



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**GENERACIÓN DE MAPAS DE  
RIESGO DE INUNDACIÓN MEDIANTE  
MODELACIÓN EN 2D**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

**CLAUDIA ELIZABETH CERVANTES JAIMES**

TUTOR:

DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Gabriel Echávez Aldape

Secretario: Dr. Arreguín Cortés Felipe

Vocal: Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. Rubio Gutiérrez Horacio

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos

Jiutepec, Morelos, UNAM, Campus Morelos

**TUTOR DE TESIS:**

DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

---

**FIRMA**

*A Chiapas, paraíso lleno de ríos*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante dos años, para obtener el grado de maestra en ingeniería civil.

A la UNAM por brindarme la oportunidad de cursar la maestría y abrir una nueva puerta a mis expectativas como ingeniera.

Al Organismo de Cuenca Frontera Sur por la información proporcionada para la realización de esta tesis.

A mis padres por todas sus enseñanzas y ejemplo que han sido eje y cimentación de mis logros y anhelos.

A mis hermanos, mis dos tercios que complementan, que siempre están conmigo.

A mi Arturo, que sabe comprender mis peores momentos, valorar los mejores, siempre apoya, entiende, inspira y hace que crecer a su paso sea un reto.

A mis profesores, en primer lugar al Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka por su apoyo y facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Especialmente a mi profesor y sinodal el Dr. Felipe Arreguín por ser el ejemplo que arrastra, más allá del salón de clases, trascendiendo en un inicio con ejemplos al compartirnos su experiencia y después en el campo de acción de la ingeniería hidráulica, con todo lo que esto conlleva.

A mis sinodales Dr. Gabriel Echavez, Dr. Carlos Escalante, M. I. Horacio Rubio, por el valioso tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A mis hermanos Alezza y Raúl, sin ellos, ni la maestría ni esta tesis serían una realidad, por seguir compartiendo una vida de éxito, que trascienda tiempo y distancia.

A mis amigos y compañeros en esta etapa, Arturo López, Héctor González y Pedro Albornoz, Víctor Nava, todos ellos ejemplo de constancia, superación y realización personal.

Al Olga María, Omar Alejandro, Selene y Oralia por el apoyo otorgado para alcanzar este logro.

## Nomenclatura

$A$	Área
$A_{oj}$	Valor de $j$
$a_x$	Componente de la aceleración en $x$
$a_y$	Componente de la aceleración en $y$
$a_w$	Componente de la aceleración en $w$
$\beta$	Coeficiente (5/3 para un canal ancho)
$C$	Número de Courant ( $0.3 < c < 1.0$ )
$c$	Celeridad de onda calculada
$cm$	Centímetros
$\frac{\partial h}{\partial t}$	Razón de cambio del tirante con respecto al tiempo
$\frac{\partial h}{\partial x}$	Gradiente de presión
$\frac{\partial V_x}{g \partial t}$	Término de aceleración local
$\frac{\partial V_x}{g \partial x}$	Término de aceleración convectiva
$\Delta h_x^{i+1}$	Incremento en el tirante entre el tiempo $i$ e $i + 1$
$\Delta Q_x^{i+1}$	Cambio en la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación para cada elemento de malla para el intervalo $\Delta t$ entre el tiempo $i$ e $i + 1$
$\Delta t$	Intervalo de tiempo
$\Delta x$	Ancho del elemento de malla
$g$	Gravedad
$g_x$	Componente de la gravedad en la dirección $x$
$g_y$	Componente de la gravedad en la dirección $y$
$g_z$	Componente de la gravedad en la dirección $z$
$h$	Tirante
$h_x^{i+1}$	Tirante promedio entre dos elementos para el siguiente paso de tiempo
$h_x^i$	Tirante en el elemento $x$ para el paso de tiempo $i$
$h_{x+1}^i$	Tirante en el elemento $x + 1$ para el paso de tiempo $i$
$i_e$	Precipitación en exceso
$i$	Paso de tiempo
$I$	Intensidad de sumersión
$m$	Metros
$\mu$	Viscosidad absoluta o dinámica

$P$	Presión
$p_{Si}$	Probabilidad de ocurrencia del escenario $i$
$p_{oj, Si}$	Probabilidad de exposición del objeto $j$ en el escenario $i$
$q_0$	Descarga unitaria
$Q_n$	Descarga en la dirección norte para cada elemento de malla
$Q_e$	Descarga en la dirección este para cada elemento de malla
$Q_s$	Descarga en la dirección sur para cada elemento de malla
$Q_w$	Descarga en la dirección oeste para cada elemento de malla
$Q_{ne}$	Descarga en la dirección noreste para cada elemento de malla
$Q_{se}$	Descarga en la dirección sureste para cada elemento de malla
$Q_{sw}$	Descarga en la dirección suroeste para cada elemento de malla
$Q_{nw}$	Descarga en la dirección noroeste para cada elemento de malla
$R$	Riesgo
$\rho$	Densidad
$S_{fx}$	Pendiente de fricción
$S_{0x}$	Pendiente del fondo
$Tr$	Período de retorno
$\tau_{bx}$	Fuerzas tangenciales en la dirección $x$ del fondo $b$
$\tau_{by}$	Fuerzas tangenciales en la dirección $y$ del fondo $b$
$\tau_{sx}$	Fuerzas tangenciales en la dirección $x$ de la superficie libre $s$
$\tau_{sy}$	Fuerzas tangenciales en la dirección $y$ de la superficie libre $s$
$\bar{u}$	Velocidad media (componente en $x$ ) en las ecuaciones promediadas en la altura (Saint Venant para dos dimensiones)
$v$	Velocidad promedio calculada de la sección transversal (análisis unidimensional)
$\bar{v}$	Velocidad media (componente en $y$ ) en las ecuaciones promediadas en la altura (Saint Venant para dos dimensiones)
$v_{oj, Si}$	Vulnerabilidad del objeto $j$ , dependiendo del escenario $i$
$V_x$	Componente de la velocidad promediado en la altura
$\vec{V}$	Vector velocidad
$\nabla$	Gradiente
$\zeta$	Coefficiente empírico

## Resumen

El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología para generar mapas de inundación correspondientes a las cuencas de los ríos Coatán y Huehuetán, utilizando un evento con periodo de retorno de 100 años, y estableciendo la base para una gestión de riesgo por inundaciones que ayude a la prevención, la planeación territorial y minimice el efecto de las inundaciones en la región.

Se incluye un análisis del efecto del tirante y la velocidad, en la pérdida de estabilidad en personas, que se enfrentan a flujos de inundación. Además se propone un criterio para delimitar la mancha de inundación considerando tres diferentes niveles de riesgo, con base en los parámetros ya mencionados y el factor de sumersión (producto del tirante por la velocidad).

Se concluye que la velocidad tiene un efecto determinante en la pérdida de estabilidad de una persona que se desplaza dentro de un flujo de inundación. Además, la importancia del trabajo recae en que los mapas de riesgo, que incluyen la delimitación de la peligrosidad, son una herramienta importante para la gestión del territorio.

Entre las actividades en que intervienen podemos mencionar la delimitación de áreas de inundación, identificación de zonas relacionadas a las actividades económicas que están expuestas, identificación de las vías de comunicación que se verán afectadas durante el evento, evaluación de afectaciones y daños potenciales debidos a la falla de una obra de control o aprovechamiento, orientación de la planificación territorial y urbana, establecimiento de las restricciones al uso y dominio del suelo, definición de zonas propensas a deslaves y prevención de éstos, planificación de acciones de protección civil considerando la capacidad de arrastre del agua y la posibilidad de muerte por ahogamiento de la población.



## **Abstract**

The main objective of this paper is to propose a methodology to generate flood maps for the Huehuetán and Coatán river basins, using an event with 100-year return period, and establishing the basis for flood risk management to help prevention, territorial planning and minimize the effect of floods in the region.

It includes an analysis about the effect of flow depth and velocity, on the loss of stability in people who are facing flood flows. It also suggests an approach to delineate the flood map, based on the mentioned parameters and the submergence factor (product of flow depth and velocity).

We conclude that flow velocity has a decisive effect on the loss of stability of a person moving through a flood flow. Moreover, the importance of the work falls in the flood maps, including the delineation of hazard, which are an important tool for land management.

Within the activities related to flood maps, we can mention the floodplain delineation, identification of exposed areas and economic activities, identification of roads that will be affected during a flood event, evaluation of potential disruption and damage due to failure of any structure, urban planning, soil use and management, identify landslides zones and prevention of damages and civil protection.

# Índice

1.Introducción	1
1.1.Justificación	2
1.2.Objetivo	3
1.3.Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis	3
2.Antecedentes	5
2.1. Antecedentes de la modelación en hidrología e hidráulica	6
2.2. Evolución de la modelación en hidrología.	10
2.2.1. Inicios de la modelación en hidrología.	10
2.2.2. Modelos de cuenca.	12
2.3.Inundaciones y sus causas	14
2.4. Clasificación de las inundaciones.	15
2.5. Riesgo y otros conceptos relacionados.	17
2.6. Modelación y la gestión de riesgo de inundaciones.	21
2.7.Mapas de riesgo de inundación	22
2.7.1.Importancia de los mapas de riesgo	23
2.7.2.Estructuración de los mapas de riesgo	24
3. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica aplicadas en la modelación de cauces	26
3.1. Modelos unidimensionales y Ecuaciones de Saint Venant 1D	26
3.2. Modelos bidimensionales y las ecuaciones de Saint-Venant 2D	27
3.2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	28
3.2.2. Ecuaciones de Saint-Venant 2D	29
3.3. Dimesionalidad y resolución en modelos hidráulicos	30
3.3.1. Clasificación de los modelos por su dimensionalidad	30
3.3.2. Descripción general de métodos de resolución de los modelos hidráulicos	32
3.4. Método de resolución del modelo FLO-2D	32
4. Selección de los sitios de estudio.	40
4.1. Condiciones físicas de la zona	40
4.2 .Condiciones hidrológicas de las cuencas de estudio	41
4.2.1 Cuenca del río Coatán	41
4.2.2 Cuenca del río Huehuetán	43
4.3 Importancia del proyecto	44
5. Criterios de riesgo considerados en mapas de inundación	54
5.1.Metodología para la elaboración de mapas de riesgo	54
5.2.Parámetros de peligrosidad en los mapas de riesgo	56

5.3. Parámetros y criterios para definición de las áreas de inundación peligrosa.	56
5.4. Criterio propuesto para la cuenca de estudio	64
6. Modelación hidráulica de los sitios seleccionados	63
6.1. Análisis de información hidrológica	63
6.2 Generación de mapas de peligrosidad	65
6.2.1 Cuenca del río Coatán	65
6.2.2 Cuenca del río Huehuetán	72
6.3. Generación de mapas de riesgo de inundación a partir de tirante, velocidad y factor de sumersión.	78
7.Análisis de resultados	85
7.1.Efecto de la velocidad y el tirante	85
7.2.Aplicaciones del mapa de riesgo en zonas urbanas	86
8.Conclusiones	87
9.Referencias	89

## Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1 Comparación de número de desastres naturales en 2010 con el promedio de 2000 a 2009.	5
Ilustración 2.2 Clasificación de los modelos hidrológicos.	8
Ilustración 2.3 Hidrogramas de entrada y salida en cuencas con diferente	14
Ilustración 2.4 Papel integrador de los SIG.	21
Ilustración 3.1 Modelo tridimensional.	31
Ilustración 3.2 Discretización en el modelo FLO-2D	33
Ilustración 4.1 Precipitación media anual 1941-2005.	41
Ilustración 4.2 Localización de la cuenca del río Coatán.	42
Ilustración 4.3 Localización de la cuenca del río Huehuetán.	43
Ilustración 4.4 Imagen de radar del 29 de mayo de 2010, editada por el SMN.	45
Ilustración 5.1 Metodología de elaboración de mapas de riesgo.	47
Ilustración 5.2 Nivel de peligrosidad en áreas de inundación (Rossi, 2009).	49
Ilustración 5.3 Clasificación de zonas en el mapa de riesgo (Départementale des Territoires et de la Mer, 2010).	52
Ilustración 5.4 Zona de transición de riesgo.	56
Ilustración 5.5 Experimento de inestabilidad durante un flujo de inundación.	59
Ilustración 5.6 Combinaciones de tirante y velocidad en que se presenta la inestabilidad.	59
Ilustración 5.7 Modelo de inestabilidad por momento y fricción.	60
Ilustración 6.1 Hidrogramas del río Coatán para 5, 10, 20, 50 y 100 años.	63
Ilustración 6.2 Hidrograma de entrada para modelación de escenario,	64
Ilustración 6.3 Mapa de tirantes finales, cuenca del río Coatán.	67
Ilustración 6.4 Mapa de tirantes máximos, cuenca del río Coatán.	68
Ilustración 6.5 Mapa de tiempo para alcanzar un tirante $h = 0.30\text{m}$ , cuenca del río Coatán.	69
Ilustración 6.6 Mapa de tiempo para alcanzar el tirante máximo, cuenca del río Coatán.	70
Ilustración 6.7 Mapa de velocidad máxima, cuenca del río Coatán.	71
Ilustración 6.8 Mapa de tirante final, cuenca del río Huehuetán.	73
Ilustración 6.9 Mapa de tirante máximo, cuenca del río Huehuetán.	74
Ilustración 6.10 Mapa de tiempo para alcanzar el tirante máximo, cuenca del río Huehuetán.	75
Ilustración 6.11 Mapa de tiempo para alcanzar un tirante $h = 0.30\text{ m}$ , cuenca del río Huehuetán.	76
Ilustración 6.12 Mapa de velocidad máxima, cuenca del río Huehuetán.	77
Ilustración 6.13 Niveles de riesgo de inundación.	80
Ilustración 6.14 Mapa de riesgo por inundación, ciudad de Tapachula.	82
Ilustración 6.15 Mapa de riesgo por inundación, poblado de Huehuetán.	83

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Clasificación de los modelos en relación a su evolución tecnológica	9
Tabla 2.2 Factores que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones	15
Tabla 2.3 Indicadores en un análisis de vulnerabilidad.	19
Tabla 2.4 Población promedio expuesta a inundaciones (1980-2008)	20
Tabla 2.5 Características de los mapas de inundación	24
Tabla 5.1 Condición de peligrosidad de inundación según la Oficina Federal de Agua y Geología de Suiza	50
Tabla 5.2 Riesgo para la población en función del tirante y velocidad	51
Tabla 5.3 Los criterios más importantes aplicados actualmente	54
Tabla 6.1 Período de retorno en función de la zona a proteger	63
Tabla 6.2 Valores de los parámetros de inundación más importantes	73
Tabla 6.3 Información esencial (E) o recomendable (R) según	74
Tabla 6.4 Criterio de riesgo aplicado para generación de mapas de riesgo	75

## 1. Introducción

Las herramientas matemáticas y sus aplicaciones en hidrología e hidráulica, como el diseño de obras y la gestión de los recursos, han cobrado gran importancia como complemento de los modelos físicos.

Hidroinformática se denomina al conjunto de modelos de simulación y tecnología de información, aplicadas a la solución de problemas relacionados con los recursos hídricos y tiene sus inicios entre la tercera y cuarta generación de los modelos computacionales.

Los modelos de simulación y sistemas de información geográfica se encuentran entre las herramientas más importantes para lograr un manejo del riego y los daños por eventos extremos en zonas urbanas.

Entre las consecuencias más graves de estos eventos para la población a nivel mundial se encuentran las inundaciones; éstas provocan grandes pérdidas humanas y económicas y para lograr la prevención y reducción de los daños, se ha propuesto en varios países un conjunto de prácticas que ayuden a la gestión del riesgo por inundaciones.

La base para aplicar las medidas de apoyo que minimizan los riesgos, es conocer las zonas afectadas y la magnitud del evento hidrometeorológico durante una inundación, con el mayor detalle posible.

La recolección de datos y un análisis hidrológico, permiten determinar características del evento como gastos máximos, duración y lámina de precipitación, período de retorno al que corresponde el evento, así como tirantes y velocidades alcanzados por el agua. Respecto a la determinación de la zona afectada, actualmente la herramienta principal son los mapas de riesgo.

Existen varios tipos de mapas de riesgo, se pueden mencionar los mapas de áreas inundables, tirante o velocidad de flujo. Los usos principales de estos mapas son: evaluación de afectaciones y daños potenciales, planificación territorial y urbana, establecimiento de las restricciones al uso y dominio del suelo, definición de zonas propensas a deslaves y prevención de estos, entre otros.

## 1.1. Justificación

Debido a cambios provocados por la urbanización, o fenómenos naturales, los niveles alcanzados en las corrientes naturales o canales pueden llegar a presentar un riesgo mayor del proyectado originalmente, especialmente en zonas o centros de población. Aun cuando se cuenta con obras de protección, asociadas a un periodo de retorno que represente un riesgo aceptable, debe tomarse en cuenta que su diseño está basado en la información histórica disponible, anterior a las alteraciones del ambiente y la infraestructura actual.

Las medidas de protección ante inundaciones pueden ser estructurales o no estructurales, ambas pueden verse limitadas por cuestiones técnicas, políticas, económicas o sociales. Sin embargo, eventualmente, la capacidad de los medios estructurales de protección será rebasada por el alcance de uno o más eventos hidrometeorológicos. Por lo tanto, una opción factible, es la gestión del riesgo que conllevan los eventos extremos.

La metodología para lograrlo comienza con la prevención, de manera que es necesario definir, al menos, las zonas que se encuentran en mayor peligro en caso de un evento de este tipo. Asimismo las características de la inundación relacionadas directamente con el efecto en la población e infraestructura, como son área afectada, tirantes y velocidades, y tiempos de propagación.

Para la ubicación de las áreas más propensas a inundaciones es necesaria información básica como topografía, gastos o hidrogramas asociados a periodos de retorno, o en caso de no disponer de estos, puede hacerse uso de los niveles de precipitación en la zona.

El desarrollo de la modelación numérica permite analizar una variedad de escenarios de forma rápida, al contar con esta información en forma digital como los modelos digitales de elevación. De esta manera es factible obtener mapas correspondientes a varios tipos de eventos, con una menor o mayor probabilidad de ocurrencia, además de que esta representación gráfica, a diferencia de una numérica, facilita la comprensión y evaluación de su alcance y peligrosidad.

Otra ventaja de contar con mapas de inundación, es que son un medio de comunicación que puede ser divulgado entre la población en forma masiva, y favorecer a una rápida

evacuación en caso de un evento, una vez que los habitantes se han familiarizado con ellos.

## **1.2. Objetivo**

Generar mapas de inundación correspondientes las cuencas de los ríos Coatán, Huixtla y Huehuetán, utilizando un evento con periodo de retorno de 100 años, y estableciendo la base para una gestión de riesgo por inundaciones que ayude a la prevención, la planeación territorial y minimice el efecto de las inundaciones en la región.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Llevar a cabo la modelación hidrológica de las cuencas de los ríos Coatán, Huixtla y Huehuetán.
- Analizar y definir zonas de inundación para un evento con un periodo de retorno de 100 años, a través de la generación de mapas de áreas inundables.
- Describir los criterios utilizados internacionalmente, basados en tirante, velocidad e intensidad de sumersión, para la definición del riesgo en áreas de inundación.
- Analizar los criterios existentes y proponer valores para el tirante, la velocidad de flujo e intensidad de sumersión, apropiados para su aplicación en las cuencas de estudio.
- Generar los mapas de riesgo de inundación con el criterio sugerido, destacando las principales aplicaciones de dichos mapas a nivel local.
- Evaluar las ventajas y limitaciones del modelo FLO-2D en el manejo de inundaciones por flujos newtonianos.

## **1.4. Hipótesis**

La generación de mapas de riesgo por inundación, en función del tirante alcanzado por el flujo, implica excluir zonas de riesgo potencial debido a la velocidad del escurrimiento que pueden provocar pérdidas materiales y lesiones graves a los habitantes.

