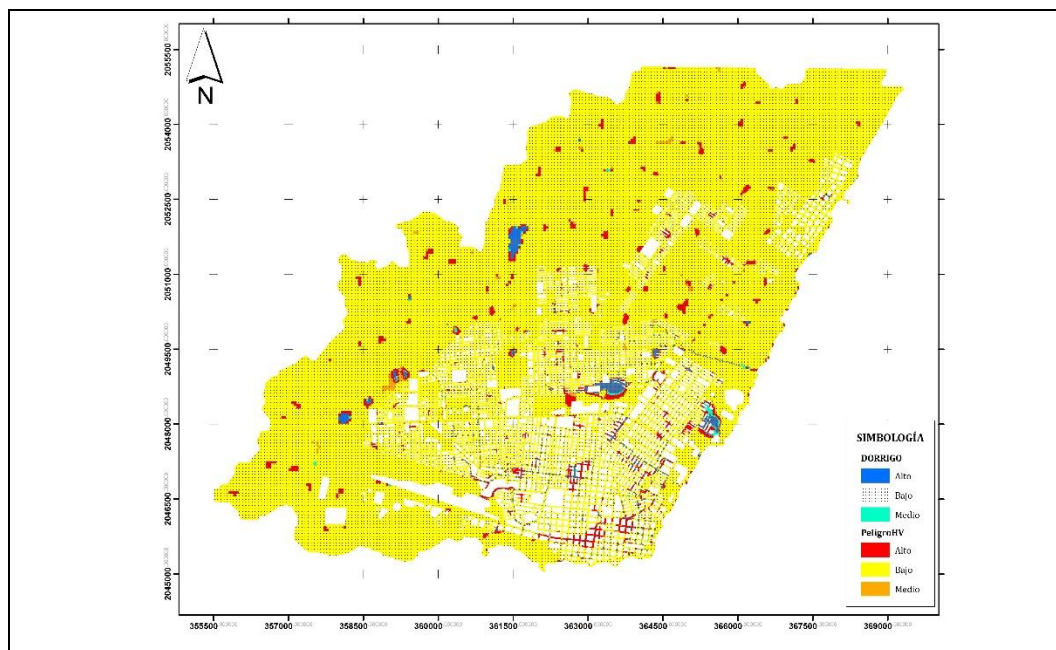


Figura 6-13 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 2 años (Mujeres)

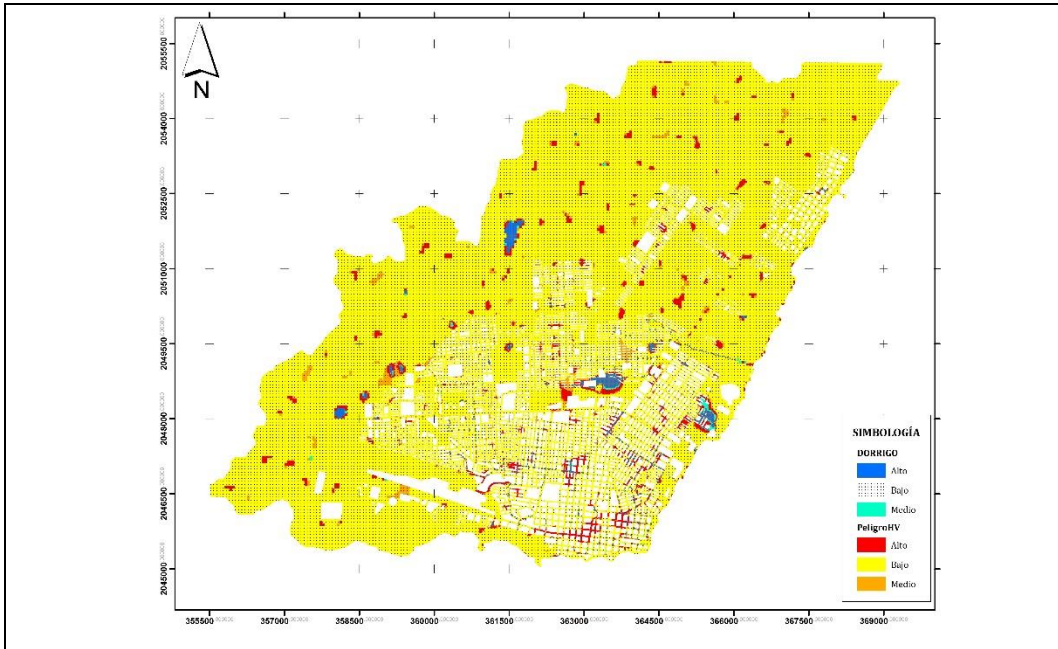


Figura 6-14 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 2 años (Hombres)

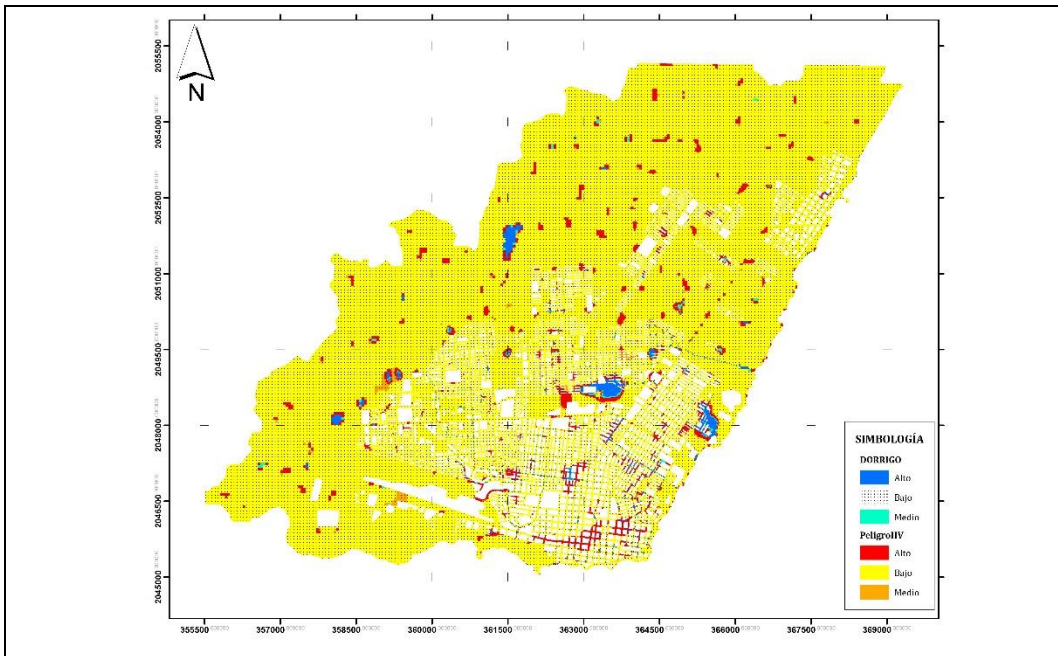


Figura 6-15 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 5 años (Mujeres)

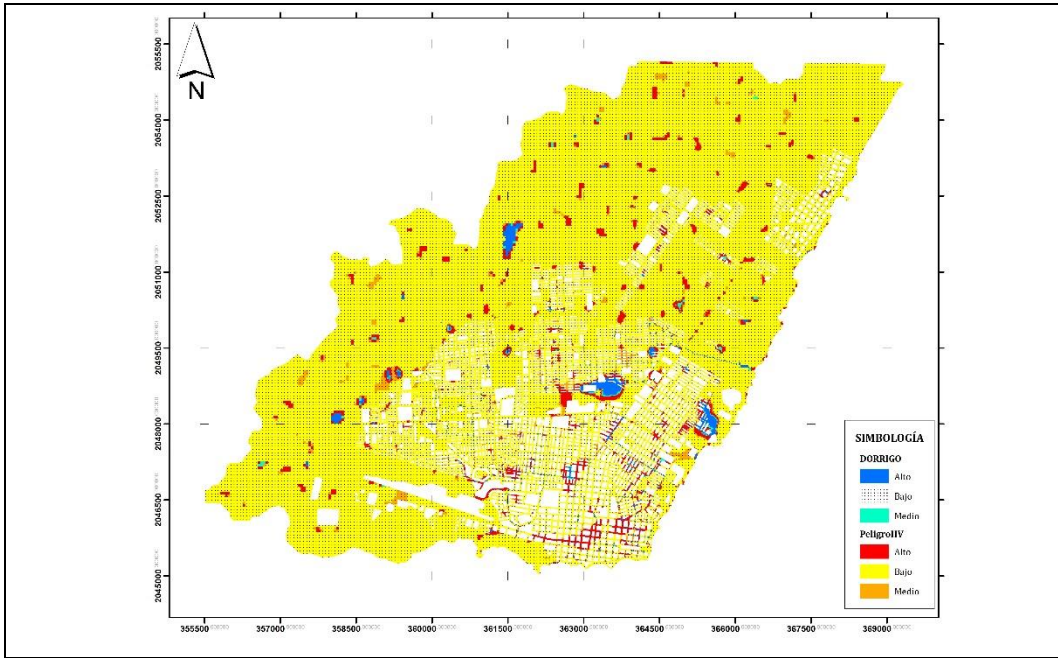


Figura 6-16 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 5 años (Hombres)

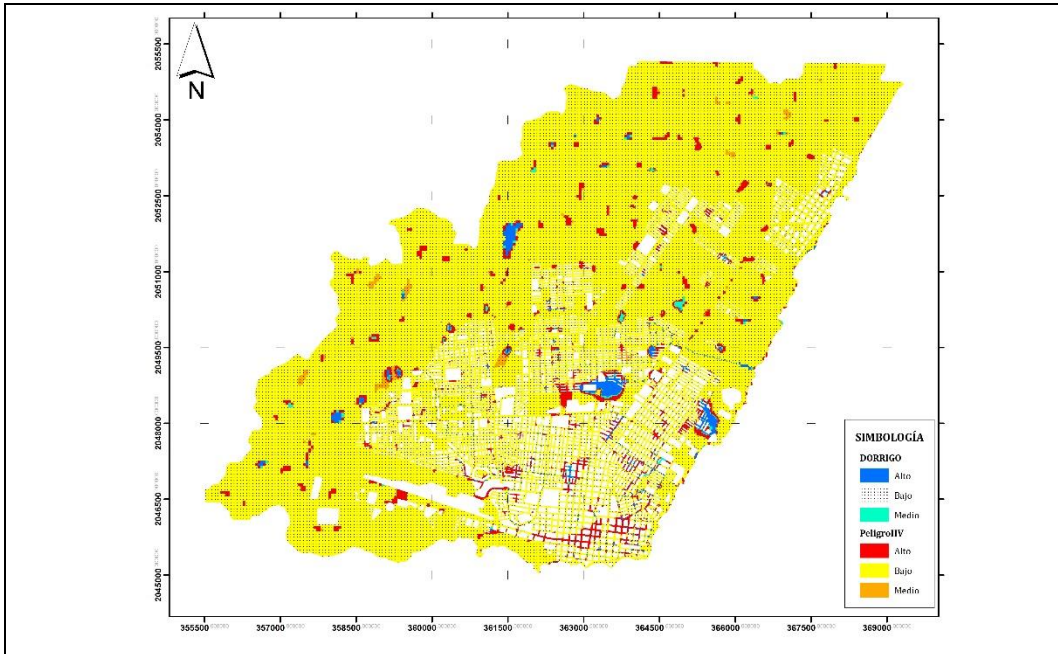


Figura 6-17 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 10 años (Mujeres)