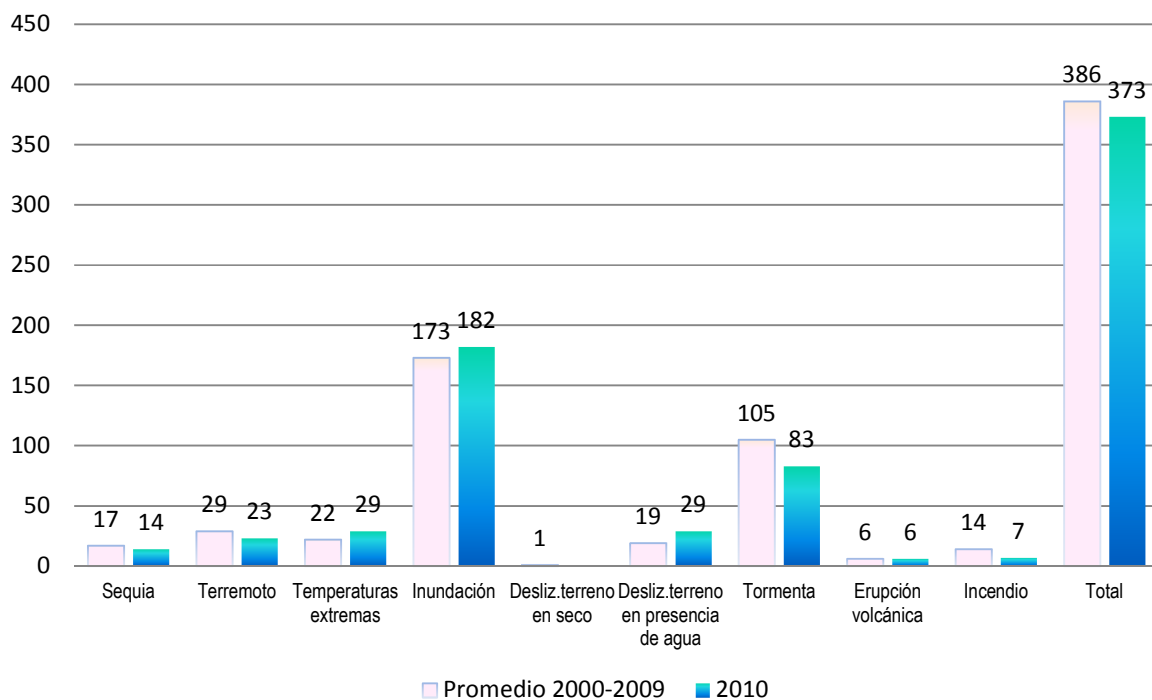


La aplicación de un criterio de riesgo basado en la combinación del tirante y la velocidad del flujo, a los mapas de riesgo por inundación, permitirá definir áreas de inundación con mayor certidumbre dado que involucran ambas variables hidráulicas.

## 2. Antecedentes

En años recientes, se ha observado un incremento en la ocurrencia de inundaciones a nivel mundial. Estas se asocian a un incremento en los niveles de precipitación, ya sea su intensidad o duración (IPCC,2001). El número de inundaciones severas por década, se ha incrementado de 7 en 1950 hasta 34 durante la década de los 90. (Loster, 1999; UN/ISDR, 2005).

En la Ilustración 2.1 se presenta la comparación del número de desastres naturales ocurridos en 2010 contra el promedio de la última década.



**Ilustración 2.1 Comparación de número de desastres naturales en 2010 con el promedio de 2000 a 2009.**

Fuente: EM-DAT: The OFDA/CRED - International Disaster Database [www.emdat.be](http://www.emdat.be) Université catholique de Louvain Brussels - Belgium

Se observa que entre los nueve tipos de desastres que se incluyen, las inundaciones superan en número y en gran cantidad a los demás. Esto nos da una primera visión muy general del impacto de estos eventos en la población y la economía mundial.

Sólo en México, en el presente año, han ocurrido lluvias atípicas que han rebasado todos los máximos históricos, siendo los meses de julio y agosto los más lluviosos de los últimos setenta años, lo que ha provocado que se sobrepasen los niveles máximos de almacenamiento en las presas y la elevación del nivel máximo ordinario de los cuerpos de agua de jurisdicción federal (DOF, 2010).

En la temporada de huracanes o tormentas tropicales, las precipitaciones extremas ocurridas en la República Mexicana suelen producir severos daños a la población y a la infraestructura hidroagrícola, ganadera y de vías de comunicación, así como a las diversas actividades económicas, en el norte, centro y sur del país, especialmente y con mayor impacto en las zonas vulnerables de alto riesgo como la zona costera de Chiapas (CONAGUA, 2000).

Dado que las causas son fenómenos hidrometeorológicos que no pueden evitarse, y muchas veces las obras de control y protección son insuficientes, un apoyo viable es el manejo del riesgo. Esto se logra mediante acciones como prevención, pronóstico, información al público y planeación territorial, con la intervención de herramientas tecnológicas como la modelación. A continuación se expone una descripción general de los modelos disponibles para este fin, su clasificación y características.

## **2.1. Antecedentes de la modelación en hidrología e hidráulica**

Se puede definir un modelo hidrológico como una representación simplificada de un sistema hidrológico. Dentro de la modelación numérica, basados en el enfoque hacia la cuenca como unidad de estudio se pueden mencionar dos tipos:

- a) Modelación agregada (*lumped model*): la cuenca se considera como un solo elemento, en este caso los valores de los parámetros son valores promedio de la cuenca en estudio.

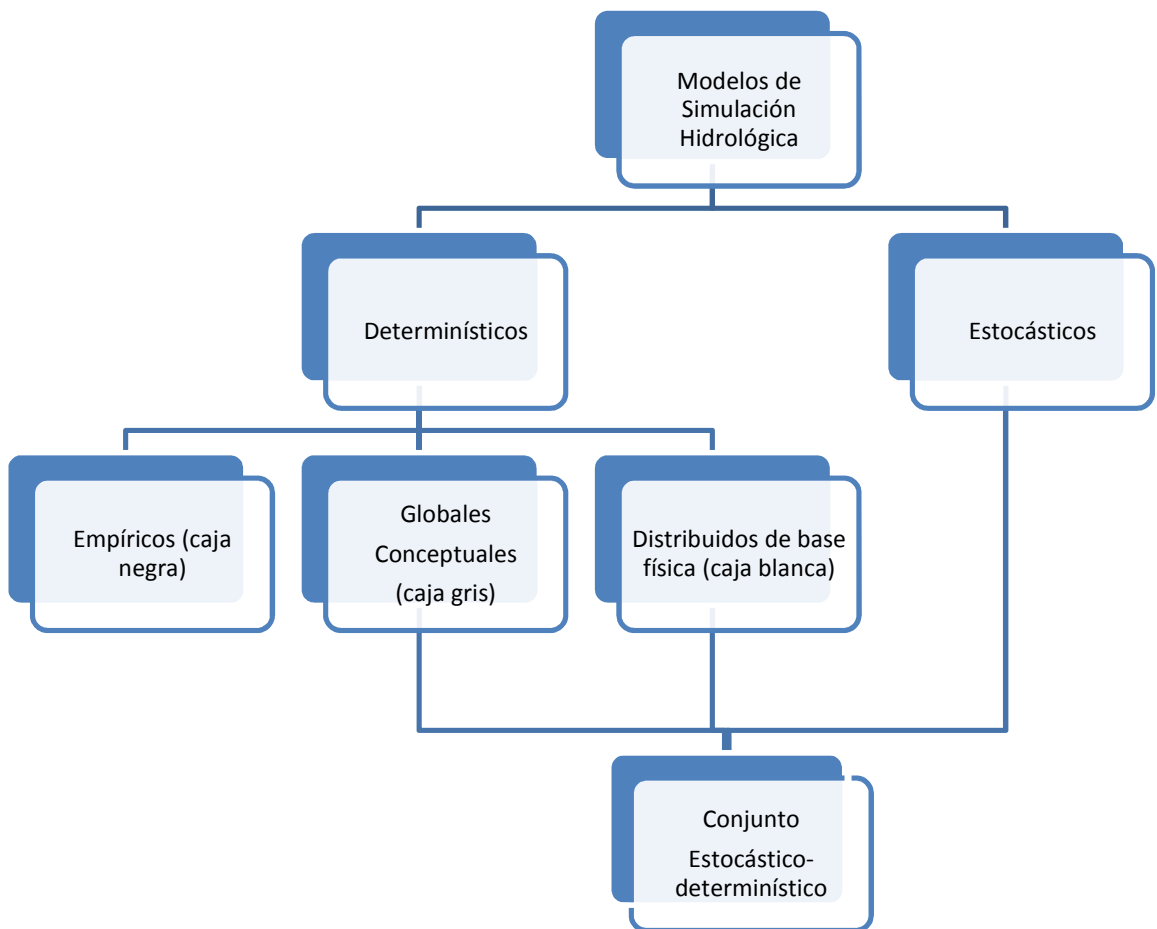
En la mayoría de las modelaciones de este tipo, algunos procesos se describen mediante ecuaciones diferenciales basadas en leyes hidráulicas simplificadas,

mientras que otros se expresan con ecuaciones algebraicas empíricas. (Singh, 1995).

- b) Modelación distribuida: se considera la variabilidad de los parámetros espacial y temporalmente, en las entradas, las condiciones de frontera y las características del sistema. Los modelación distribuida requieren más información.

De acuerdo con el principio en el que se fundamenta la estructura del modelo, éste puede clasificarse como:

- a) Modelo empírico o de caja negra: toma en cuenta las observaciones o resultados, se basa en el análisis de la relación entre entradas y salidas de series. Ejemplo: Hidrograma unitario.
- b) Modelo conceptual o de caja gris: basado en el proceso físico observado en la cuenca. El significado físico de los parámetros no es del todo claro y es necesario estimar sus valores a través de la calibración.
- c) Modelo con base física o de caja blanca: proporciona una descripción del sistema hidrológico matemáticamente es decir, haciendo uso de ecuaciones del flujo de masa y momentum. En el caso de un modelo de cuenca es también un modelo distribuido. Abbot y Refsgaard, 1996.



Abbot y Refsgaard, 1996.

### Ilustración 2.2 Clasificación de los modelos hidrológicos.

Dependiendo de la presencia del comportamiento dinámico en el modelo, hay dos tipos:

- a) Modelo determinístico: modelo en el que una misma serie de datos y condiciones de entrada proporciona siempre un mismo resultado.
- b) Modelo estocástico: en éste interviene el factor probabilístico de forma implícita; una misma serie de datos y condiciones explícitas arrojan diferentes resultados. Prácticamente ningún modelo es puramente estocástico.

Otras clasificaciones pueden ser de acuerdo al tamaño de la cuenca que se modela, al uso de suelo o a los objetivos del modelo que podrían ser de planeación, gestión o predicción.

Cabe mencionar que el objetivo de un modelo determinístico es generalmente el pronóstico a corto plazo (*forecasting*), permitiendo, por ejemplo, hacer un análisis del comportamiento de una obra durante su operación. El modelo estocástico en cambio tiene, comúnmente, el objetivo de la predicción, presente cuando se busca evaluar el comportamiento a largo plazo del sistema hidrológico con la finalidad de diseñar algún tipo de obra relacionada. (Visser, 1972)

**Tabla 2.1 Clasificación de los modelos en relación a su evolución tecnológica**

<b>1a Generación 1950's</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Códigos computacionales con el objetivo principal de facilitar y acelerar los cálculos para aplicaciones sencillas de métodos numéricos.</li> </ul>
<b>2a Generación 1960's</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Se caracterizó por la construcción, aplicación y desarrollo de modelos en su mayoría realizados por universidades o institutos de investigación, para la solución de problemas específicos.</li> </ul>
<b>3a Generación 1970's</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Apuntaba a la realización de sistemas de modelación que tuvieran aplicación para la solución de problemas diversos mediante el mismo código.</li> </ul>
<b>4a Generación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Son productos de software "amigables" (incluye un menú, ayuda en línea, gráficas, de fácil instalación y transferencia) con el usuario que pueden ser utilizados por científicos e ingenieros.</li> </ul>
<b>5a Generación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tuvieron su comienzo con los sistemas de modelación diseñados para usuarios técnicamente capacitados no expertos.</li> </ul>

Basado en información de Abbot y Refsgaard, 1996.

La modelación como herramienta tecnológica, con aplicaciones dentro y fuera de la hidrología y la hidráulica ha tenido una evolución que se resume en cinco generaciones ver Tabla 2.1. La tercera de éstas surge en los años 70's con la hidrodinámica, mientras

que en hidrología el primer modelo distribuido basado en el comportamiento físico se llevó a cabo a principios de los 80's. (Abbot y Refsgaard, 1996).

## **2.2. Evolución de la modelación en hidrología**

Un modelo hidrológico, como lo conocemos hoy, se compone de un conjunto de varios modelos, cada uno dedicado al proceso de la información de una de las fases del ciclo hidrológico. El tipo de modelo que se desarrolle para la solución de un problema en particular depende generalmente de la disponibilidad de información. (Singh, 1995).

En la actualidad es difícil plantear un problema relacionado con los recursos hídricos, su gestión, planeación o protección en el que para su solución no se involucre un modelo. Lo anterior dista mucho de lo que los modelos hidrológicos representaban en sus inicios cuando los especialistas mostraban desconfianza hacia su utilidad y resultados.

### **2.2.1. Inicios de la modelación en hidrología.**

El inicio de la modelación hidrológica se ubica en 1850 con la fórmula racional, para la cual se han encontrado aplicaciones para el diseño de alcantarillas en el s. XIX (Todini, 2007).

En 1932 Sherman propuso el concepto de Hidrograma Unitario (Sherman, 1932), relacionando el escurrimiento directo y la precipitación en exceso; al año siguiente Horton desarrolló la teoría de infiltración para estimar la precipitación en exceso y el mejoramiento de la técnica de separación de hidrogramas y en 1939 (Horton, 1939) propone una fórmula semiempírica a partir de su investigación sobre el flujo superficial. Keulegan por su parte, en 1944 hizo una investigación teórica sobre flujo superficial y sugirió que sería apropiada la simplificación de las ecuaciones de lo que ahora se conoce como la onda kinemática; Izzard continuó con un análisis experimental. Posteriormente en 1945, Horton presentó un concepto de desarrollo de las formas de erosión y la generación de corrientes a partir de flujo superficial, trabajo en el que incluyó un conjunto de leyes, ahora conocidas como leyes de Horton, que constituyen la base de la geomorfología cuantitativa (Singh y Woolhiser, 2002).

Hoover y Hursh (1943), y Hursh (1944) reportan una importante generación de flujo de tormenta causada por una "forma dinámica de flujo subsuperficial". Roessel (1950) observó cambios dinámicos en el flujo de las orillas de las aguas subterráneas. A través de los años transcurridos desde la década de 1940, se llegó a lo que ahora se conoce como mecanismo de flujo subsuperficial, y ha derivado en una comprensión integral de la generación de caudales, de lo cual la teoría de Horton es sólo una parte (Singh y Woolhiser, 2002).

En el campo del estudio de la infiltración, Green y Ampt (1911) fueron pioneros, obteniendo una fórmula que se utiliza aún en el cálculo de la capacidad de infiltración. Cabe destacar las ecuaciones empíricas de Kostikov (1932) y Horton (1933, 1935, 1939, 1940), que se utilizan actualmente en algunos modelos de cuenca. Por su parte Richardson (1931) y Cummings (1935) realizaron trabajos sobre la descripción de la evaporación, mientras que Thornthwaite (1948) and Penman (1948) hicieron importantes contribuciones a los modelos de evapotranspiración. Utilizando el concepto de cuña y prisma de almacenamiento, Mc Carthy junto a un equipo, desarrolló el método de Muskingum para la definición de ruta del flujo 1934 -1935 (U.S Army Corps of Engineers, 1936). Este método se usa para la definición de rutas de inundación en varios modelos de cuenca (Singh y Woolhiser, 2002).

La fase subterránea del ciclo hidrológico fue investigada por Fair y Hatch (1933), quienes desarrollaron una fórmula para el cálculo de la permeabilidad del suelo. Por otro lado Jacob (1943, 1944), correlacionó los niveles de agua subterránea y precipitación en Long Island, N.Y. El estudio de las aguas subterráneas y la infiltración llevó al desarrollo de técnicas para la separación del escurrimiento base en un hidrograma (Barnes, 1940) .

Después de una larga pausa en el ámbito de la modelación del proceso lluvia-escurrimiento, una intensa actividad comenzó alrededor de mediados de la década de los 50's. Utilizando la teoría de sistemas lineales, Lighthill y Whitham (1955) desarrollaron la teoría de la onda kinemática para la definición de ruta de flujo en ríos de gran longitud. Esta teoría ahora es una herramienta de modelación de flujo superficial y otros procesos hidrológicos (Singh y Woolhiser, 2002).



Las contribuciones a la modelación en hidrología mencionadas hasta ahora, han tenido repercusiones en las aplicaciones actuales de la hidrología. Este conjunto de herramientas, al igual que las nuevas tecnologías como los sistemas de información geográfica, forma parte importante de lo que ahora se denomina modelos de cuenca, los que se describen a continuación.

### **2.2.2. Modelos de Cuenca**

En décadas más recientes se buscó desarrollar modelos complejos en donde se representen los componentes del ciclo hidrológico en forma individual, como el de Crawford y Linsley's Stanford Watershed Model (SWM) en 1962 (Crawford and Burges, 2004)

A principios de la década de los 70's el SWM se mejora y se convierte en Hydrocomp Simulation Program (HSP) que ya incluía las herramientas para la modelación de calidad del agua, y abre el paso para el desarrollo de modelos que consideran el impacto de fuentes de contaminación no puntual; prueba su utilidad en la modelación de la calidad y cantidad del recurso al ser aplicado en una cuenca de dimensiones considerables en Washington. El SWM fue el primer modelo que contemplaba la modelación del ciclo hidrológico integrando todos sus componentes, actualmente es el Hydrologic Simulation Program Fortran (HSPF), (Crawford and Burges, 2004).

En esta época también es que la *Environmental Protection Agency* patrocina el desarrollo de dos modelos: Agricultural Runoff Management (ARM) y Nonpoint Source (NPS), cuyo objetivo era ayudar al tratamiento de la contaminación generada a partir de la agricultura, la urbanización y otros usos de suelo (Donigian e Imhoff, 2006).

Durante las décadas de 1970 y 1980 se desarrollaron varios modelos en los que se observó un énfasis en aquellos con bases físicas.

El Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) es considerado el modelo estándar en el sector privado y público en Estados Unidos para el diseño de sistemas de drenaje, cuantificación del efecto del cambio de uso del suelo, entre otros. Para el pronóstico de inundaciones se utiliza el National Weather Service (NWS-RFS). Por su parte, la Environmental Protection Agency (EPA) ha adoptado el HSPF

y sus herramientas para el manejo de calidad del agua como modelo estándar (Singh V. P., Frevert D. K, 2006).

Otro de los modelos más importantes por su amplio uso y herramientas es HEC-RAS. Desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución de HEC-2 (1964), con varias mejoras con respecto al primero. (Tate E.C., 1999)

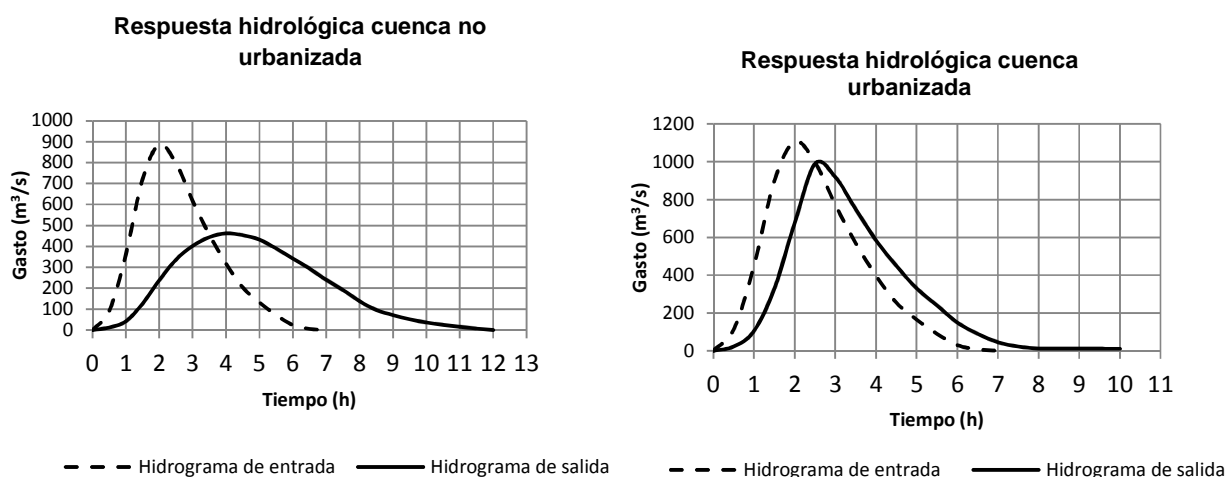
En Canadá se utiliza comúnmente el WATFLOOD para la modelación hidráulica. Por su parte en Australia para la predicción de inundaciones, diseño de drenaje y evaluación del efecto del cambio de uso de suelo, se utilizan los modelos RORB y WBN (Singh V. P., Frevert D. K, 2006) y en cuanto a la modelación de lluvia-escorrentía el SIMHYD es una de los más usados (Chiew, F.H.S. y L. Siriwardena, 2005).