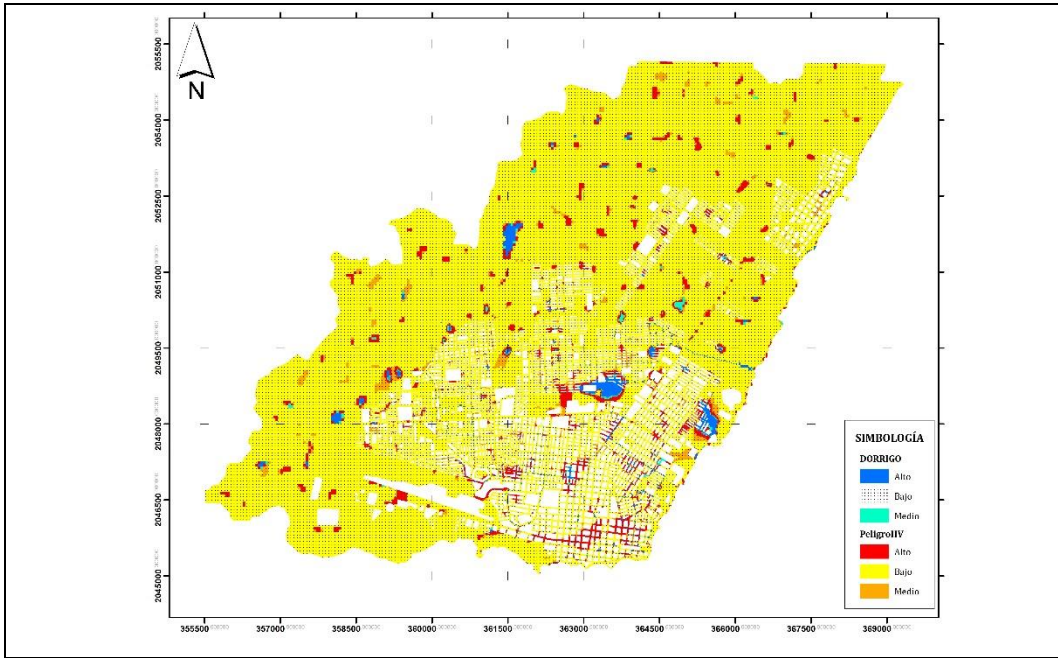


Figura 6-18 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 10 años (Hombres)

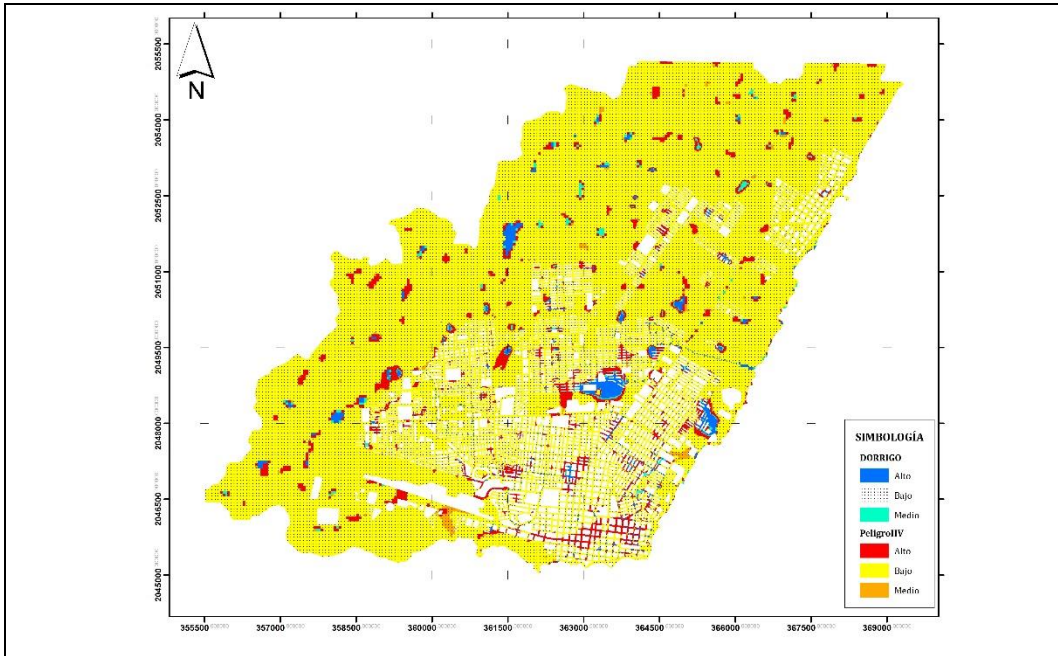


Figura 6-19 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 25 años (Mujeres)