En muchos países europeos los modelos de uso estandarizado son SHE y TOPMODEL, particularmente en Italia los modelos ARNO, LCS y TOPIKAPI son los más usados, en tanto que en los países escandinavos se utiliza el HBV.

El Tank Model y el Xin'anjiang son los modelos aceptados en Japón y China respectivamente. (Singh V. P., Frevert D. K, 2006).

### 2.3. Inundaciones y sus causas.

Una inundación puede definirse como un evento hidrológico caracterizado por grandes descargas o tirantes que se incrementan hasta provocar la ocupación temporal de cierta zona por el agua.



**Ilustración 2.3 Hidrogramas de entrada y salida en cuencas con diferente respuesta hidrológica.**

Puede deberse, entre otras causas, a precipitaciones intensas o de larga duración, falla de presas, terremotos, desbordamiento de cauces, torrentes de montaña y en zonas costeras, a cambios en el nivel del mar (van Alphen, et al., 2009).

El daño potencial de las inundaciones se ha incrementado, en parte debido a la concentración de la población en zonas urbanas que localizadas en zonas propensas a inundaciones, con la seguridad de que las obras de control les proporcionarán protección, ver Ilustración 2.3.

Generalmente, este tipo de obras están diseñadas para eventos de pequeña o mediana magnitud, por lo tanto los daños debidos a este tipo de inundaciones ha disminuido otros factores que contribuyen al incremento del riesgo de inundación son una mayor área impermeable (pavimentos y urbanización), la deforestación y la rectificación de canales. Las consecuencias directas son mayores coeficientes de escurrimiento, mayores gastos pico en menor tiempo (como respuesta a precipitaciones intensas), una rápida erosión del

terreno, desplazamiento de agua, sedimentos y otros materiales (Kundzewicz y Takeuchi, 1999), ver Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Factores que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones**

<b>Causas meteorológicas</b>	<b>Causas hidrológicas</b>	<b>Actividades humanas que incrementan el riesgo natural de inundación.</b>
Precipitación	Nivel de humedad del suelo	Cambios en el uso del suelo que incremente el escurrimiento y posiblemente acumulación de sedimentos.
Tormentas ciclónicas	Nivel freático previo a la tormenta	Ocupación de la planicie de inundación obstruyendo el flujo.
Tormentas pequeñas	Nivel de infiltración de la superficie	Ineficiencia o falta de mantenimiento de la infraestructura.
Temperatura	Presencia de cubierta impermeable	Alta eficiencia en el drenado en las zonas altas que incremente el gasto pico.
Nevadas y derretimiento	Forma y rugosidad de sección transversal de canales	Efectos del cambio climático en el régimen de precipitación e inundaciones.
	Presencia de flujo fuera de la sección transversal del cauce, red fluvial.	El microclima urbano puede propiciar los eventos de precipitación.
	Sincronización de escurrimiento desde varios puntos de la cuenca.	
	Marea alta que impide el drenaje.	

Fuente: WMO, 2008.

## **2.4. Clasificación de las inundaciones**

De acuerdo a su origen las inundaciones se clasifican en:

### **Inundaciones pluviales**

Se presentan como resultado de la precipitación, en terreno saturado cuando el agua de lluvia comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.

Su característica principal es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona. La República Mexicana es afectada por precipitaciones originadas por diferentes fenómenos hidrometeorológicos. En época de lluvias más intensas, de junio a octubre, éstas están asociadas con la acción de ciclones tropicales que afectan gran parte del territorio nacional, por otro lado durante el invierno los frentes fríos son la principal causa de precipitación.

A lo anterior se suma el efecto ejercido por las cadenas montañosas (*lluvia orográfica*), además del convectivo, que ocasiona tormentas de corta duración, poca extensión y gran intensidad (*lluvias convectivas*), (Salas S. y Jimenez E, 2007).

### **Inundaciones fluviales**

Originadas por el desbordamiento de los ríos cuando el agua cubre el terreno colindante, debido a que el volumen de escurrimiento excede la capacidad del cauce.

El volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, va en aumento junto con el área de aportación de la cuenca, por lo que las mayores inundaciones fluviales se presentarán en los ríos de mayor longitud, (Salas S. y Jimenez E, 2007). Dado lo anterior, a diferencia de las inundaciones pluviales, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes puede provenir de precipitaciones ocurridas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente de lluvia sobre la zona afectada.

### **Inundaciones costeras**

Sucedan debido a la presencia de marea alta y marea de tormenta, generadas 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. Estas provocan el cubrimiento de grandes extensiones de terreno. Al mismo tiempo, las mareas altas pueden impedir la descarga de los ríos y los sistemas de drenaje, causando inundaciones locales.

También pueden ser causadas, aunque con menor frecuencia, por tsunamis, provocados por los terremotos de gran alcance en alta mar (WMO, 2008).

### **Por falla de la infraestructura hidráulica**

Las inundaciones debidas a alguna falla de estructuras de control hidráulico son las de mayor peligrosidad. Puede ocurrir debido a un diseño escaso, errores en la operación, falta de mantenimiento o el fin de la vida útil de la obra.

Las inundaciones de este tipo han sido poco frecuentes. En 1976, el huracán *Liza* produjo lluvias extraordinarias que hicieron fallar uno de los bordos del arroyo *El Cajoncito*, afectando la ciudad de La Paz, en el estado de Baja California Sur; en 1973, la falla de la presa *El Conejo* y algunas otras represas pequeñas provocaron una inundación en la

zona del Bajío. Recientemente en 2003, la falta de mantenimiento, debido a la conclusión de la vida útil de la infraestructura, propició la falla de la presa *Dolores* en San Luis Potosí y la presa *El Capulín* en Zacatecas. (Salas S. y Jimenez E, 2007).

Según la duración, pueden clasificarse en (Ahmed, 2008):

### **Rápidas o dinámicas**

Tienen lugar en zonas con pendientes fuertes, como ríos de montaña, y se originan por lluvias intensas.

### **Lentas o estáticas**

Son las que dan origen a planicies o llanuras de inundación. Se originan debido a lluvias de larga duración aunque no intensas, que llevan a un aumento en el nivel del cauce hasta que este se desborda.

## **2.5. Riesgo y otros conceptos relacionados.**

El concepto de riesgo puede abordarse desde el punto de vista cualitativo o cuantitativo. Tomando en cuenta el primero se entiende por **Riesgo** la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una **amenaza**, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores.

Mientras que para expresarlo cuantitativamente se expresa como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos (CENAPRED, 2009).

$$R = f(P, V, E) \quad (2.1)$$

El **Peligro** se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

La forma más común de representar el carácter probabilístico del fenómeno es en términos de un **periodo de retorno** (o de recurrencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. El concepto de periodo

de retorno, en términos probabilísticos, no implica que el proceso sea cíclico, o sea que deba siempre transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. En ocasiones se utiliza también el inverso del periodo de retorno llamada **tasa de excedencia**, definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad. Para muchos de los fenómenos no es posible representar el peligro en términos de periodos de retorno, porque no ha sido posible contar con la información suficiente para este tipo de representación. En estos casos se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones de uso más común y de más utilidad para las aplicaciones en el tema específico (CENAPRED, 2009).

La **Vulnerabilidad** se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. En términos generales pueden distinguirse dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse en términos físicos, por ejemplo la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán, a diferencia de la segunda, que puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas (CENAPRED, 2009).

La vulnerabilidad física se expresa como una probabilidad de daño de un sistema expuesto y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños (CENAPRED, 2009).

La vulnerabilidad es una función de las siguientes características (Capobianco et al., 1999 y Klein and Nicholls, 1999):

- Resistencia: capacidad de resistir un cambio debido al fenómeno, en este caso hidrometeorológico.

- Resiliencia: capacidad para regresar al estado previo al evento, para el caso en estudio la inundación.
- Susceptibilidad: el estado físico actual, sin tomar en cuenta cambios temporales.

En un análisis de vulnerabilidad se recomienda tomar en cuenta los indicadores de la Tabla 2.3 :

**Tabla 2.3 Indicadores en un análisis de vulnerabilidad.**

Indicadores de susceptibilidad		Elementos en riesgo	Indicadores de exposición	
Unidades y sistemas ecológicos	Unidades y sistemas sociales y ecológicos	Personas, construcciones, producción, elementos culturales.	Características de la inundación	Exposición
Indicadores de Resiliencia	Sensibilidad en un sentido estricto, sensibilidad incluyendo capacidades de: preparación, hacer frente al desastre y recuperación.		Duración, velocidad, área de inundación, tirante, etc.	Proximidad a costa/río, elevación, frecuencia de inundaciones.
↓	↓	↓	↓	↓
EFFECTOS A LARGO PLAZO	GRADO DE DAÑO CAUSADO	UNIDADES AFECTADAS Y SU VALOR	SEVERIDAD DE LA INUNDACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LA INUNDACIÓN

La **Exposición o Grado de Exposición** se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas (CENAPRED, 2009).



Para el periodo de 1980 a 2008, por ejemplo, de acuerdo a la información reportada en EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, los países con mayor población expuesta (en número de habitantes) son los mencionados en la tabla siguiente:

**Tabla 2.4 Población promedio expuesta a inundaciones (1980-2008)**

<b>País</b>	<b>No. de Habitantes expuestos</b>
Bangladesh	19,279,960
India	15,859,640
China	3,972,502
Vietnam	3,403,041
Camboya	1,765,674
Indonesia	1,101,507
Tailandia	819,822
Filipinas	788,572
Paquistán	579,732
Myanmar	444,450
Estados Unidos	390,594
Nepal	333,224
Brasil	265,260
Rusia	233,320
Nigeria	226,622

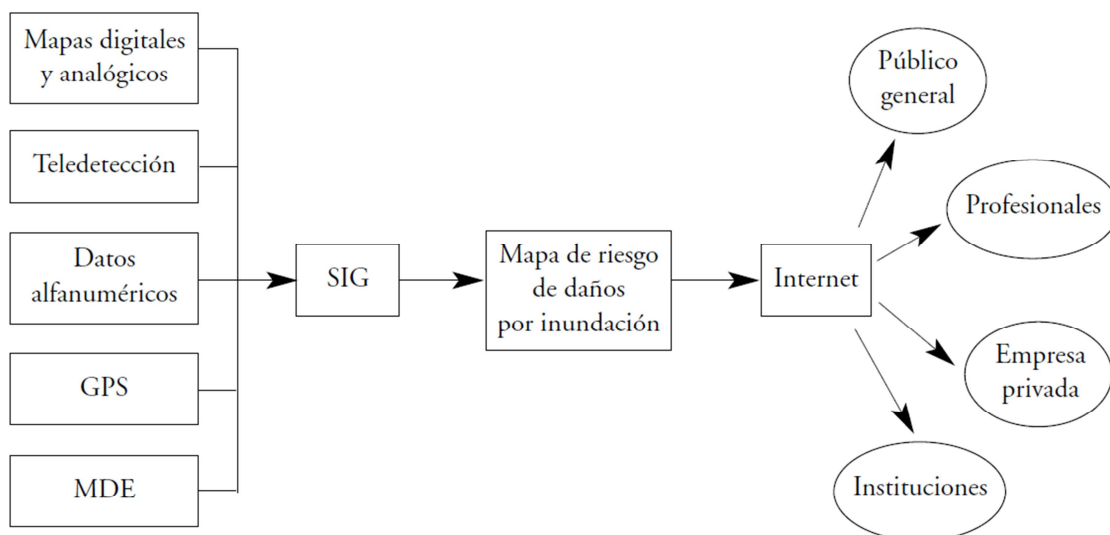
Fuente: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database.

Aunque la exposición y vulnerabilidad son determinantes para el efecto de un evento de inundación en la población, este también pudiera ser más o menos grave de acuerdo al tipo de inundación que se presente es decir, es de esperarse que la mortalidad sea mayor en el caso de una inundación dinámica. Por otro lado, también las condiciones como la presencia de sistemas de alerta o mejores condiciones de las viviendas pueden influir en las posibilidades de sobrevivencia de la población expuesta a un evento de inundación (Guha et al., 2010).

## **2.6. Modelación y la gestión del riesgo por inundaciones.**

En la planeación y operación de un sistema hidrológico, la utilización de un modelo de simulación depende en gran medida del propósito con el que se creó, ya sea para diseño, predicción o apoyo en la toma de decisiones.

Un ejemplo es el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en la gestión del riesgo por inundaciones, éstos permiten la combinación de variables correspondientes al fenómeno físico, como la vulnerabilidad, facilitando la elaboración del mapa de riesgo de daños por inundación. Son un instrumento de procesamiento de imágenes satelitales, las cuales pueden constituir otra fuente de información para la generación de mapas de inundación. Representa además, la posibilidad de generar infinidad de documentos cartográficos a partir de múltiples combinaciones de parámetros indicadores de la peligrosidad de una inundación, como tirantes, velocidades y tiempos de propagación, ver Ilustración 2.4.



Ribera Masgrau L., 2004

**Ilustración 2.4 Papel integrador de los SIG.**

Otros ejemplos de aplicaciones de la modelación en la gestión del riesgo de inundaciones son: pronóstico y alerta de inundaciones en tiempo real, estimación de frecuencias de inundación, rastreo y predicción de inundaciones, evaluación del impacto del cambio en el clima y uso de suelo y manejo integral de cuencas. (Moradkhani y Sorooshian, 2009). Un ejemplo específico de lo anterior es el uso de los modelos matemáticos como parte integral de los planes de protección contra inundaciones en la República Checa (Spatka et al. 2006).

Al conjuntar los SIG con modelos hidrológicos e hidráulicos, se obtiene un enfoque multidisciplinario que integra los conocimientos y criterios conocidos para la gestión del riesgo de inundaciones.

## **2.7. Mapas de riesgo de inundación**

Los mapas de riesgo de inundación, son útiles tanto para instituciones gubernamentales como privadas. En Estados Unidos y Canadá, existen varios programas nacionales de inundación, en los que la generación de mapas de riesgo es una actividad prioritaria. En 1968 el *National Flood Insurance Program* (NFIP) se lanzó en Estados Unidos, y en 1976 el *Flood Damage Reduction Program* (FDRP) tuvo sus inicios en Canadá (Moel et al., 2009).

En México, los tipos de mapas relacionados con fenómenos naturales y el riesgo que representan para la población generados por el Centro nacional de Prevención de Desastres, son los siguientes (CENAPRED, 2009):

### **Mapas de amenazas y recursos**

Esta información generalmente se circunscribe a localidades urbanas y la base cartográfica es un mapa que representa la traza urbana (localización y nombre de calles, avenidas, manzanas, colonias y tipo de infraestructura). Estos mapas se pueden elaborar a partir de dos fuentes: la primera, sobre mapas que tienen fines recreativos y de turismo, en los cuales se presenta la zonificación de regiones donde habitualmente se atienden emergencias, la segunda, emplea una base cartográfica formal y se destaca la presencia o ausencia de un fenómeno (amenaza), sin considerar la frecuencia e intensidad.

Aunque este tipo de planos generalmente no cuentan con características que permitan determinar su escala, proyección y simbología, sirven de apoyo para contar con una base cartográfica mínima. Su dimensión generalmente varía desde tamaño carta hasta planos de diferentes medidas.

## **Mapas de peligro**

Son mapas que representan la distribución de los fenómenos perturbadores de origen natural o antropogénico, basados en datos probabilísticos y/o estadísticos que conducen a la determinación de un nivel cuantitativo de la intensidad de algún fenómeno perturbador que existe en un lugar determinado. Los estudios pueden realizarse a distintas escalas y se basan principalmente en información obtenida del monitoreo, trabajo en campo, experimentación y su posterior análisis y modelación. Centros de investigación y diversas instituciones han elaborado mapas de peligro a nivel nacional, generalmente a escalas menores.

La representación de un peligro a través de un mapa asocia su distribución espacial (ubicación territorial y extensión) con su probabilidad de ocurrencia en un tiempo determinado (periodo de retorno). Estos mapas representan la intensidad del fenómeno de estudio mediante una clasificación asociada a una escala de colores, relacionándola con una base cartográfica, que puede ser una carta topográfica, la división estatal o municipal de la zona o elementos de infraestructura como vías de comunicación o presas.

## **Mapas de riesgo**

Para fines de protección civil el riesgo de desastres está claramente definido, entre otros por las Naciones Unidas, y en el capítulo I de este libro, que lo caracteriza como "el grado de pérdida previsto en un sistema determinado, debido a un fenómeno natural definido y en función tanto del peligro como de la vulnerabilidad". De acuerdo con la definición anterior, mapas de riesgo son aquellos que representan gráficamente en una base cartográfica, la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, su periodo de retorno e intensidad, así como la manera en que impacta en los sistemas afectables, principalmente caracterizados por la actividad humana (población, vivienda, infraestructura y agricultura).

### **2.7.1. Importancia de los mapas de riesgo**

El objetivo de un mapa de riesgo de inundación es identificar las zonas de acuerdo al riesgo estimado en cada una, cuantificar los daños potenciales bajo diferentes escenarios y posibilitar un análisis costo-beneficio que involucre diferentes propuestas de solución (Salas, 1999).

La frecuencia de las inundaciones a nivel mundial se ha incrementado notablemente en los últimos años, son una de las causas principales de numerosas pérdidas humanas y económicas. La creación de mapas de riesgo de inundación para la prevención de los daños causados por estos desastres naturales, es una práctica difundida sólo en algunos países de la Unión Europea y en Estados Unidos, donde actualmente son la base de la gestión del riesgo por inundaciones.

En la Unión Europea se consideran inundaciones de origen fluvial, en zonas costeras, por corrientes intermitentes, ríos de montaña y sistemas de drenaje. Por tal motivo se ha solicitado a los estados miembros que elaboren de planes de gestión de riesgo para 2015. Previo a esto, se les solicita una evaluación preliminar de riesgo en 2011 y para 2013 los mapas de riesgo (*flood hazard maps*) y de daños por inundación (*flood risk maps*), los cuales serán revisados cada seis años (Moel et al., 2009).

### **2.7.2. Estructuración de los mapas de riesgo**

En el *Handbook on good practices or mapping in Europe*, se presenta el siguiente cuadro donde se mencionan las principales características de los mapas de riesgo de inundación y los mapas de daños por inundación:

**Tabla 2.5 Características de los mapas de inundación**

	<b>Mapas de amenaza de inundación</b>	<b>Mapas de riesgo de inundación</b>
<b>Contenido</b>	Parámetros de inundación: Extensión de la inundación de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia. Inundaciones históricas Tirante Velocidad Velocidad de propagación Nivel de peligrosidad	Parámetros de riesgo como: Elementos expuestos Vulnerabilidad ante una inundación Daños probables Pérdidas probables
<b>Uso</b>	Planeación y gestión territorial Manejo de cuencas Planeación de manejo de cuencas Manejo de riesgo a nivel local Planeación y gestión de emergencia Planeación de medidas técnicas Prevención de daños a las construcciones	Base para el dialogo político Establecimiento de las prioridades Estrategias de gestión de riesgo pro inundación (prevención, mitigación) Prevención de daños a las construcciones
<b>Escala</b>	Nivel local: 1:5,000 a 1:25,000 incluyendo varios parámetros Nivel nacional: 1:50,000 a 1:1,000,000 en general sólo mostrando la extensión de inundación.	1:5,000 a 1:25,000  1:50,000 a 1:1,000,000
<b>Precisión</b>	Alta: nivel catastral para mapas detallados Baja: a nivel de cuenca, nivel nacional	Alta: nivel catastral para mapas detallados Baja: a nivel de cuenca, nivel nacional
<b>Grupo objetivo</b>	Planeación territorial, nacional, regional o local Gestores de eventos de inundación Servicios de emergencia Servicios forestales (gestión de cuencas) Público en general	Compañías aseguradoras Servicios de emergencia nacionales, regionales o locales Gestores de recursos hídricos y territorio a nivel nacional, regional o local

La disponibilidad de información es el primer requisito en la gestión del riesgo de inundaciones mediante la modelación. Puede presentarse una situación en que dicha información no sea suficiente o con el nivel de precisión aceptable y no debe esperarse obtener resultados de mejor calidad.