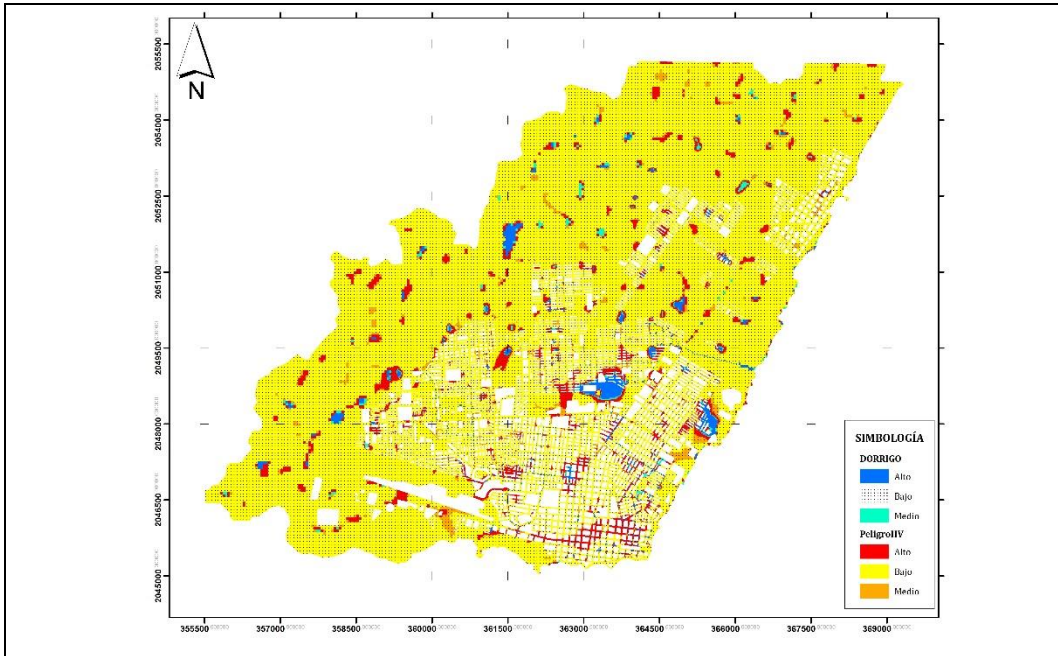


Figura 6-20 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 25 años (Hombres)

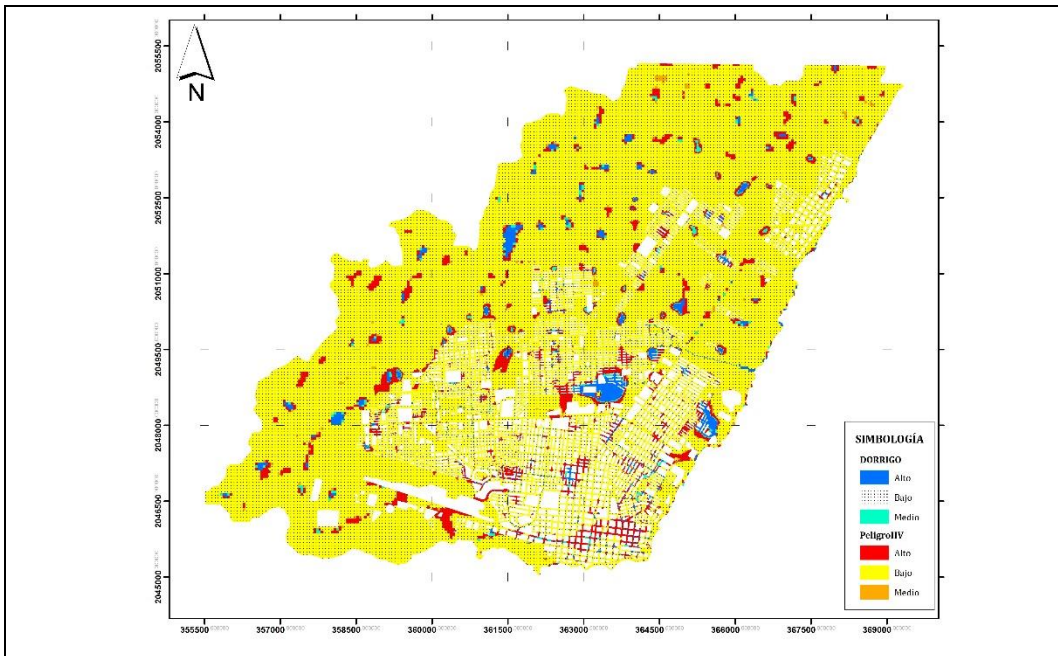


Figura 6-21 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 50 años (Mujeres)

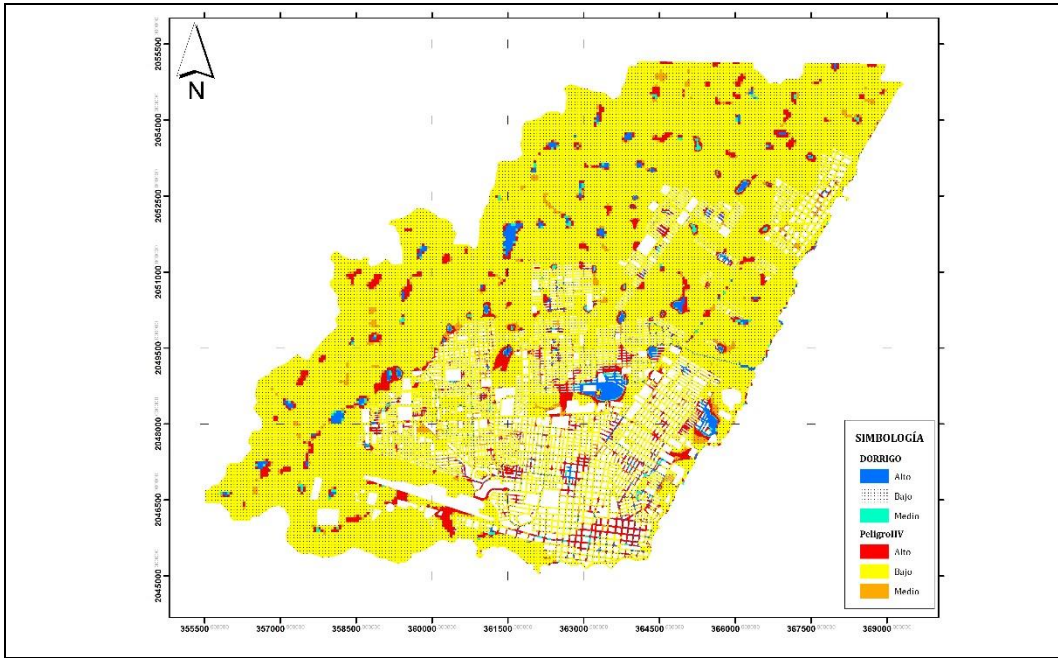


Figura 6-22 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 50 años (Hombres)

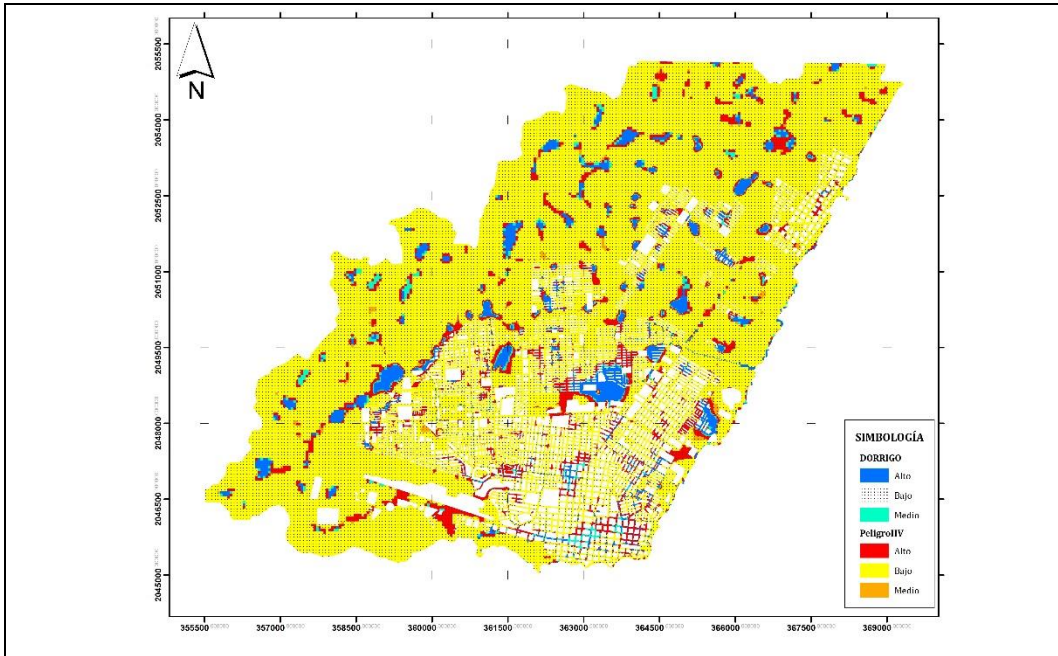


Figura 6-23 Comparativa de mapas de peligro (Dorrigo vs IMTA) para un Tr de 100 años (Mujeres)

La comparación bajo las condiciones más críticas que es considerando un Tr de 100 años, hay una marcada diferencia en las zonas inundables. En la Figura 6-24 se observa que el peligro alto considerando los nomogramas generados en esta tesis y que se muestra en color rojo, sobresale de las manchas de peligro alto utilizando los nomogramas de Dorrigo y que se utilizó un temático en color azul para su identificación.

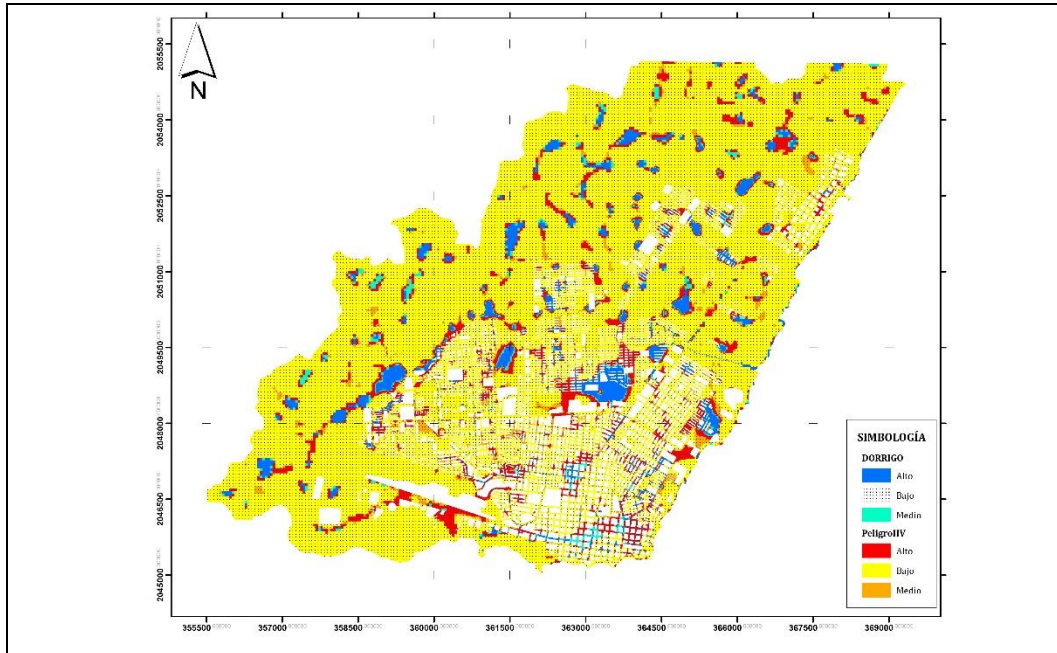


Figura 6-24 Comparativa de mapas de peligro para un Tr de 100 años (Hombres)

6.2.2 Comparación de áreas de inundables

Con los mapas de peligro que se obtienen en la comparativa del uso de nomogramas DORRIGO y los generados en esta tesis, se observó una diferencia notoria en cuanto a las áreas de inundación. Para establecer las diferencias de manera más puntual, se calcularon las áreas vinculadas para cada periodo de retorno a partir de un conteo de cada una de las celdas de cálculo de la Ciudad de Chetumal; con la finalidad de poder analizar los criterios de peligro.