Al contar con la topografía, al nivel de detalle requerido de acuerdo a la extensión e importancia de los elementos expuestos, y la información hidrológica de la zona de interés, es posible generar los mapas de riesgo. Estos son ya, en lugares como Gran Bretaña y República Checa, la base para un plan de gestión.

### **3. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica aplicadas en la modelación de cauces.**

Los modelos hidráulicos tienen su fundamento en las ecuaciones básicas de la hidráulica. El modelo introduce ciertas hipótesis que simplifican el fenómeno, desechando los efectos menos importantes siendo así capaz de representarlo con expresiones matemáticas. A mayor número de hipótesis, menos generales son las ecuaciones resultantes. Por otro lado, a menor información requiera el modelo, conllevará una mayor incertidumbre.

Una vez que se han proporcionado los parámetros que describen el fenómeno en su forma simplificada, el modelo utilizará algún método para la resolución de las ecuaciones en que se basa y así devolver al usuario valores que resumen el comportamiento del flujo, ya sea velocidad, tirante, dirección del flujo, etcétera.

#### **3.1. Modelos unidimensionales y Ecuaciones Saint Venant 1D**

Las hipótesis para un modelo unidimensional que tiene su base en las ecuaciones de Saint Venant son:

- Son despreciables las componentes de aceleración según las secciones transversales dada su pequeña magnitud respecto a la aceleración de la gravedad. Esta última determina una distribución de presiones esencialmente hidrostática, y una superficie libre aproximadamente nivelada en cada sección transversal. Por estas características el flujo se define como gradualmente variado. Se presenta en canales prismáticos, y excluye a flujos que presenten transiciones entre regímenes su subcrítico y supercrítico (salto hidráulico), meandros de gran curvatura, entre otros.
- Los efectos no disipativos de la turbulencia son despreciables es decir, que la turbulencia sólo se manifiesta como una resistencia efectiva, que en términos prácticos es una buena aproximación.
- La distribución de velocidades es uniforme en cada sección transversal.
- La pendiente del fondo es pequeña. Eso significa que el valor del ángulo en radianes con respecto al plano horizontal de referencia se aproxima al de su seno y tangente.

A partir de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento se obtienen las ecuaciones de Saint Venant en su forma no conservativa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V_x \frac{\partial h}{\partial x} = i_e \quad (3.1)$$

Donde

$\frac{\partial h}{\partial t}$	Variación del tirante en el tiempo (m/s)
$V_x$	Componente de la velocidad promediada en la altura (m/s)
$\frac{\partial h}{\partial x}$	Variación del tirante en la longitud (adimensional)
$i_e$	Intensidad de la precipitación en exceso (m/s)

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde

$S_{fx}$	Componente de pendiente de fricción (adimensional)
$S_{0x}$	Pendiente de fondo (adimensional)
$\frac{\partial h}{\partial x}$	Variación del tirante en la longitud (adimensional)
$\frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x}$	Aceleración convectiva (adimensional)
$\frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$	Aceleración local (adimensional)

(O'Brien J.S., 2009).

### 3.2. Modelos bidimensionales y las ecuaciones de Saint-Venant 2D

Las ecuaciones de Saint Venant para dos dimensiones (conocidas como 2D *shallow water equations* o ecuaciones de aguas someras), son obtenidas integrando en la dirección del tirante y promediando las velocidades en  $xy$ , las ecuaciones de aguas someras 3D, a su vez provienen de las ecuaciones de Navier Stokes.

La ventaja sobre un modelo 3D de estas ecuaciones integradas a lo largo del tirante de flujo, es el tiempo de cálculo computacional. Además ciertas hipótesis en los modelos de aguas someras pueden mejorar algunos resultados. Este es el caso de un estudio del flujo en aguas someras alrededor de islas cónicas llevadas a cabo por Lloyd y Stansby (1997),



donde se demostraba que existen casos donde el modelo 2D daba resultados más precisos que el 3D. Algunos autores atribuyen estos resultados a que en un modelo 2D el mezclado vertical es instantáneo, mientras que en uno 3D depende del modelo de turbulencia utilizado (Almagro, 2009).

### 3.2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

Para la obtención de las ecuaciones de Navier Stokes se considera un volumen de control infinitesimal, sobre el cual se aplica la Segunda Ley de Newton, la cual establece que la suma de estas fuerzas es igual a su masa, multiplicada por la aceleración que experimenta el volumen de control ( $F=ma$ ). Para esto es necesario considerar las fuerzas que se oponen al movimiento, las cuales desarrollan un trabajo mecánico equivalente a la energía disipada al vencer dichas fuerzas.

Las fuerzas que interactúan sobre dicho volumen son fuerzas de superficie (viscosidad y presión), que se aplican desde el exterior hacia el volumen de control; y las fuerzas de cuerpo o fuerzas másicas (que pueden ser de cualquier tipo), pero en general serán fuerzas debidas al peso del volumen de control aplicadas en su centro de gravedad ( $g$ ).

La segunda Ley de Newton Las ecuaciones escalares de Navier-Stokes se presentan a continuación:

$$\rho f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \vec{V}) = \rho a_x \quad (3.3)$$

$$\rho f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\nabla \cdot \vec{V}) = \rho a_y \quad (3.4)$$

$$\rho f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\nabla \cdot \vec{V}) = \rho a_w \quad (3.5)$$

Donde:

$\rho$  Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $f_x, f_y$  y  $f_z$  Fuerzas de cuerpo  $\vec{g} = g_x \hat{i} + g_y \hat{j} + g_z \hat{k}$

$\frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}$  y  $\frac{\partial P}{\partial z}$  Variación de presión en sentido  $x, y$  y  $z$

$\mu$  coeficiente de viscosidad dinámica o viscosidad absoluta ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{Laplaciano de } u$$

$a_x$       Aceleración del volumen de control en el sentido  $x$  (m/s<sup>2</sup>)  
 $a_y$       Aceleración del volumen de control en el sentido  $y$  (m/s<sup>2</sup>)  
 $a_z$       Aceleración del volumen de control en el sentido  $z$  (m/s<sup>2</sup>)

Y en su forma vectorial:

$$\rho \vec{f} - \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3} \nabla(\vec{V} \cdot \nabla) = \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (3.6)$$

Dividiendo por  $\rho$

$$\vec{f} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3\rho} \nabla(\vec{V} \cdot \nabla) = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (3.7)$$

Donde:

$\vec{f}$	Fuerza másica (m <sup>2</sup> /s)
$\frac{1}{\rho} \nabla P$	Efecto acelerador de un gradiente de presiones (m <sup>2</sup> /s)
$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{V}$	Efecto retardador de la viscosidad del fluido (m <sup>2</sup> /s)
$\frac{\mu}{3\rho} \nabla(\vec{V} \cdot \nabla)$	Efecto de la compresión o expansión del fluido (m <sup>2</sup> /s)
$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$	Aceleración convectiva (m/s <sup>2</sup> )
$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$	Aceleración por transporte (m/s <sup>2</sup> )

### 3.2.2. Ecuaciones de Saint-Venant 2D

Las ecuaciones de Navier-Stokes son válidas para todo el tiempo y deberían ser suficientes para la resolución de un problema del movimiento de un fluido, pero su resolución analítica resulta imposible a nivel práctico. Por tanto, estas ecuaciones se transforman en una expresión simplificada. Esto se realiza promediándolas en el tiempo o en el espacio. En el primer caso se llega a una solución estacionaria que sólo depende de las coordenadas y se da origen a las ecuaciones promediadas de Reynolds, en el segundo se integra en la longitud del tirante de flujo obteniendo las ecuaciones de Saint Venant para dos dimensiones, que a continuación se presentan en su forma conservativa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\bar{v}) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y} (h\bar{u}\bar{v}) = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} [\tau_{sx} - \tau_{bx} + F_x] \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\bar{v}^2) = -gh\frac{\partial\zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} [\tau_{sy} - \tau_{by} + F_y] \quad (3.10)$$

Donde:

$h$	Tirante (m)
$\bar{u}$	Componente $x$ de velocidad media en la altura (m/s)
$\bar{v}$	Componente $y$ de velocidad media en la altura (m/s)
$-g$	Gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$\zeta$	$\zeta$ (t, x, y) elevación de la superficie libre (m)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_{sx}$	Esfuerzo cortante en la superficie libre (kg/m <sup>2</sup> )
$\tau_{bx}$	Esfuerzo cortante en el fondo (kg/m <sup>2</sup> )
$\tau_{sy}$	Esfuerzo cortante en la superficie libre (kg/m <sup>2</sup> )
$\tau_{by}$	Esfuerzo cortante en el fondo (kg/m <sup>2</sup> )
$F_x$	Fuerzas de superficie en el sentido $x$ (N)
$F_y$	Fuerzas de superficie en el sentido $y$ (N)

### 3.3. Dimensionalidad y resolución en modelos hidráulicos

Como se ha descrito anteriormente la base de la modelación en hidráulica son las ecuaciones básicas como la de continuidad, momentum, y aquellas más complejas que de ellas se derivan. Estas ecuaciones y sus métodos de solución son lo que da lugar a modelos de menor o mayor complejidad de acuerdo al grado de simplificación del comportamiento del flujo que asumen.

#### 3.3.1. Clasificación de los modelos por su dimensionalidad

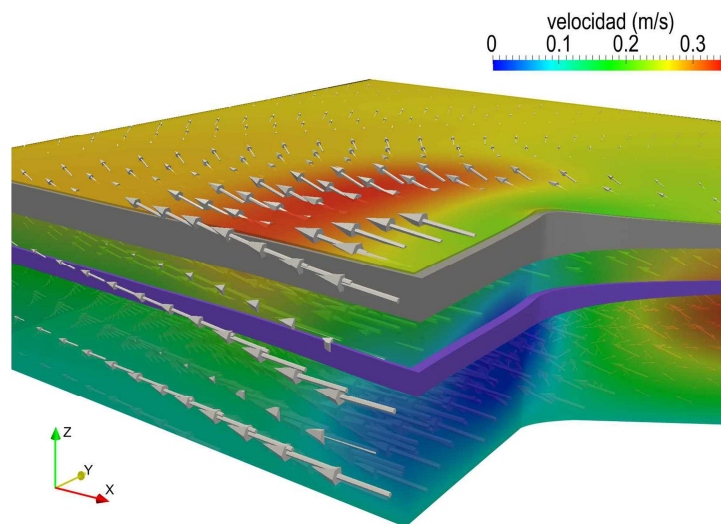
De acuerdo a las dimensiones del flujo que un modelo analiza podemos clasificarlo como (Vásquez, 2003):

**Modelo unidimensional (1D):** la hipótesis principal de simplificación es que una de las dimensiones del flujo domina sobre las otras dos. Para el caso de canales o ríos poco meandrosos esta dimensión es la longitudinal a lo largo de su eje. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, para cada una de estas secciones se asigna un único valor medio de velocidad, no se consideran variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Se

considera que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Este tipo de modelo ofrece resultados satisfactorios en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a veinte veces el ancho.

**Modelo bidimensional (2D):** este tipo de modelo considera dos dimensiones del plano horizontal (x, y) para el flujo. Las variaciones de la velocidad por ejemplo, se promedian verticalmente y se presenta como un único valor ese promedio. Estos modelos son especialmente útiles en flujos en áreas extensas como planicies de inundación donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso se les llama también modelos de aguas someras o poco profundas.

**Modelo tridimensional (3D):** ofrece la modelación más completa y detallada hasta ahora. Considera las tres componentes espaciales de la velocidad, y un modelo de este tipo es aplicable a cualquier caso práctico, presenta limitantes asociadas al nivel de información que requieren y al esfuerzo computacional presentado, ver Ilustración 3.1.



**Ilustración 3.1 Modelo tridimensional.**

Al hablar de dimensionalidad, aun cuando la capacidad de un modelo que analiza el flujo en tres dimensiones es el más completo, podemos concluir que no siempre es necesaria su aplicación. En casos como los mencionados, donde un modelo unidimensional ofrece

resultados calibrados con los registros reales, invertir más tiempo y recursos de modelación significaría sobreestimar las necesidades.

### **3.3.2. Descripción general de métodos de resolución de los modelos hidráulicos**

La eficiencia de un modelo computacional en hidráulica depende directamente del método de solución aplicado a las ecuaciones con las que describe el comportamiento del flujo, entre otros factores.

Los modelos unidimensionales llevan a cabo la resolución a través de la discretización mediante secciones transversales, aplicando un método de cálculo por fases: se calcula el balance energético de sección y se procede a la siguiente, hasta finalizar. En caso de que no haber convergencia en una sección, el modelo supone el tirante crítico y continúa con la siguiente. Un ejemplo de ello, es el modelo HEC-RAS.

Por su parte los modelos 2D y 3D, cuyo desempeño implica la resolución de ecuaciones diferenciales para las cuales no existen en la mayoría de los casos de aplicación soluciones analíticas, requieren de una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos de solución más utilizados son el Método de Elementos Finitos (MEF), el Método de Diferencias Finitas (MDF) y más recientemente el Método de Volúmenes Finitos (MVF). Estos métodos resuelven las ecuaciones de dominio continuo mediante la solución en un número finito de puntos discretos (celdas de la malla). Cuando los valores buscados en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante una interpolación.

La solución simultánea que se requiere para todos los nodos del dominio, incrementa la carga computacional y por lo tanto el tiempo de modelación, sumándose además el efecto de los criterios de convergencia y estabilidad que se deben cumplir con el fin de dar resultados confiables.

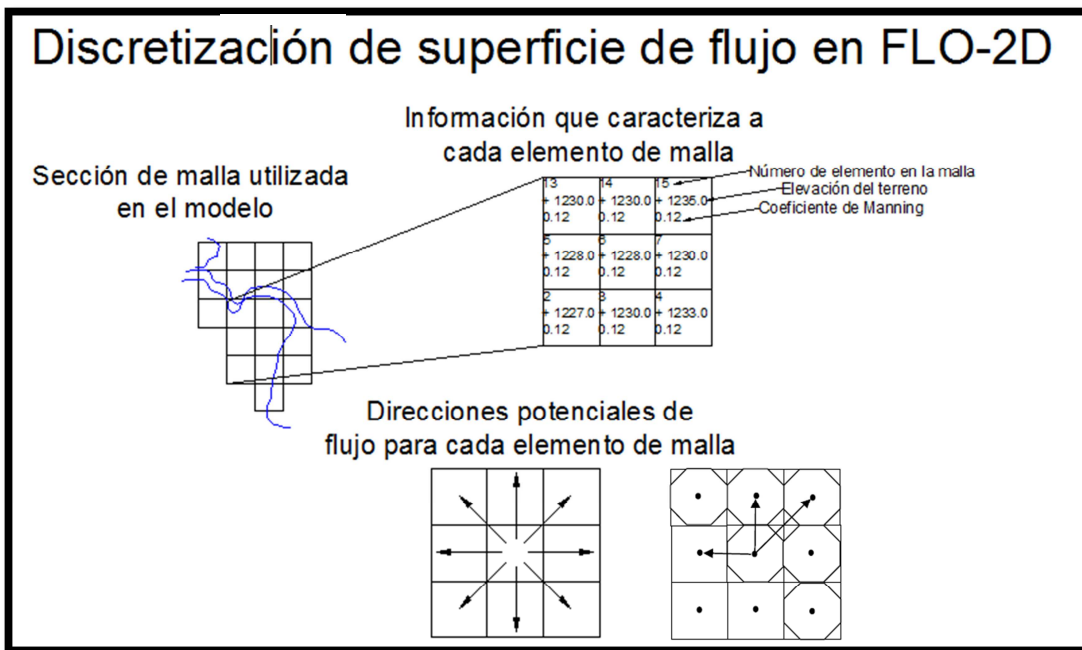
### **3.4. Método de resolución del modelo FLO-2D**

Dado que se emplea en el presente trabajo de tesis, a continuación se describe el método de solución del modelo FLO-2D para las ecuaciones de un esquema central de

diferencias finitas. Este algoritmo explícito resuelve la ecuación de momentum para la velocidad de flujo a través de la frontera de cada elemento de malla para un elemento a la vez. Además, para el cálculo de la velocidad, utiliza también la ecuación de onda difusiva.

Los esquemas de diferencias finitas pueden requerir cálculos computacionales de larga duración, principalmente para simular elevaciones bruscas o elevaciones de la onda de inundación en tiempos prolongados, canales con secciones transversales muy variables, cambios de pendiente abruptos o discontinuidades en el flujo y cuerpos de agua.

Como se mencionó anteriormente la discretización se hace mediante una malla, ésta se localiza en el plano  $x-t$ . La malla  $x-t$  es una red de puntos definida al tomar incrementos de distancia de longitud  $\Delta x$  e incrementos de tiempo de duración  $\Delta t$ . A cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad ( $n$  de Manning) y factores de reducción del flujo que atraviesa la celda, ver Ilustración 3.2 .



**Ilustración 3.2 Discretización en el modelo FLO-2D**

Los esquemas numéricos utilizados en la modelación transforman las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas de diferencias finitas. El método de diferencias finitas del modelo FLO-2D emplea un esquema explícito, que requiere de valores pequeños de  $\Delta x$  y  $\Delta t$  para la convergencia del procedimiento numérico. En este se incluye el cálculo de la descarga a través de cada frontera en las ocho direcciones potenciales de flujo e inicia con una estimación lineal del tirante en la frontera de la celda. El modelo considera, de manera precisa para el análisis, una forma octagonal para cada celda, ver Ilustración 3.2. Las estimaciones no lineales del tirante en la frontera se intentaron en versiones previas del modelo, pero no mejoraron significativamente los resultados.

Otros parámetros hidráulicos también se promedian entre los dos elementos de malla para calcular la velocidad del flujo son la resistencia al flujo (coeficiente de Manning), área de flujo, pendiente, elevación de la superficie del agua y perímetro mojado. Usando el área de flujo promedio entre dos elementos, la descarga para cada salto de tiempo se determina multiplicando la velocidad por el área.

Para resolver la ecuación de la velocidad de flujo en la frontera de una celda, inicialmente se calcula la velocidad con la ecuación de onda difusiva usando la pendiente promedio de la superficie del agua (pendiente del lecho más gradiente de presión). Esta velocidad se utiliza como primera estimación en el método Newton-Raphson para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica (James, et. Al., 1977). Se aplica la ecuación de Manning para el cálculo de la pendiente de fricción. Si la solución por el método de Newton-Raphson no converge después de 3 iteraciones, el algoritmo por defecto da la solución proveniente de la ecuación de onda difusiva.

La descarga a través de la frontera del elemento como ya se mencionó, se calcula multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal de flujo. Se calcula la descarga en las ocho direcciones, ver Ecuación 3.12, el cambio neto en la descarga (suma de la descarga en las ocho direcciones de flujo) dentro o fuera del elemento de malla. Posteriormente se multiplica por el intervalo de tiempo para determinar el cambio neto de volumen de agua en el elemento de malla. Este cambio neto del volumen se divide entre el área de la superficie disponible en el elemento de malla, obteniendo el incremento o decremento en el tirante ( $\Delta h$ ) para un intervalo de tiempo.

En un canal la integración se realiza esencialmente en la misma forma, excepto que el tirante es una función de la geometría de la sección transversal del canal y usualmente hay solo una celda aguas arriba y otra aguas abajo para intercambio de gasto.