En la Figura 6-25, se observa que para el método de DORRIGO, el área de inundación sobreestima el criterio de peligro bajo, mientras que con los criterios generados en la tesis se subestima el peligro; sobre todo en el periodo de retorno de 100 años.

Para el peligro medio Figura 6-26, utilizando el nomograma generado para hombres, sobreestima las áreas de peligro, mientras que el criterio para mujeres subestima el peligro y DORRIGO tiene valores de áreas por debajo de los dos criterios.

Finalmente en la Figura 6-27, los nomogramas generados en esta tesis están por encima del criterio de DORRIGO; es decir; que para el peligro medio y alto, los resultados generados sobreestiman el peligro y se encuentran del lado de la seguridad de las personas ante una inundación importante.

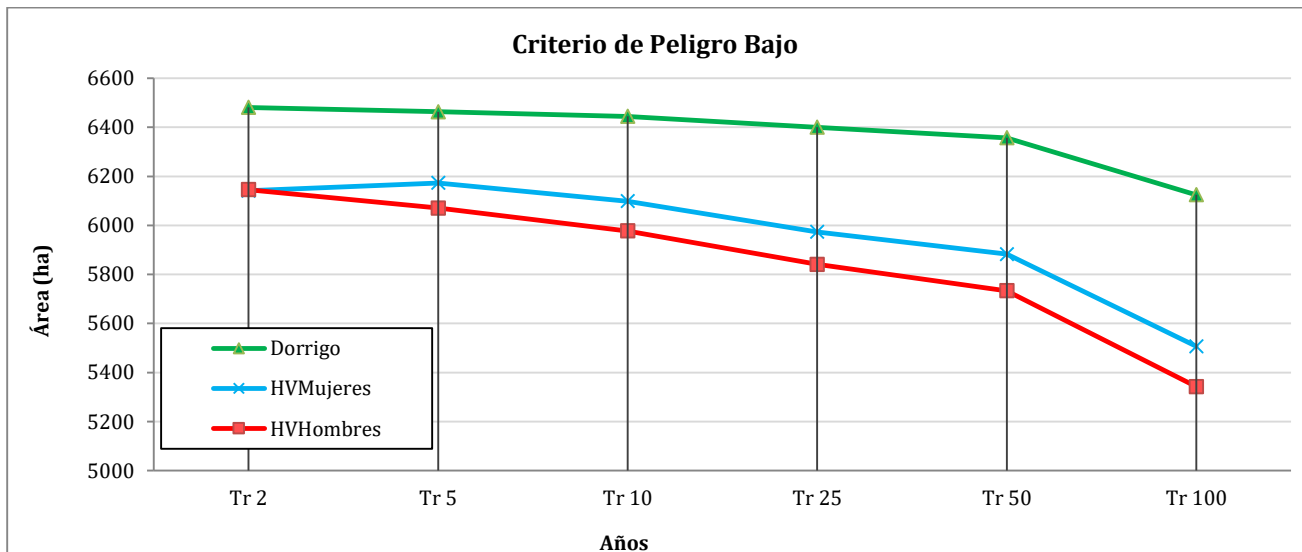


Figura 6-25 Áreas de inundación para criterio de peligro bajo

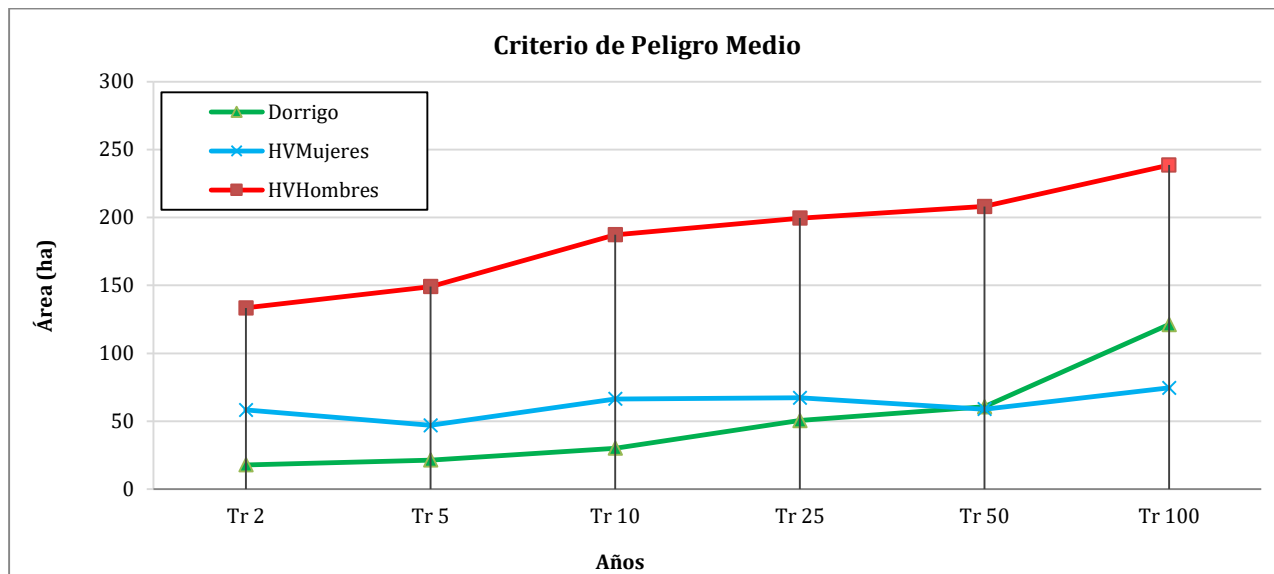


Figura 6-26 Áreas de inundación para criterio de peligro medio

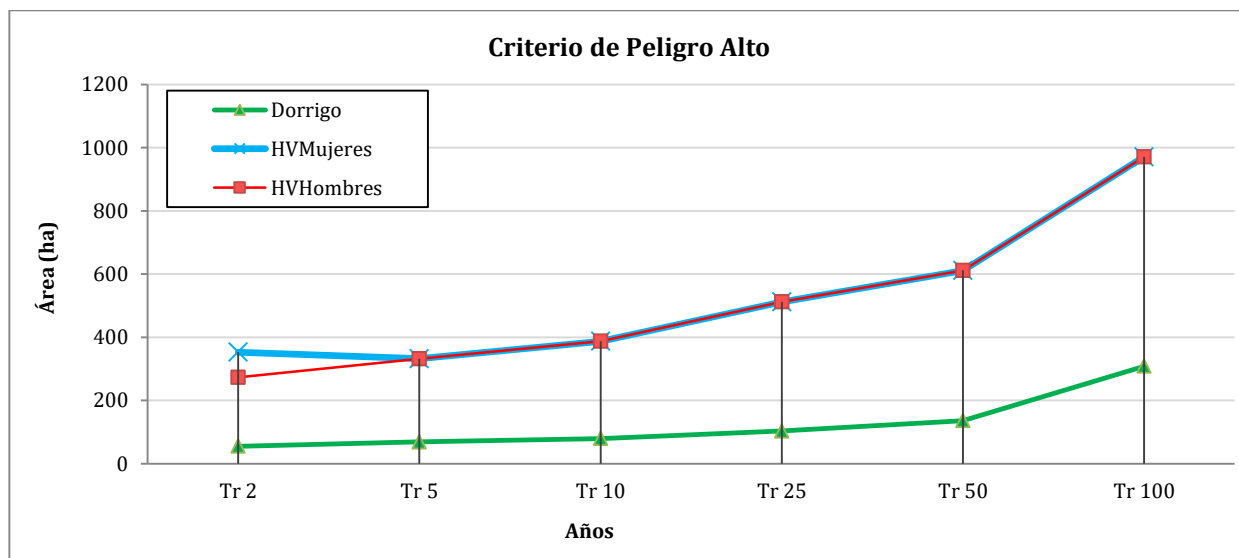


Figura 6-27 Áreas de inundación para criterio de peligro alto

6.2.3 Comparación de porcentajes de áreas de inundación

En la Tabla 6-1, Tabla 6-2 y Tabla 6-3; se muestran los porcentajes de las áreas inundables de la zona de estudio, con el objetivo de visualizar la comparativa de resultados generados en los mapas de peligro.

Tabla 6-1 Porcentaje de áreas inundadas para el criterio de Dorrigo

Criterio de Dorrigo	Tr 2 años	Tr 5 años	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años
Bajo	98.9%	98.6%	98.4%	97.7%	97.0%	93.5%
Medio	0.3%	0.3%	0.5%	0.8%	0.9%	1.8%
Alto	0.8%	1.1%	1.2%	1.6%	2.1%	4.7%
Porcentaje total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Tabla 6-2 Porcentaje de áreas inundadas para el criterio de peligro IMTA considerando mujeres

Criterio para mujeres	Tr 2 años	Tr 5 años	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años
Bajo	93.73%	94.21%	93.07%	91.16%	89.78%	84.04%
Medio	0.89%	0.72%	1.01%	1.03%	0.90%	1.14%
Alto	5.38%	5.07%	5.91%	7.81%	9.32%	14.82%
Porcentaje total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Tabla 6-3 Porcentaje de áreas inundadas para el criterio de peligro IMTA considerando hombres

Criterio para hombres	Tr 2 años	Tr 5 años	Tr 10 años	Tr 25 años	Tr 50 años	Tr 100 años
Bajo	93.79%	92.65%	91.23%	89.14%	87.50%	81.54%
Medio	2.04%	2.28%	2.86%	3.04%	3.17%	3.64%
Alto	4.17%	5.07%	5.91%	7.81%	9.32%	14.82%