En resumen, el algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos:

1. Se calculan la geometría de flujo promedio, la rugosidad y pendiente entre dos elementos de malla.
2. Se estima un tirante de flujo  $h$  para calcular la velocidad a través de la frontera entre celdas para el siguiente intervalo de tiempo  $(i + 1)$ , eso se hace usando el intervalo anterior  $i$  mediante una estimación lineal (el tirante promedio de dos celdas).

$$h_x^{i+1} = h_x^i + h_{x+1}^i \quad (3.11)$$

Donde:

$h_x^{i+1}$	Tirante estimado para el intervalo $i + 1$
$h_x^i$	Tirante promedio de celda $x$
$h_{x+1}^i$	Tirante promedio de celda $x + 1$

3. Se calcula un primer valor de la velocidad a partir de la ecuación de onda difusiva. Esto se aplica para flujo superficial, en un canal o en una calle.
4. La velocidad calculada a partir de la ecuación de onda difusiva se usa como valor inicial en el método de Newton-Raphson para resolver la ecuación de onda dinámica.
5. La descarga  $Q$  a través de la frontera se calcula multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal. Para flujo superficial, el ancho de flujo se ajusta mediante los factores de reducción de ancho (WRFs).
6. Se suman los incrementos de descarga para el intervalo a través de las ocho fronteras

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad (3.12)$$

Y el cambio en el volumen (descarga neta por intervalo) se distribuye en las áreas de almacenamiento disponible en la malla o en los elementos de canal para



determinar el incremento en el tirante. Donde  $\Delta Q_x$  es el cambio en la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación para cada elemento de malla para el intervalo  $\Delta t$  entre el tiempo  $i$  e  $i + 1$

$$\Delta h_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / Area \quad (3.13)$$

7. El criterio de estabilidad numérica se checa para el tirante del nuevo elemento de malla. Si es excedido, el tiempo de simulación se reinicia al tiempo de simulación anterior, se reduce el incremento de cada intervalo, todos los cálculos previos se descartan y la simulación comienza nuevamente.
8. La simulación avanza con intervalos crecientes hasta que se exceda el criterio de estabilidad.

En la secuencia de cálculo, el flujo de entrada y precipitación del sistema de malla se calculan primero, y posteriormente el flujo en el canal. A continuación, si están presentes en el modelo se calcula la descarga en las calles y finalmente, se determina el flujo superficial en las ocho direcciones.

Después de que toda la simulación para el flujo de estos componentes se ha completado, el criterio de estabilidad numérica se prueba para cada celda de la malla en la planicie de inundación, canal o calle. Si se excede el criterio para cualquier elemento, el intervalo se reduce mediante varias funciones dependiendo del historial de estabilidad y el cómputo se reinicia. Si se cumple todo criterio de estabilidad, se incrementa el intervalo de tiempo para la siguiente simulación.

Todo el volumen de entrada, volumen de salida, cambio en almacenamiento o las pérdidas en el sistema de malla se suman al final de cada intervalo y se calcula el volumen de conservación. Se escriben los resultados en los archivos de salida o en pantalla usando el tiempo de intervalo definido por el usuario.

## Estabilidad numérica

El esquema de simulación para inundación de FLO-2D procede sobre la base de que el intervalo es suficientemente pequeño para asegurar estabilidad numérica. La clave para eficientar la simulación de inundación por diferencias finitas es que el criterio de estabilidad numérica limita el intervalo, pero permite intervalos lo suficientemente largos para completar la simulación en un tiempo razonable.

El criterio de estabilidad numérica se revisa en cada elemento de la malla y en cada intervalo, así se asegura que la solución sea estable. Si el criterio de estabilidad numérica es excedido, el intervalo se disminuye y todos los cálculos previos a este se desechan.

La mayoría de los esquemas explícitos están sujetos a la condición Courant-Friedrich-Lewy (CFL), condición de estabilidad numérica (Jin and Fread, 1997). La condición CFL relaciona la celeridad de la onda de inundación con el tiempo de modelación y los incrementos espaciales. La interpretación física de la condición CFL es que una partícula de fluido no deberá viajar más que un incremento  $\Delta x$  en un intervalo  $\Delta t$  (Fletcher, 1990). FLO-2D utiliza la condición CFL para flujo en planicies de inundación, canal y calles. El intervalo  $\Delta t$  está limitado por:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{\beta v + c} \quad (3.14)$$

donde:

- $C$  Número Courant ( $0.3 < C < 1.0$ , adimensional)
- $\Delta x$  ancho del elemento de malla (m)
- $v$  velocidad promedio calculada de la sección transversal (m/s)
- $\beta$  coeficiente (5/3 para un canal ancho, adimensional)
- $c$  celeridad de onda calculada (m/s)

El modelo FLO-2D utiliza para el coeficiente  $C$  un valor de 1.0 que permite tener el intervalo mayor. Cuando  $C$  se define como 1.0, la difusividad artificial o numérica es teóricamente cero para una ecuación lineal convectiva (Fletcher, 1990).

Para modelación mediante onda dinámica, se aplica otro criterio de estabilidad numérica que fue desarrollado por Ponce y Theurer (1982). Este criterio es una función de la pendiente del lecho, la descarga específica y el tamaño del elemento de malla. Se expresa como:

$$\Delta t < \frac{\zeta S_0 \Delta x^2}{q_0} \quad (3.15)$$

donde:

- $\Delta x$  ancho del elemento de malla (m)
- $q_0$  descarga unitaria (m<sup>3</sup>/s/m)
- $S_0$  pendiente del lecho (adimensional)
- $\zeta$  Coeficiente de estabilidad dinámica  
Con un valor entre 0.10 y 1.00 (valor típico = 0.25) hace al proceso de modelación más lento pero numéricamente más estable.  
Cuando tiene un valor de 100 o mayor el criterio de estabilidad numérica se desactiva.

El coeficiente fue creado como variable única para el elemento de malla y el modelo lo ajusta durante la simulación dentro de un rango establecido por el usuario. Es similar al criterio CFS, cuando se excede la estabilidad numérica, se descartan los cálculos hidráulicos para este intervalo y se reduce el intervalo.

Antes de que se evalúe el criterio de estabilidad numérica CFL y de la ecuación de onda dinámica durante la simulación, se revisa el cambio en porcentaje del tirante desde el intervalo anterior para una celda dada. Este cambio en porcentaje se usa para excluir la necesidad de cualquier análisis de estabilidad adicional. Si el cambio en porcentaje del tirante es mayor que el definido por el usuario, el intervalo se reduce y todos los cálculos hidráulicos para ese intervalo se anulan. Si la estabilidad numérica no se cumple de acuerdo a los tres criterios, no se mantendría el volumen de conservación a través de varios intervalos y el modelo generaría o perdería volumen de fluido.

Los intervalos generalmente van de 0.1 a 30 segundos. El modelo inicia con el mínimo intervalo y lo incrementa hasta que se excede uno de los tres criterios de estabilidad, y entonces se disminuye. Si el criterio continúa siendo excedido, el intervalo se reduce

hasta alcanzar un mínimo. Si este mínimo intervalo no es lo suficientemente pequeño para conservar el volumen o mantener la estabilidad numérica, entonces el intervalo mínimo puede reducirse, los coeficientes de estabilidad numérica pueden ajustarse o los datos de entrada pueden modificarse. Los intervalos están en función del flujo de descarga para un elemento de malla dado y su tamaño. Los elementos pequeños con un hidrograma de tiempo pico pequeño y un gasto pico grande, requieren de intervalos pequeños. La precisión no se ve comprometida si se utilizan intervalos pequeños, pero el tiempo de simulación puede ser muy grande si la malla es muy fina (O'Brien J.S., 2009).

Es importante resaltar que el modelo que incluye FLO-2D, es de tipo cuasi-bidimensional, ya que resuelve la ecuación dinámica de manera unidimensional para cada dirección potencial de flujo en cada celda en forma independiente para cada una.

## **4. Selección de los sitios de estudio.**

En temporada de huracanes o tormentas tropicales, las precipitaciones extremas ocurridas en la República Mexicana suelen producir severos daños a la población y a la infraestructura hidroagrícola, ganadera y de vías de comunicación, así como a las diversas actividades económicas, en el norte, centro y sur del país, especialmente y con mayor impacto en las zonas vulnerables de alto riesgo como la zona costera de Chiapas.

Debido a la vulnerabilidad de esta zona, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Organismo de Cuenca Frontera Sur, atendiendo a uno de los ocho objetivos nacionales establecidos en el Programa Nacional Hídrico, que expresa "Prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos", ha resuelto la necesidad de invertir para desarrollar el estudio que permita definir las acciones para mitigar los daños por inundación causados en la región del Soconusco.

### **4.1. Condiciones físicas de la zona**

El municipio de Tapachula limita al norte con Motozintla, al este con Cacahoatán, Tuxtla Chico, Frontera Hidalgo y Suchiate, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Huehuetán, Tuzantán y Mazatán. Las coordenadas de la cabecera municipal son: 14° 54' 29" de latitud norte y 92° 15' 38" de longitud oeste, con una altitud de 170 metros sobre el nivel del mar. Tiene una extensión territorial de 857.0 km<sup>2</sup>, y abarca parte de las zonas sujetas a conservación ecológica: El Cabildo Amatán, El Gancho Murillo y Volcán Tacaná.

El Municipio de Mazatán está localizado en la Llanura Costera del Pacífico, y no cuenta con ninguna barrera natural que lo proteja de inundaciones. Sus coordenadas geográficas son 14° 52' N y 92° 27' W., y su altitud es de 20 m.s.n.m. Su extensión territorial es de 382.6 km<sup>2</sup> que representa el 0.50% de la superficie del estado y el 0.02 % del territorio Nacional. Sus límites son al norte Huixtla y Huehuetán, al este Tapachula y al suroeste el océano Pacífico.

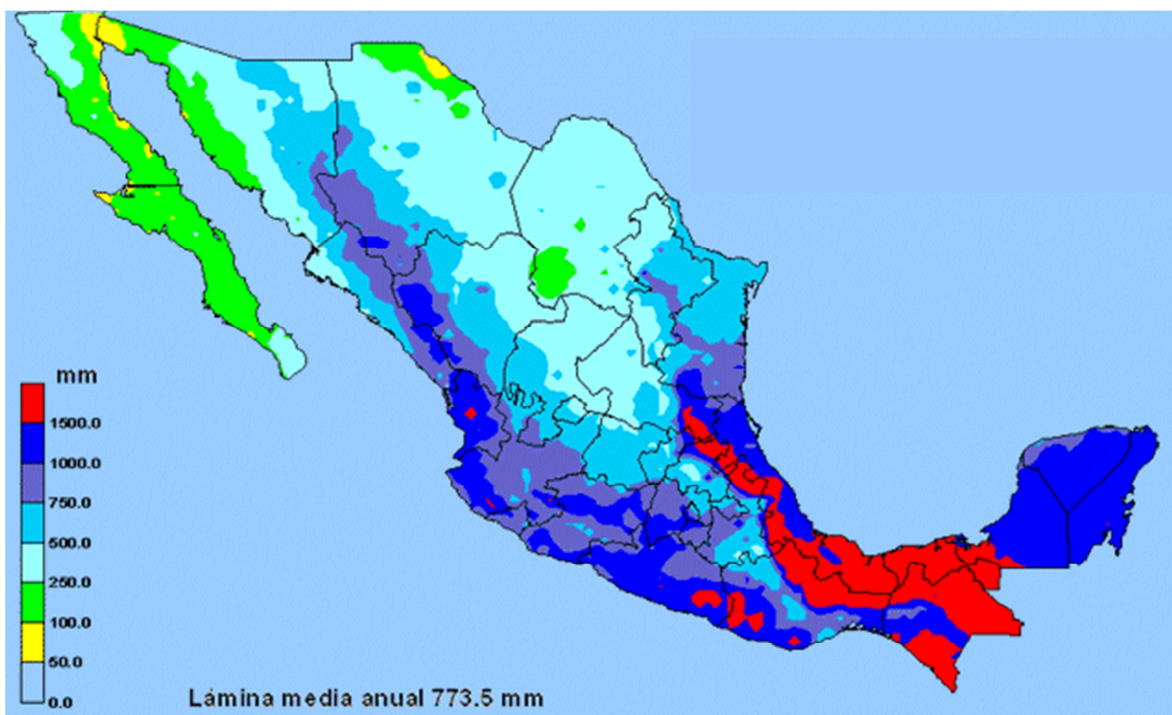
### ***Clima y precipitación***

Los climas existentes en los municipios de Tapachula y Mazatán son: Aw0(w) cálido subhúmedo con lluvias en verano; Am(f) cálido húmedo con lluvias en verano; (A)C(m)(w) semicálido húmedo con lluvias en verano y C(m)(w) templado húmedo con lluvias en verano.

En los meses de mayo a octubre, la temperatura mínima promedio va de los 9°C a los 22.5 °C, mientras que la máxima promedio oscila entre 18°C y 34.5°C. En el periodo de noviembre a abril, la temperatura mínima promedio va de 9°C a 19.5°C, y la máxima promedio fluctúa entre 18°C y por arriba de los 33° C.

En los meses de mayo a octubre, la precipitación media va desde los 1,200 mm y hasta más de 3,000 mm, y en el periodo de noviembre a abril, la precipitación media va de los 75 mm a 800 mm, ver Fuente: SMN

#### Ilustración 4.1.



Fuente: SMN

Ilustración 4.1 Precipitación media anual 1941-2005.

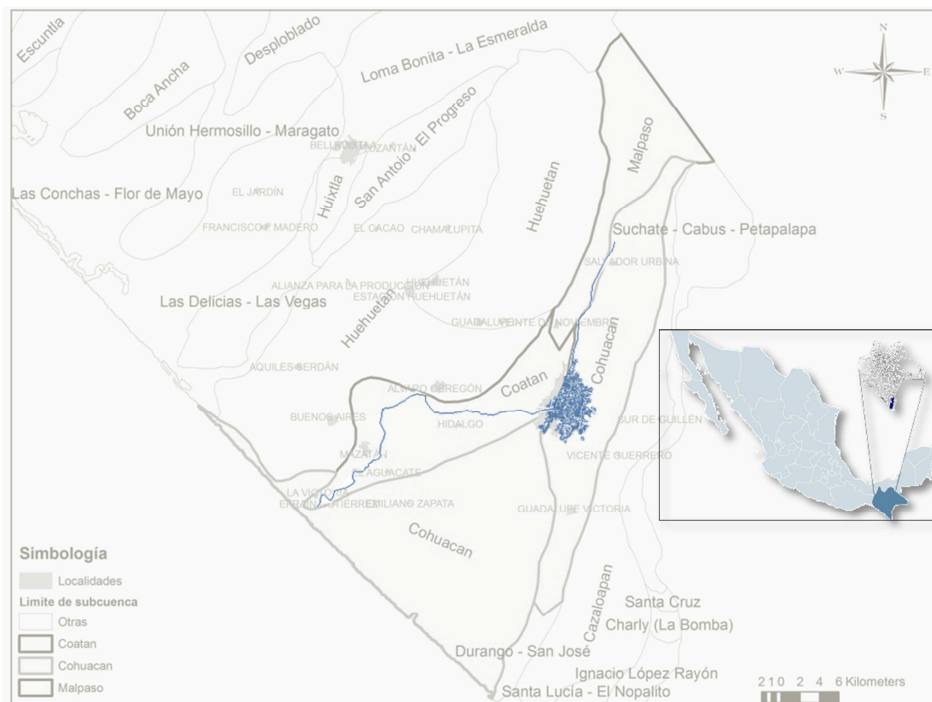
## 4.2. Condiciones hidrológicas de las cuencas de estudio

### 4.2.1. Cuenca del río Coatán

La cuenca del río Coatán se encuentra en la Región Hidrológica No. 23 llamada Costa de Chiapas. Tiene un área de 605 km<sup>2</sup>, nace en república de Guatemala y en su parte más

alta rebasa los 2,000 m.s.n.m., el río Coatán tiene una longitud de 77 km y desemboca en el Océano Pacífico.

En la Ilustración 4.2 se muestra la localización de la cuenca dentro de la región hidrológica.



**Ilustración 4.2 Localización de la cuenca del río Coatán.**

Esta región hidrográficamente está limitada al noroeste por la región hidrológica No. 22, concretamente por la cuenca del río Ostuta; al noreste con varios afluentes izquierdos del río Grijalva, todos ellos pertenecientes a la región hidrológica No. 30; hacia el sureste se encuentran las cuencas de corrientes pertenecientes a Guatemala, colindantes con el río Suchiate y al suroeste con el Océano Pacífico.

### ***Comportamiento hidráulico del cauce***

Uno de los principales problemas a controlar en el cauce es el arrastre de sedimentos, éste se debe en parte a que a través de su recorrido el cauce presenta pendientes fuertes, medias y bajas por lo cual tiene es de respuesta rápida a las precipitaciones, lo

que implica que su tiempo base así como el tiempo pico del hidrograma sean cortos, y al mismo tiempo presente un gasto pico grande.

Las condiciones anteriores son las que causan deslaves, procesos de erosión y transporte de material rocoso y de sedimentos de considerable importancia. Éstos pueden transformarse en avalanchas y provocar inundaciones en la parte baja de las cuencas.

Todo lo anterior lleva a la alteración del entorno natural de la parte alta y baja del cauce y a crear pendientes en dirección radial a la planicie costera, con depósito de los materiales granulares y finos, formando abanicos aluviales con los materiales arrastrados y depositados en la parte baja reduciendo la capacidad hidráulica del cauce.

#### 4.2.2. Cuenca del río Huehuetán

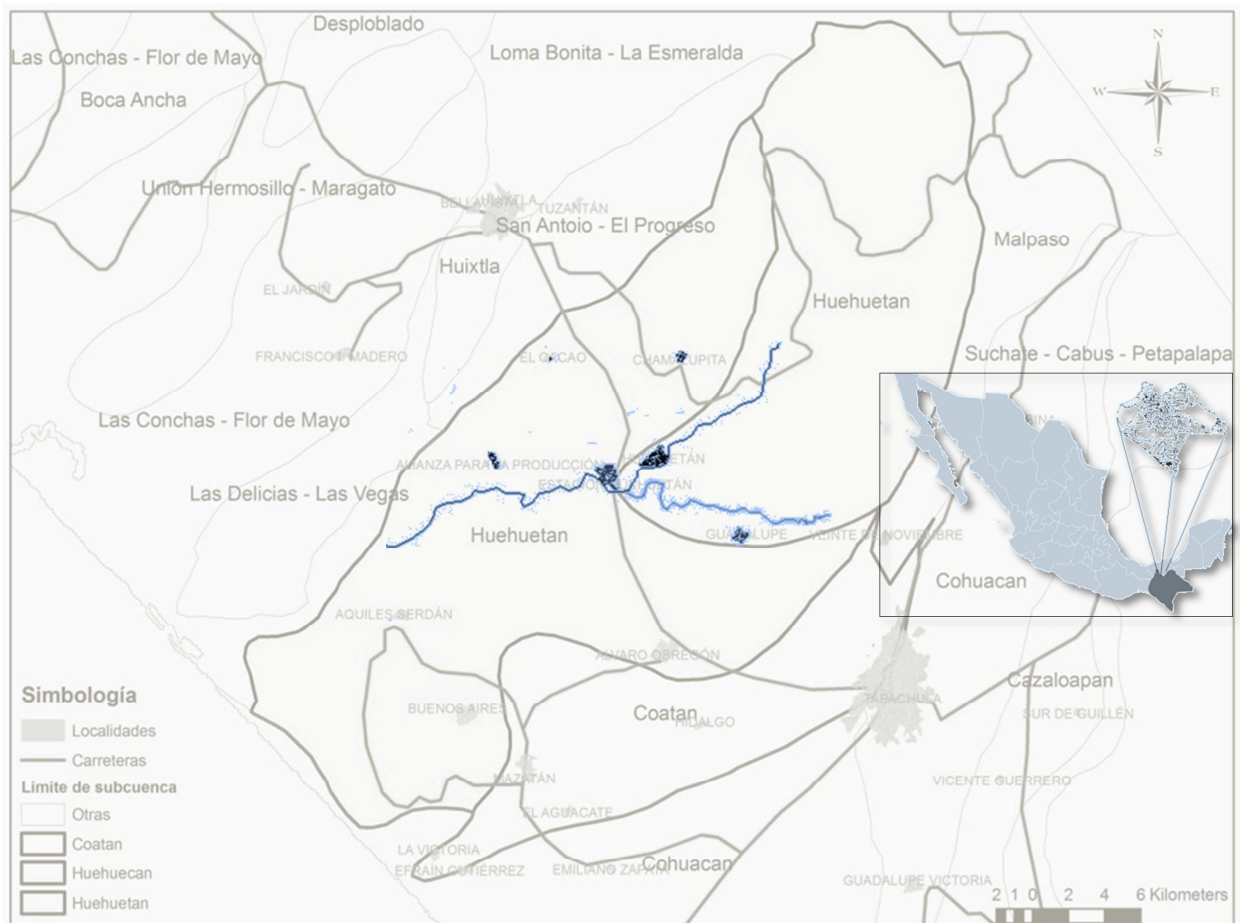


Ilustración 4.3 Localización de la cuenca del río Huehuetán.



La cuenca del Río Huehuetán se ubica en el límite de la Sierra Madre de Chiapas y la Llanura Costera del Pacífico y cuenta aproximadamente con una extensión 832 km<sup>2</sup>. Se origina en la Sierra Madre de Chiapas a una altura de 2,500 m.s.n.m. y lo conforman tres afluentes a partir de donde toma su nombre. Su última confluencia, correspondiente al río Nexapa, por su margen izquierda se localiza unos 300 m. aguas arriba de la carretera federal No. 200, ver Ilustración 4.3.

#### ***Comportamiento hidráulico del cauce***

La cuenca presenta una pendiente media de 8% entre la sierra y la carretera, lo cual origina altas velocidades en el flujo de las avenidas, produciendo erosión y socavación en la configuración litológica débil del cauce.

Las avenidas en esta zona tienen importantes áreas de inundación, hasta alcanzar superficies de más de 3 600 ha afectadas.

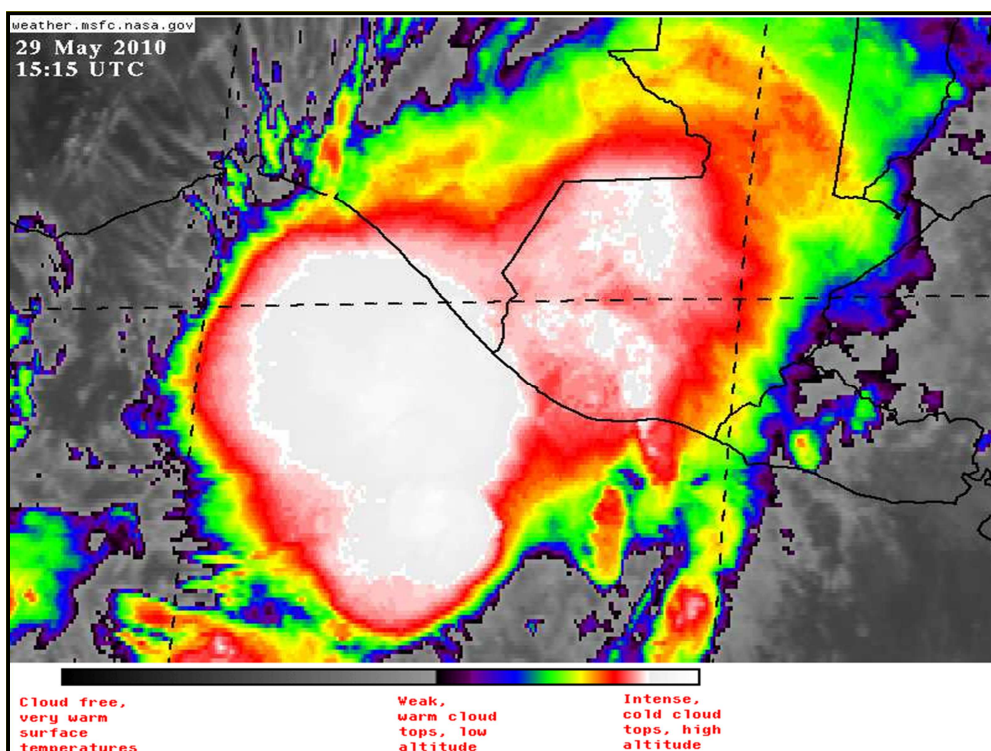
#### **4.3. Eventos hidrometeorológicos y sus efectos en la región.**

Uno de los mayores eventos hidrometeorológicos ocurrió en 1998, durante éste se produjeron deslaves y arrastre de sedimentos de las partes alta y media de las cuencas de los ríos Coatán, Huehuetán, Huixtla y Despoblado, causando severos daños en casi toda la planicie costera, afectando a las principales ciudades y comunidades de la región.

Los daños ocasionados entonces, fueron superados en 2005, durante los días 4 y 5 de octubre se presentó la tormenta Tropical Stan en la Costa de Chiapas, teniéndose dos días consecutivos con precipitaciones promedio mayores de 200 mm y cuatro con promedios superiores a 100 mm; en ese año se presentó una condición de tormentas que si se consideran en conjunto 4 días consecutivos pueden estimarse como correspondientes a un periodo de retorno ligeramente superior a los 100 años.

El evento hidrometeorológico más reciente fue la Tormenta Tropical Agatha, comenzó generando precipitaciones del orden de los 50 mm en el Soconusco la noche del día 26 de mayo de 2010, considerada como perturbación tropical ubicada en el sur de Chiapas, y se extendió sobre el Golfo de Tehuantepec y Centroamérica.

El 28 de mayo la baja presión que generaba la perturbación tropical se debilitó a 1010 hPa y se mantuvo estacionaria, generando lluvias entre 60 y 100 mm en la zona del Soconusco. El 29 de mayo, la perturbación tropical en el Golfo de Tehuantepec se intensificó a la Tormenta Tropical “Agatha”, considerada como la primera de la temporada en el Pacífico Este, se localizó por la madrugada a 275 km al oeste-suroeste de Puerto San José de Guatemala Ilustración 4.4.



Fuente: OCFS CONAGUA

**Ilustración 4.4** Imagen de radar del 29 de mayo de 2010, editada por el SMN.

El sistema se desplazó rápidamente y tocó tierra a las 18:00 horas del 29 de mayo, a 35 km al Este de Tapachula, donde perdió intensidad para nuevamente bajar a Depresión tropical a 45 km al Noreste de Tapachula, las lluvias registradas para el día 29 de mayo fueron 132.8 mm en Unión Juárez, 116.2 mm en Tapachula y 101.2 mm en Huehuetán (López Borrallas y Muñoz Castro, 2012).

Aunado a las altas precipitaciones medias, que oscilan entre 1.400 mm (planicie costera) hasta 4.500 mm en las partes medias y altas de las cuencas de entre 550 y 1.000 msnm, la región se caracteriza por un muy alto potencial erosivo.

Su topografía accidentada y suelos altamente erosionables la hacen muy susceptible a los procesos de degradación por cambios desfavorables de uso del suelo (Baumann J. et al. 2002). La deforestación, la expansión de cultivos de maíz y manejo inapropiado de la tierra, en las laderas empinadas (partes montañosas altas de las cuencas), son consideradas como las principales razones de la aceleración de los procesos erosivos y el aumento del transporte de sedimentos, causando serios problemas aguas abajo en el régimen fluvial y sistemas de drenaje en la planicies costeras, los estuarios, los sistemas lagos naturales y afectando la infraestructura de desagües y caminos como ocurrió durante el evento hidrometeorológico en septiembre de 1998 (Arellano, 1999; JICA, 1999).

La generación de mapas de riesgo de inundación de la zona, representa una importante herramienta para la prevención de los daños potenciales debidos a las inundaciones. En esta región en particular, debido a que la población es altamente vulnerable ante los fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios.

El estado de Chiapas es el primero en la República Mexicana en cuanto a la riqueza en agua (el 30% del agua superficial del país) y energía hidroeléctrica (el 54% de la energía del país se genera en la cuenca del Grijalva) sin embargo, es el que presenta los mayores índices de marginación y su población económicamente activa en su mayoría pertenece al sector primario, el cual se ve directamente afectado por las inundaciones.

La utilidad inmediata de los mapas de riesgo es la identificación de zonas propensas a inundaciones y deslaves, dado que los fenómenos hidrometeorológicos no pueden evitarse, y no puede predecirse su ocurrencia, magnitud y localización exactas, estos mapas son la base para llevar a cabo un manejo integral de los riesgos por inundaciones.

## **5. Mapas de riesgo y criterios para delimitación de nivel de peligrosidad.**

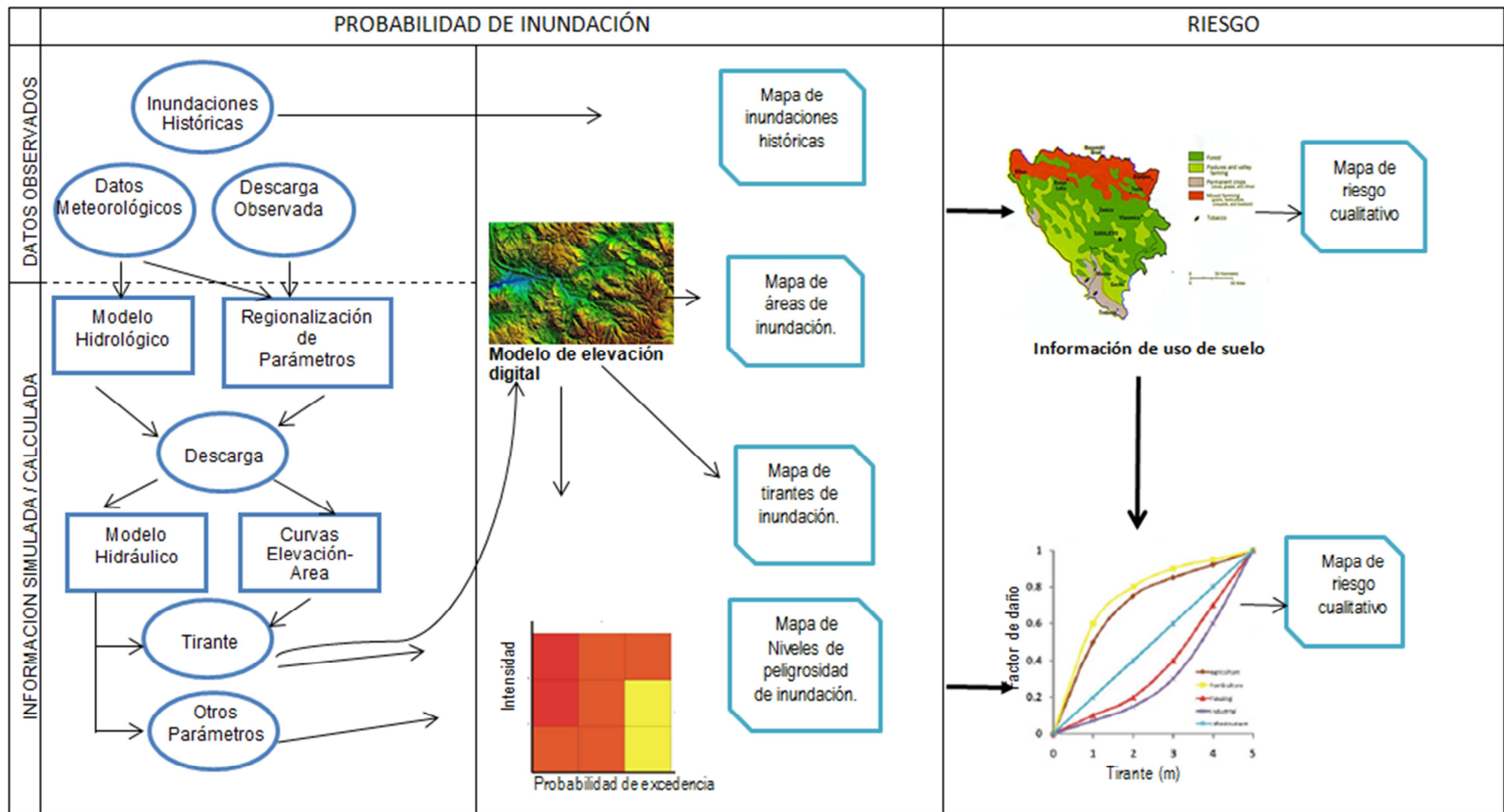
El principal objetivo de un plan de prevención contra inundaciones es la protección de la población. Por esto es importante delimitar las zonas que representen un peligro para la vida no solo por estar expuestas a flujos de inundación, sino también por el tirante y la velocidad que pueda presentar el flujo.

El efecto de la velocidad durante una inundación, puede ser subestimado; en los criterios de riesgo que se describen a continuación destaca por su importancia el factor de sumersión  $I$  y su relación con un nivel de peligrosidad.

### **5.1. Metodología para la elaboración de mapas de riesgo**

Dada la importancia de los mapas de riesgo, a continuación se describe con mayor detalle una metodología para su elaboración, ver Ilustración 5.1.

1. Estimación de los gastos para diferentes periodos de retorno: en caso de no contar con mediciones de descargas se hará uso de los registros de precipitación y coeficientes de escurrimiento. En los casos más comunes donde no se cuenta con la información de toda la cuenca es factible aplicar técnicas de regionalización.
2. Traducir los gastos a tirantes: mediante curvas que relacionen el gasto con las elevaciones alcanzadas. Actualmente impera el uso de modelos como FLO-2D, estos son principalmente útiles para zonas que presentan confluencias o sistemas de drenaje urbanos.
3. Determinación del área inundada y tirantes: esto se realiza combinando los tirantes obtenidos con el modelo digital de elevación de la cuenca. Esta es uno de los gráficos que puede generarse con el modelo FLO-2D.



Fuente: H. de Moel et al.: Flood maps in Europe

Ilustración 5.1 Metodología de elaboración de mapas de riesgo.

## **5.2. Parámetros de peligrosidad en los mapas de riesgo**

Los mapas de riesgo por inundación, generalmente están basados en el período de retorno del evento hidrometeorológico, y en ocasiones sólo presentan la mancha hidráulica correspondiente. Sin embargo, son las características del evento como tirante y velocidad, las que sirven como parámetros de peligrosidad para la población. Es decir, el efecto de un tirante de 0.3 m con una velocidad de 0.1 m/s no representa el mismo peligro que el mismo tirante a una velocidad de 1.0 m/s.

Los mapas de riesgo que incluyen la delimitación de la peligrosidad son una herramienta importante para la gestión del territorio, entre las actividades en que intervienen podemos mencionar:

- Delimitación de las áreas de inundación.
- Identificación de zonas relacionadas a las actividades económicas que están expuestas.
- Identificación de las vías de comunicación que se verán afectadas durante el evento, principalmente en puntos estratégicos (puentes).
- Evaluación de afectaciones y daños potenciales debidos a la falla de una obra de control o aprovechamiento.
- Orientación de la planificación territorial y urbana.
- Establecimiento de las restricciones al uso y dominio del suelo.
- Definición de zonas propensas a deslaves y prevención de éstos.
- Planificación de acciones de protección civil.
- Valoración de la capacidad de arrastre del agua y la posibilidad de muerte por ahogamiento de la población.

## **5.3. Parámetros y criterios para definición de las áreas de inundación peligrosa.**

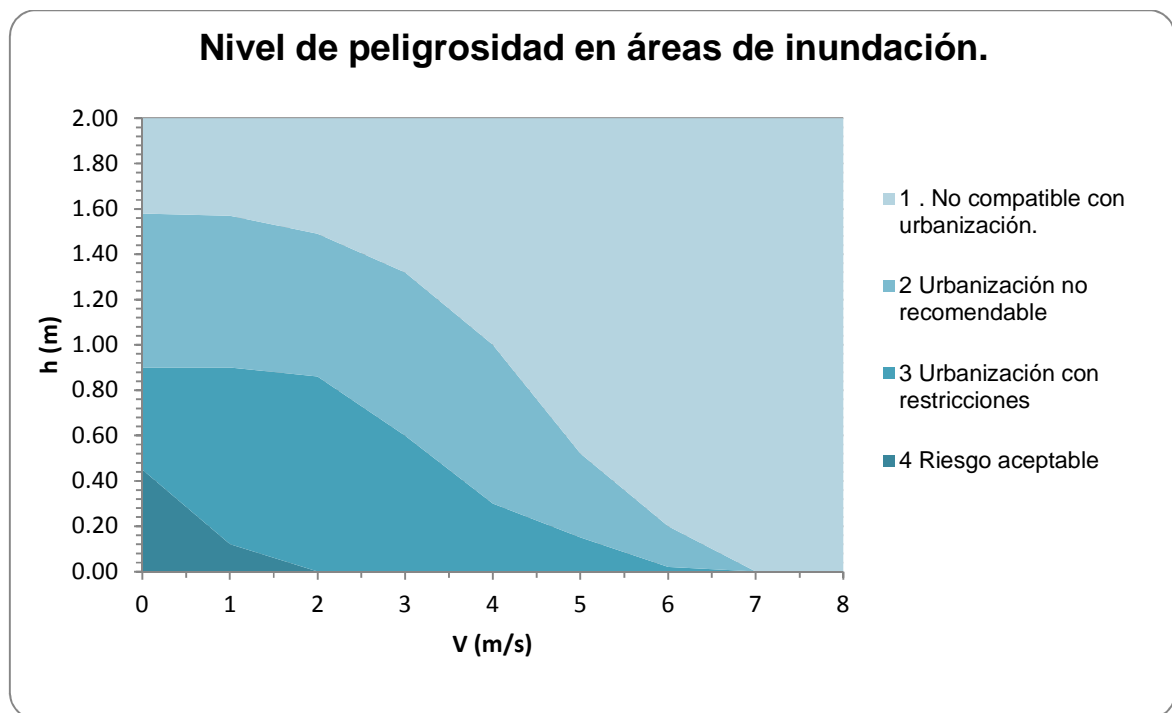
Experimentos llevados a cabo en la Universidad Estatal de Colorado, U.S.A. (Transportation Department of Boulder, 2002) han mostrado que una persona de pie en el agua durante una inundación es cada vez menos estable a medida que la velocidad o la profundidad del agua aumenta.

Los resultados muestran que una persona adulta de 1.80 m de altura, es derribada por el agua con un tirante de 1.20 m y una velocidad de solo 0.30 m/s, o cuando el tirante es de 0.30 m y la velocidad alcanza un valor de 1.20 m/s (Manilow, 2005).

Por su parte en la Universidad de Pavia, Italia según datos experimentales, elaboró la curva mostrada en la Ilustración 5.2, donde se representan condiciones de igual empuje total como una sumatoria del empuje estático (función de tirante) y dinámico (función de la velocidad  $U$ ), sobre elementos sometidos a la acción de una corriente hidráulica (Rossi, 2009).

A nivel internacional no hay uniformidad en los criterios, sólo en los parámetros:

- Tirante ( $h$ )
- Velocidad ( $V$ )
- Intensidad de sumersión ( $I$ )



**Ilustración 5.2 Nivel de peligrosidad en áreas de inundación (Rossi, 2009).**

La intensidad de sumersión se define como el producto de la velocidad media en un punto, por el tirante:

$$I \text{ (m}^2\text{/s)} = v \text{ (m/s)} \cdot h \text{ (m)} \quad (5.1)$$

En Suiza (OFEG, 2003), considerando el valor de  $I$ , se propone una clasificación de la peligrosidad particular de la onda de inundación en cuatro niveles: elevada, mediana, moderada y baja. En la Tabla 5.1 se muestran los intervalos.

**Tabla 5.1 Condición de peligrosidad de inundación según la Oficina Federal de Agua y Geología de Suiza**

Condición de peligrosidad	Intensidad de sumersión
	(m <sup>2</sup> /s)
Elevada	≥ 2
Mediana	1 ≤ I < 2
Moderada	0.5 ≤ I < 1
Baja	< 0.5

Fuente:OFEG, 2003

En Australia (Emergency Management Australia, 1999) se indica que para un adulto resulta difícil y peligroso desplazarse por el agua al presentarse una de las siguientes condiciones:

- el tirante  $h > 1.20$  m.
- la velocidad del agua  $v > 0.80$  m/s.
- para diferentes combinaciones de la profundidad y de la velocidad entre estos límites (Manilow, 2005).