Porcentaje total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Conclusiones

Las pruebas experimentales se realizaron continuamente durante un periodo de cuatro meses aproximadamente, de los datos de tirantes y velocidades que se obtuvieron por cada individuo fueron utilizados para generar nomogramas, donde los parámetros iniciales que varían durante pruebas similares son el peso, la estatura y el sexo. En un primera justificación se pensaba que dos factores importantes a considerar serían el calzado y la rugosidad de la calle, posteriormente los sujetos de prueba determinaron que lo que más influye definitivamente es la velocidad del flujo, esto provoca un desequilibrio en el individuo y generalmente se presenta una caída a velocidades mayores a 2 m/s.

Durante las primeras pruebas se observó que se adopta un aprendizaje en el proceso de cruzar la calle considerando un flujo, esta acción se realiza continuamente y el individuo comienza a acostumbrarse adoptando una técnica y en las pruebas críticas evitar caer. Este proceso se observó con el primer sujeto, ya que las pruebas iban en orden ascendente, tanto en tirante como en velocidad, el individuo adoptó una forma de caminar dentro del agua y expresó que la acción de extraer del agua la extremidad, le permitía mantener el equilibrio y evitaba caer. Por lo que posteriormente se realizaron pruebas de manera aleatoria con los siguientes individuos.

Como primera conclusión durante el desarrollo de las actividades, se pensaba que el factor más importante para no caer en alguna prueba con una velocidad considerable sería el peso de una persona, se establece una menor probabilidad de inestabilidad en una persona con un mayor peso en comparación con un individuo sometido a una prueba donde se presente la misma velocidad y el mismo tirante pero con un peso mucho menor. Se descarta esta teoría debido a que los individuos sometidos en pruebas similares y con un peso muy distinto contradice esta consideración que se tenía en un principio; un individuo con menor peso no necesariamente presentara una caída para la cual ya se han registrado niveles de peligro altos. En los comentarios de los sujetos de prueba concluyen que no perdieron el equilibrio totalmente, debido a que el entorno donde se desenvuelven, las actividades diarias que realizan y el hecho de practicar algún deporte, generan cierta ventaja en las capacidades psicomotrices de individuos con peso liviano.

Una segunda teoría que se descarta es la de someter a un hombre y a una mujer a la misma prueba, anticipando que el resultado sería por naturaleza en ventaja para un hombre, ya que se requiere cierta fuerza en las extremidades inferiores para caminar con un flujo considerable, se presentó el caso contrario en donde una persona de sexo femenino de complexión media no presento caídas en pruebas donde generalmente existía un peligro alto.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abt et Al. (1989). *Abt, S. R.; Wittler, R. J.; Taylor, A.; Love, D. J. Human stability in a high flood hazard zone.* AWRA Water Resour.
- Alcocer Yamanaka, V. (2011). *Construcción de mapas de riesgo e inundaciones en la región del Soconusco.* Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Alcocer-Yamanaka V. Rodríguez V. J. M., Albornoz G. P. M., Maldonado S. J., López O. J. A., Alonso O. J. A., Vidal R. H. Quiñones B. J. R. (2012). Manejo de Aguas pluviales de la ciudad de Chetumal, Quintan Roo. *Agua en Quintana Roo*, Julio - Septiembre, pp 9-14.
- CCRFCD, C. C. (1999). *Hydrological criteria and drainage design manual.* Contado de Clark, Estados Unidos.
- CENAPRED. (2004). *Centro Nacional de Prevención de Desastres, Inundaciones.* D.F. México: Secretaría de Gobernación.
- CENAPRED. (2004). Guía Básica para la elaboración de Atlas estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. En C. N. Desastres, *Guía Básica para la elaboración de Atlas estatales y Municipales de Peligros y Riesgos* (pág. 386). México D.F.
- CENAPRED. (2013). *CENAPRED.* Recuperado el 11 de junio de 2013, de http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=190
- Cervantes, C. (2012). *Generación de mapas de riesgo inundación mediante modelaciones 2D. Tesis de Maestría.* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, Jiutepec, Morelos.
- CONAGUA. (2011). *Manual para control de inundaciones.* México, D.F.: CONAGUA.
- FEMA. (2009). Recuperado el abril de 2010, de <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3587>
- Fuentes Mariles, O. A. (2011). *Estimación de peligro y vulnerabilidad por inundaciones en zonas urbanas.* Ciudad Universitaria, 28 de noviembre del 2011: Semana de Riesgos Naturales y Antropogénicos, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Gómez, V. (2008). *Curso de Hidrología Urbana (7a Edición).* Barcelona, España.: Institut Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gómez Manuel, Francesco Macchione, Beniamino Russo. (2010). *MODELO FÍSICO PARA EL ESTUDIO DE LOS CRITERIOS DE RIESGO.*
- Jonkman, S.N. and E. Penning-Rowsell. (2008). *Human Instability in Flood Flows.* Journal of the American Water.
- Karvonen, R., A., H., H.K., H., & A., L. (2000). *The Use of Physical Models in Dam-Break Analysis.* Helsinki University of Technology, Helsinki,: RESCDAM.
- Kikuchi, R. (2003). *Flood Hazard Map manual for technology transfer.* Kobe, Japan: International Training Program on Total Disaster Risk Management.

- Llaguno G., O. J. (2013). *Generación de mapas de riesgo considerando la topografía urbana, aplicado a la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca*. Tesis de Maestría (en proceso), Facultad de Ingeniería, Noviembre del 2013: UNAM.
- Loat, R., & Petrascheck, A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans la cadre des activités de l'aménagement du territoire, Dangers Naturels*. Bienne: Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE), Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire (OFAT), Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage (OFEFP).
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., & Russo, B. (2016). *Estabilidad de personas en flujos de agua*. Institut Flumen.: Ingeniería del Agua.
- Morelli Tucci, C. E. (2006). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. Brasil, Porto Alegre: OMM, (Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial).
- Nanía Escobar, L. (1999). *Metodología numérico - experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles*. Barcelona: Tesis doctoral.
- Nanía, L. (1999). *Modelos de Flujo en Calles y Criterios de Riesgo Asociados*. Granada: Depto. de Ingeniería de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, Universidad de Granada.
- NWS. (2005). *News South Wales Government, Department of infrastructure, Planning and Natural Resources*. Australia.
- Obras Públicas Zapopan. (s.f.). *Manual de Diseño de Espacio Público*. "Plan Zapopan 2010-2040".
- Ordaz et al. (2013). *Vulnerabilidad y riesgo por inundación*. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México D.F.
- Reiter, P. (2000). *International methods of Risk Analysis, Damage evaluation and social impact studies concerning Dam-Break accidents. EU-Project RESCDAM*. Seinäjoki (Finlandia).
- Ribera, L. R. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tencológicas. *Doc. Anál. Georg. 43*, pp.153-171.
- Rodríguez V. J. M., Maldonado S. J. Albornoz G. P. M., Alcocer-Yamanaka V. H. (2012). *Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo*. Jiutepec, Morelos, clave interna HC1235.3: IMTA.
- Rodríguez et al. (2013). *Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos.
- Rodríguez et al. (2014). *Estudio de riesgos de inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (FSIDSA)*.
- Russo, B. (2009). *Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas. Tesis Doctoral*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Salas S., M. A. (2011). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*. México: CENAPRED.

SCT, M. (s.f.). *Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes*. República Mexicana.

Simons, D. B. (1977). Colorado State University: Fort Collins.

Témez. (1992). Control del Desarrollo urbano en zonas inundables. En M. G. J. Dolz, *Inundaciones y redes de drenaje urbano* (págs. 105-115). Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Trieste. (1988). *Downstream Hazard Classification Guidelines*. US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.

Wright - McLaughlin. (1969). *Urban storm drainage criteria manual. Urban Drainage and Flood Control District*. Denver.