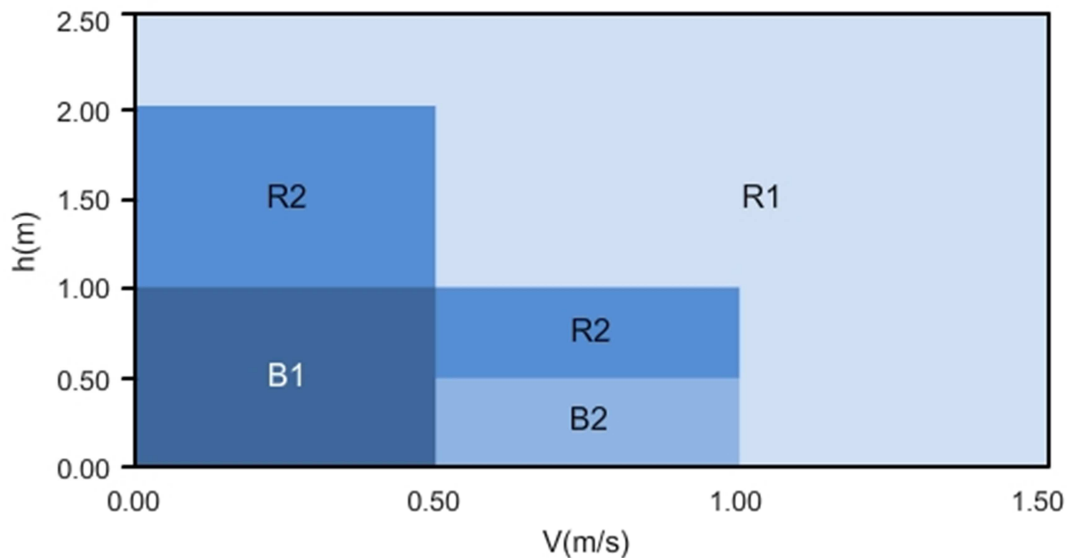
A su vez, de acuerdo al *Flood and Coastal Defence R&D Programme R&D OUTPUTS: FLOOD RISKS TO PEOPLE Phase 2*, publicado por *Flood Hazard Research Centre* de la Universidad Middlesex de Londres, se presenta la escala de parámetros para la generación de mapas de riesgo, ver Tabla 5.2.



**Tabla 5.2 Riesgo para la población en función del tirante y velocidad**

<b><math>h \cdot (v+0.5)</math></b>	<b>Grado de riesgo</b>	<b>Descripción</b>
< 0.75	Bajo	Precaución Zona de inundación poco profunda y velocidad media o estática y profunda.
0.75-1.25	Moderado	Peligroso para algunos (niños). Peligro: Zona de inundación profunda o con velocidad de flujo considerable.
1.25-2.50	Significativo	Peligroso para la mayoría de la población. Peligro: Zona de inundación profunda o con velocidad de flujo considerable.
>2.50	Extremo	Peligroso para toda la población. Peligro extremo: Zona de inundación profunda o con velocidad de flujo considerable.
donde: h = tirante (m) v = velocidad de flujo (m/s)		

En el *Plan de Prevention des Risques Naturels d'Inondation de Taradeau* (comuna francesa, en la región de Provenza-Alpes-Costa Azul), publicado en abril de 2010, se presenta un método de clasificación del área de inundación basado en los parámetros de altura y velocidad del agua. El mapa de riesgo presentará cuatro zonas, ver Ilustración 5.3.



**Ilustración 5.3 Clasificación de zonas en el mapa de riesgo (Départementale des Territoires et de la Mer, 2010).**

Las cinco zonas de la clasificación se describen a continuación:

- Zona B1

El tirante es inferior a 1.0 m y la velocidad es menor de 0.5 m/s. Se llama a esta zona de riesgo menor y es posible la urbanización bajo ciertas condiciones.

- Zona B2

El tirante es inferior 0.5 m y la velocidad está entre 0.5 m/s y 1.0 m/s; esta zona se considera expuesta a un riesgo considerable.

- Zona R2

Se presentan dos casos:

1. Zona no urbanizada o poco urbanizada, zona de cultivos en expansión, donde el tirante es inferior a 1.0 m con velocidad menor a 0.5 m/s y donde el cultivo puede almacenar cantidades de agua importantes.

2. Zona donde el tirante tiene un valor entre 1.0 m y 2.0 m, con velocidad inferior a 0.5 m/s o se presenta un tirante comprendido entre 0.5 m y 1 m con velocidad entre 0.5 m/s y 1.0 m/s.

En esta zona el riesgo se considera fuerte, los valores del tirante y la velocidad de flujo caen dentro del intervalo que, de acuerdo a los resultados de experimentos mencionados anteriormente, derribarían a una persona y por lo tanto pueden causar ahogamiento.

- Zona R1

En esta zona se presentan una de las siguientes condiciones:

- el tirante es mayor a 2.0 m
- el tirante es mayor a 1.0 m y la velocidad supera los 0.5 m/s
- la velocidad es mayor a 1.0 m/s

Está es una zona de riesgo muy fuerte, donde ninguna construcción o instalación nueva deberá autorizarse.

En los mapas de riesgo por inundaciones debidas a la falla de presas, en el Estado de California, U.S.A. (Government of California, 2000), se exige que el área de inundación indicada debe extenderse hasta donde se cumpla la condición  $h \leq 0.30$  m, medida sobre el nivel preexistente antes del evento, mientras que la velocidad sea  $v \leq 2.60$  m/s.

En España, para las riberas del Júcar (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2000), se establece que la condición de peligrosidad se cumple para un tirante  $h > 1.00$  m, velocidades  $v > 1.00$  m/s y situaciones en las que  $I > 0.50$  m<sup>2</sup>/s, ver A nivel nacional (Ministerio de Medio Ambiente, 1996), para evaluar las afectaciones y daños potenciales debidos a la falla de una presa, se propone el empleo de relaciones empíricas del tirante y la velocidad media del agua, ver Tabla 5.3.

**Tabla 5.3 Los criterios más importantes aplicados actualmente**

<b>Parámetro Hidráulico</b>	<b>h</b>	<b>v</b>	<b>v · h</b>	<b>h·(v+0.5)</b>	<b>v<sup>2</sup> · h</b>
<b>Criterio</b>	(m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> /s)		(m <sup>3</sup> /s)
Estados Unidos	0.30	2.60			
España	1.00	1.00	0.50		
Denver (Wright-Mc Laughlin, 1969)	0.45				
Mendoza (Nanía, 1999)	0.30				
Clark Country (CCRFCD, 1999)	0.30		0.55		
Austin (Austin Dep. Public Works, 1977)	Función de la extensión				
Témez (Témez, 1992)	1.00	1.00	0.50		
Abt (Abt et al., 1989)			0.50		
Slide Stability (Nanía, 1999)					1.00
Overtuning Stability (UPC, 2001)			0.45		
<i>Flood Hazard Research Centre</i> de la Universidad Middlesex de Londres				1.25	
OFEG					
Peligrosidad alta			>2.00		
Peligrosidad mediana			1.00 ≤ I ≤ 2.00		
Peligrosidad moderada			0.50 ≤ I ≤ 1.00		
Peligrosidad baja			< 0.50		
Australia	>1.20	> 0.80			
Plan de Prevention des Risques Naturels d'Inondation de Taredeau					
Zona B1	<1.00	< 0.50			
Zona B2	< 0.50	0.50 ≤ v ≤ 1.00			
Zona R2 Zona 1 No Urbanizada	< 1.00	< 0.50			
Zona 2 Urbanizada (dos condiciones posibles)	1.00 ≤ h ≤ 2.00	<0.50			
	0.50 ≤ h ≤ 1.00	0.50 ≤ v ≤ 1.00			
Zona R1 (se cumple una de las tres condiciones)	> 2.00				
	>1.00	> 0.50			
		> 1.00			

Adaptado de: Russo B. et al., 2005.

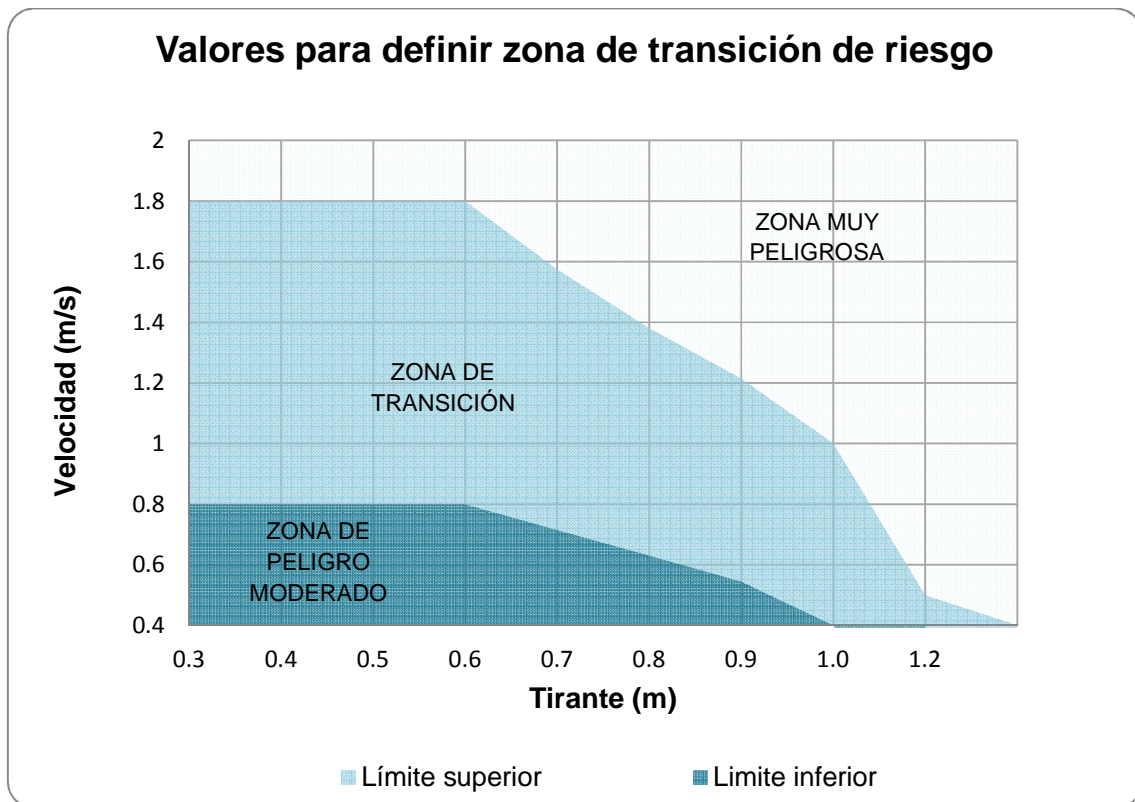
Denver es uno de los condados más comprometidos a nivel mundial, en cuanto a cuestiones de drenaje urbano. El Criterio del Drainage Handbook of Denver, de acuerdo a los datos experimentales antes mencionados, puede ser seguro para el tránsito vehicular pero no así para los peatones. Mientras que en el estado de Nevada, que presenta un patrón irregular de precipitación, los estudios realizados dan como resultado un criterio que combina la altura y velocidad del agua denominado Criterio de Clark County (Russo B. et al., 2005).

El Criterio de Nanía (1999) por su parte, se enfoca en la estabilidad de las personas al moverse y al cambiar de dirección, mientras que Témez llevó a cabo estudios, limitando la velocidad debido a la adherencia crítica entre la superficie y el peatón o los vehículos.

Dado que no hay un criterio estandarizado para la delimitación de zonas de peligro, Manilow (2005) propone un rango de transición. Sugiere que a partir de este se aplique el criterio ingenieril de acuerdo a las condiciones particulares de la región, ver Ilustración 5.4.

El criterio consta de un rango definido por:

Delimitación superior	$I = 0.60 \text{ m}^2/\text{s}$	$h \leq 1.20 \text{ m}$ $v \leq 1.00 \text{ m/s}$
Delimitación inferior	$I = 0.50 \text{ m}^2/\text{s}$	$h \leq 1.00 \text{ m}$ $v \leq 0.80 \text{ m/s}$



(Manilow, 2005)

**Ilustración 5.4 Zona de transición de riesgo.**

### Recomendaciones en México

Con relación a los eventos de inundación, en el *Manual para el Control de Inundaciones* la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011), recomienda recopilar y procesar, la siguiente información pública y privada:

- Mapas de la extensión de la zona aluvial y la frecuencia de las inundaciones.
- Mapas, en escala 1:100.000 o mayor, indicando las áreas susceptibles a inundación

Además, indica que cuando una región se empieza a poblar y desarrollar se debe disponer de un plano de la llanura de inundación, en que se limite la zona inundada por una avenida que tenga un periodo de retorno de 100 años, ya que ello ayudará a sentar las bases para el futuro desarrollo, uso de la tierra y otras regulaciones.

Entre las acciones no estructurales, propone la elaboración de mapas de riesgo por inundación (zonificación de toda la cuenca) al delimitar áreas en función de la frecuencia y duración de las inundaciones, o del periodo de retorno de las avenidas.

Respecto a la implementación de planes de manejo de inundaciones, entre la información con la que debe contarse, se incluyen los mapas de zonas a quedar inundada para diversos caudales previstos en el río. Además de la mancha de inundación, pueden incluir más información útil, por ejemplo isolíneas del tirante esperado dentro de las manchas y/o velocidades de flujo calculadas (con modelos hidrodinámicos numéricos).

Dentro de la información relacionada a planes de acción ante emergencias, se sugiere contar con un mapa de riesgo de inundación para diferentes escenarios de caudal proveniente de la presa, incluyendo los datos de velocidad y tirante y tiempos de arribo de la onda de agua en el caso de una rotura de la presa. Mientras que como acciones no estructurales para el manejo de cuencas, en cuencas bajas los planes de acción ante emergencias, incluyen mapas con riesgo de inundación para diferentes periodos de retorno (5, 10, 15, 25, 50, 100, y 1000 años) en cuencas sin presas, o para diferentes caudales de descarga del vertedor por presa definiendo la capacidad de conducción hidráulica de cauces naturales o invadidos.

Como acciones preventivas recomienda delimitar zonas potenciales de inundación en las que puede ocurrir la pérdida de vidas humanas y daño a sus bienes e infraestructura debido cambios súbitos del tirante de agua mayores de 30 cm provocados por el desbordamientos del cauce o la velocidad de la onda de inundación de descarga ordinarias y extraordinarias del vertedor o la falla de una presas. Con base en lo anterior, se deben establecer:

- Sitios seguros para reubicar damnificados.
- Definir albergues temporales que se usarán durante la inundación.
- Desarrollar mapas de riesgo de inundación en función de caudales para diferentes periodos de retorno y la eventual rotura de presas existentes en el cauce.

Por otra parte, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, ha editado una Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos

(CENAPRED, 2006). En ésta, la primera parte contiene una guía para la Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones y avenidas súbitas en zonas rurales, con arrastre de sedimentos, en la que se analiza la manera de identificar el peligro, el criterio de evaluación de la vulnerabilidad y el de riesgo. El riesgo lo define en función del valor de los bienes expuestos, la vulnerabilidad o el porcentaje de daños de una vivienda por efecto de una inundación y el peligro o la probabilidad de que ocurra un hecho potencialmente dañino. Dado que la vulnerabilidad como el peligro son adimensionales, las unidades del riesgo serán las del valor de los bienes expuestos. Para representarlo en un mapa, define un índice para cada vivienda

$$I_{Rj} = \frac{R_j}{C_{MAX}} \quad (5.2)$$

donde:

- $I_{Rj}$  Índice de riesgo para cada vivienda
- $R_j$  El valor del riesgo para una vivienda en particular
- $C_{MAX}$  es el valor del bien expuesto más alto dentro de la localidad
- $I_{Rj}$  será Alto si  $0.67 < R_j I < 1.0$
- será Medio si  $0.33 < R_j I < 0.67$
- será Bajo si  $0 < R_j I < 0.33$

El mapa generado contiene valores relativos dentro de la misma localidad. Pueden generarse mapas para diferentes periodos de retorno, siempre y cuando se cuente con la información del valor de los bienes expuestos para la mancha de inundación correspondiente, además de la función de peligro.

#### 5.4. Ecuaciones semiempíricas de inestabilidad en flujos de inundación.

Para una mejor comprensión de las fuerzas actuantes en la inestabilidad de una persona expuesta a un flujo de inundación, el efecto del tirante y la velocidad, se han llevado a cabo experimentos. En el artículo *Human Inestability in flood flows* (Jonkman y Penning-Rowell, 2008), se presenta un estado de arte. Los objetivos para dichos experimentos son: estimar el producto  $hv$  crítico en el que un sujeto se vuelve inestable dentro del flujo,



definir una función estado límite de estabilidad o determinar una relación de riesgo al que se exponen las personas con el tirante, la velocidad y cantidad de escombros.

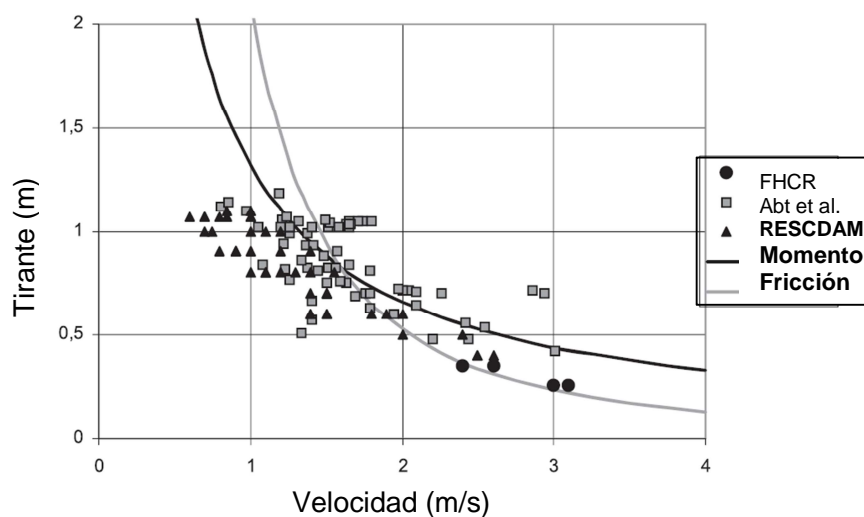
Por su parte, el *Flood Hazard Research Center* (Reino Unido), llevó a cabo experimentos muy aproximados a una situación real. Mediante un canal de concreto con una pendiente de 1%, ver Ilustración 5.5.



**Ilustración 5.5 Experimento de inestabilidad durante un flujo de inundación.**

(Jonkman y Penning-Rowse, 2008)

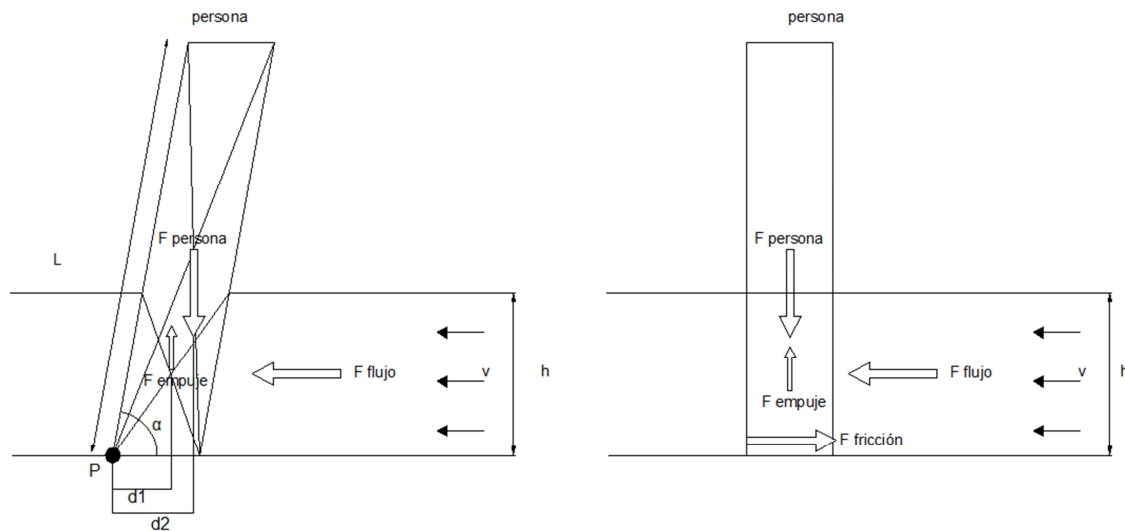
La velocidad se midió a través del principio de doppler ultrasónico, y el tirante a través de un sensor de presión hidrostática. Se permitió al sujeto reaccionar de acuerdo a sus necesidades para conservar la estabilidad y no caer, sin darle indicación alguna.



**Ilustración 5.6 Combinaciones de tirante y velocidad en que se presenta la inestabilidad.**

(Jonkman y Penning-Rowse, 2008)

Las combinaciones de tirante y velocidad en las que se presentó la inestabilidad del sujeto, resultado de los experimentos, se muestran en la Ilustración 5.6.



**Ilustración 5.7 Modelo de inestabilidad por momento y fricción.**

(Jonkman y Penning-Rowse, 2008)

donde:

- $d_1$  distancia desde  $P$  al centro de masa (m)
- $P$  punto de pivote del sujeto, respecto a este el sujeto gira apoyándose en el flujo
- $d_2$  distancia desde  $P$  al centro de fuerza de empuje vertical (m)
- $F_{empuje}$  Fuerza vertical de empuje (N)
- $F_{flujo}$  Fuerza horizontal del flujo sobre un objeto (N)
- $F_{fricción}$  Fuerza de fricción entre el sujeto y el fondo (N)
- $F_{persona}$  Peso del sujeto (N)
- $h$  Tirante (m)
- $L$  Estatura del sujeto (m)
- $v$  Velocidad del flujo (m/s)
- $\alpha$  Ángulo de inclinación del sujeto dentro del flujo (grados)

A partir de las pruebas y resultados, se establecen dos mecanismos hidrodinámicos que causan la pérdida de estabilidad: inestabilidad por momento e inestabilidad por fricción, ver Ilustración 5.7. La inestabilidad por momento o abatimiento, ocurre cuando el

momento provocado por el flujo excede al momento debido al peso del sujeto (Abt et al., 1989). Inestabilidad por fricción o deslizamiento, se presenta cuando la fuerza de arrastre provocada por el flujo horizontal es mayor que la resistencia por fricción entre los pies del sujeto y la superficie del fondo. Otro mecanismo es el de flotación, que dada la similitud de la densidad del cuerpo humano y del agua, se presenta generalmente cuando el tirante sea mayor que la altura de la persona. Es entonces que la persona ya no es sujeto de cálculos por momento o fricción. (Jonkman y Penning-Rowsell, 2008).

### 5.5. Criterio propuesto para la cuenca de estudio

La zona de estudio, como ya se mencionó en el capítulo 4, presenta muchas condiciones para clasificarla como vulnerable por lo tanto, y hasta que tales condiciones cambien, es conveniente aplicar un criterio conservador en cuanto al tirante, velocidad e intensidad de sumersión. De acuerdo a los resultados de experimentos descritos anteriormente, se propone el siguiente criterio:

<b>Nivel</b>	<b>Sumersión <math>I(m^2/s)</math></b>	<b>Tirante <math>h (m)</math></b>
Peligrosidad elevada	$vh \geq 1.0$	$h \geq 1$
Peligrosidad media	$0.5 \leq vh < 1.0$	$0.5 \leq h < 1.0$
Peligrosidad baja	$0.1 \leq vh < 0.5$	$0.1 \leq h < 0.5$

El objetivo general de la aplicación de este criterio es delimitar las zonas donde la población estará segura en caso de un evento de inundación, es por eso que la utilidad de los mapas de riesgo de inundación, se verá reflejada en todas las actividades que se relacionen con la prevención de desastres debidos a estos eventos. Se espera que sean una herramienta de amplia difusión y una fuente de información para la población sobre las consecuencias de un evento, las que muchas veces ignoran o subestiman.

## 6. Modelación en sitios seleccionados y generación de mapas.

Una de las herramientas para la estimación del escurrimiento y sus efectos en la cuenca, es la modelación. Para el caso de estudio se utilizó el modelo FLO-2D; modelo cuasi-bidimensional que analiza el flujo mediante un esquema explícito.

### 6.1. Análisis de información hidrológica.

Con la información disponible y proporcionada por la CONAGUA (CONAGUA, 2009), se completaron los hidrogramas de entrada para el cauce correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años. Cada hidrograma tiene una duración de 40 horas y sus gastos pico se muestran en la Ilustración 6.1.

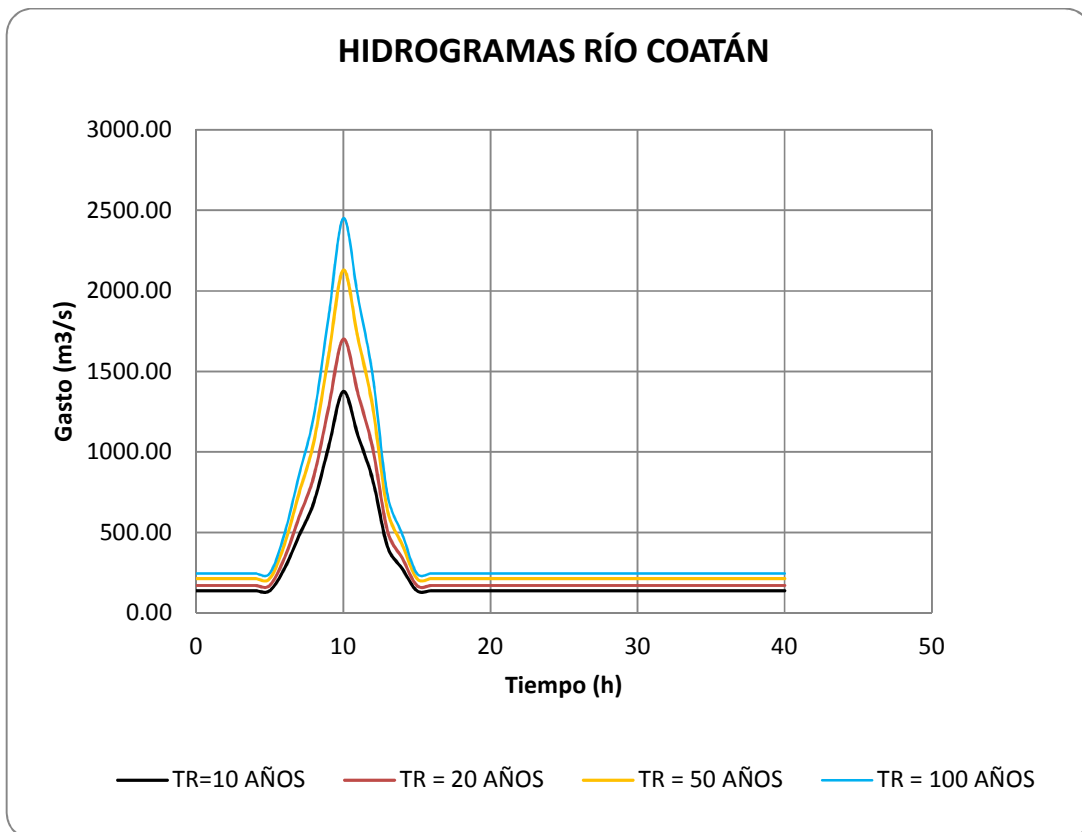
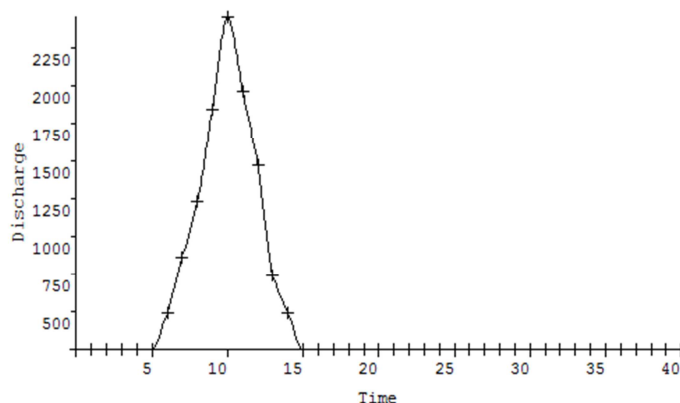


Ilustración 6.1 Hidrogramas del río Coatán para 5, 10, 20, 50 y 100 años.

En la Ilustración 6.2 se muestra el ejemplo de un hidrograma utilizado, como lo presenta el modelo.



**Ilustración 6.2 Hidrograma de entrada para modelación de escenario, FLO-2D (O'Brien J.S., 2009).**

Los resultados de la simulación pueden leerse en el post-procesador MAPPER. En este post-procesador se muestran los mapas de elevación del terreno, elevación máxima de la superficie del agua, de máxima profundidad, velocidad máxima, entre otros.

De acuerdo al Manual para el Control de Inundaciones de CONAGUA (CONAGUA, 2011) los periodos de retorno recomendados en función de las características de la zona son las que se muestran en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1 Período de retorno en función de la zona a proteger**

<b>Características de la zona por proteger</b>	<b>Período de Retorno en años</b>
Parcelas agrícolas aisladas, sin posible pérdida de vidas humanas	5
Distritos de Riego, sin riesgo de pérdida de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	1000

Fuente: CONAGUA 2011

Por otro lado, según los requerimientos de la *European Flood Directive*, los estados miembros deben desarrollar mapas de áreas inundables para tres niveles de probabilidad

de ocurrencia: baja (eventos extremos), media ( $Tr = 100$  años), y en zonas que así lo requieran también para eventos con una alta probabilidad de ocurrencia ( $Tr = 10$  años) (Moel et al., 2009).

Por lo anteriormente expuesto, para la simulación de los escenarios en la zona de estudio, se tomaron los eventos correspondientes a un periodo de retorno de 100 años.

## **6.2. Generación de mapas de peligrosidad.**

Para la zona de estudio se presentan los siguientes mapas de peligrosidad para un periodo de retorno de 100 años.

- Tirantes finales en el tiempo de simulación en el área inundable
- Tirante máximo alcanzado por el agua
- Tiempo para llegar al tirante máximo de inundación
- Tiempo para alcanzar un tirante de 30 cm de inundación
- Máxima velocidad alcanzada por el flujo de inundación

Para el río Coatán y Huehuetán se manejaron gastos de  $2451 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $2224 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

### **6.2.1. Cuenca del río Coatán**

En la cuenca del río Coatán se encuentra la ciudad de Tapachula, la segunda ciudad más importante después de la capital del estado de Chiapas, así como otras localidades de menor tamaño. Actualmente, se han construido estructuras de protección contra inundaciones a la altura de la ciudad de Tapachula hasta el poblado de Obregón sin embargo, otras localidades como Mazatán, siguen expuestas a inundaciones.

En la Ilustración 6.4 se pueden observar los tirantes alcanzados por el flujo. En general, éstos no sobrepasan los 4.4 m, exceptuando zonas muy pequeñas aguas arriba de la ciudad de Tapachula, y en otros puntos en las cercanías de los poblados de Obregón, Hidalgo, Buenos Aires, Mazatán, El Aguacate y Efraín Gutiérrez. En la mayor parte de la zona están entre 0.1m y 0.70 m, suficiente para afectar los bienes muebles de la población.

Los tirantes máximos que se presentan en la cuenca durante la modelación se muestran en la Ilustración 6.4, las zonas más afectadas son el municipio de Tapachula y el poblado Veinte de Noviembre, Obregón e Hidalgo. En este mapa se observa que aproximadamente el 50% de la mancha de inundación presentaría un tirante máximo entre 0.7 m y 2.0 m, lo cual afectaría los bienes inmuebles y evitaría la movilización de la población a alguna zona segura.

En la Ilustración 6.5 e Ilustración 6.6 se muestran los tiempos (en minutos), para alcanzar un tirante de 30 cm y el tirante máximo, respectivamente. La importancia de estos mapas se ve reflejada, entre otros aspectos, en la planeación de las rutas de evacuación definiendo las zonas que se inundan más rápidamente. En algunas regiones se cuenta con los mapas que muestran la velocidad con que aumenta el tirante del agua, también con la finalidad de identificar las zonas de mayor peligro.

En las zonas aledañas a la Ciudad de Tapachula y los poblados de Obregón e Hidalgo, la parte más elevada de la cuenca, se necesitan hasta 15 minutos para alcanzar los tirantes máximos. Aguas abajo de estos poblados, toma media hora y en la parte final del cauce los tirantes máximos se presentarán en poco más de hora y media. Estos tiempos deben considerarse para la planeación de rutas de evacuación. En esta región, siendo una cuenca de respuesta rápida, las velocidades del escurrimiento son mayores a lo considerado como peligro, y el tiempo de incremento del tirante de inundación breve.

En la Ilustración 6.7 se muestran las velocidades máximas alcanzadas. Este factor influye directamente en la seguridad de la población. De acuerdo al método Suizo, con este parámetro y el tirante, se genera la escala de intensidad del evento. En la zona del cauce que circunda la ciudad de Tapachula, el flujo en el Coatán presenta velocidades de hasta 4.5 m/s, de acuerdo con las recomendaciones y resultados de estudios mencionados en el capítulo 5 del presente trabajo, estas velocidades son de alto riesgo para la población. Además, su combinación con tirantes mayores a 1 m, superan los valores máximos para que una persona puede desplazarse sin peligro de ahogamiento debido a la pérdida de estabilidad.

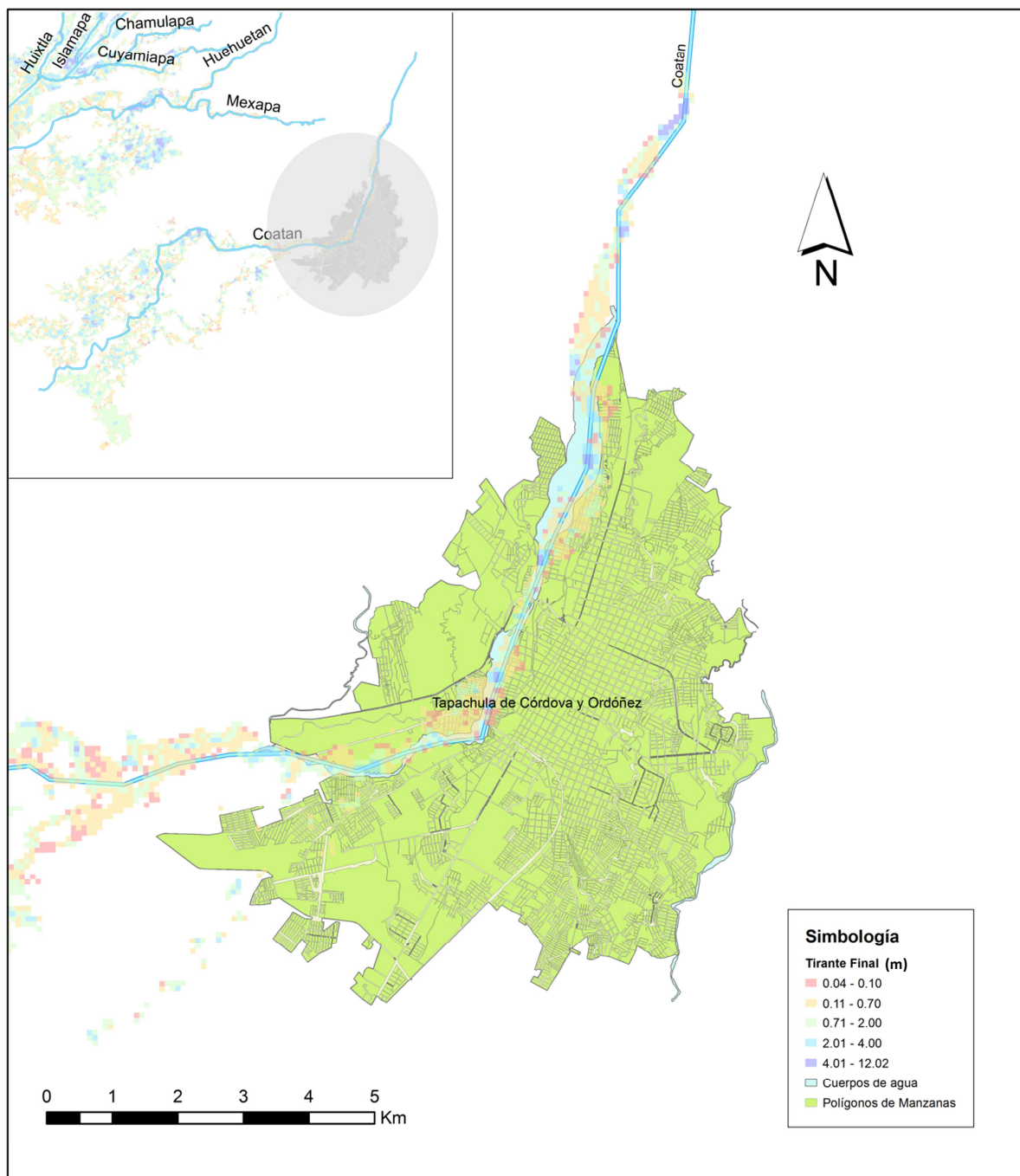
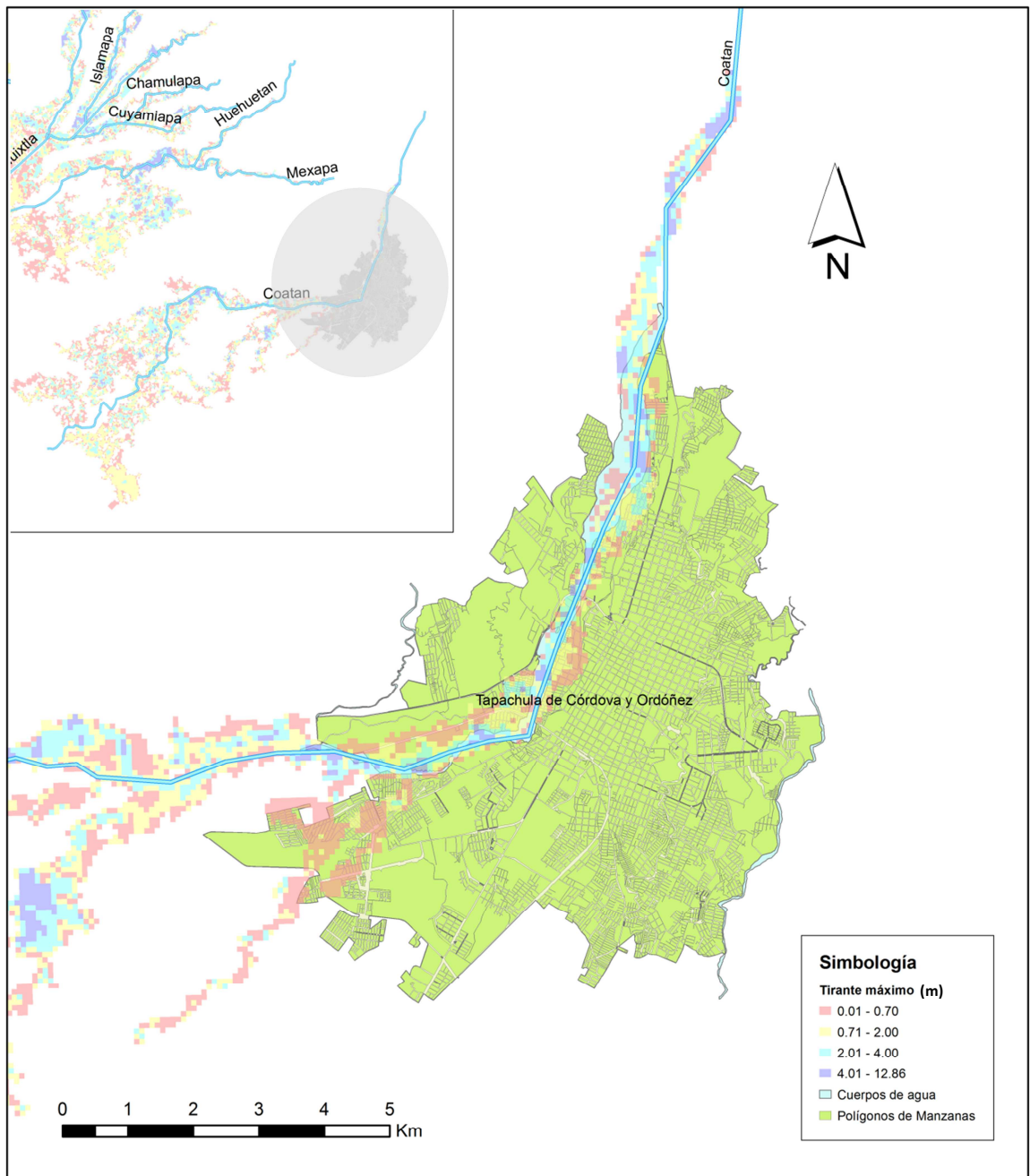


Ilustración 6.3 Mapa de tirantes finales, cuenca del río Coatan.





**Ilustración 6.4** Mapa de tirantes máximos, cuenca del río Coatán.

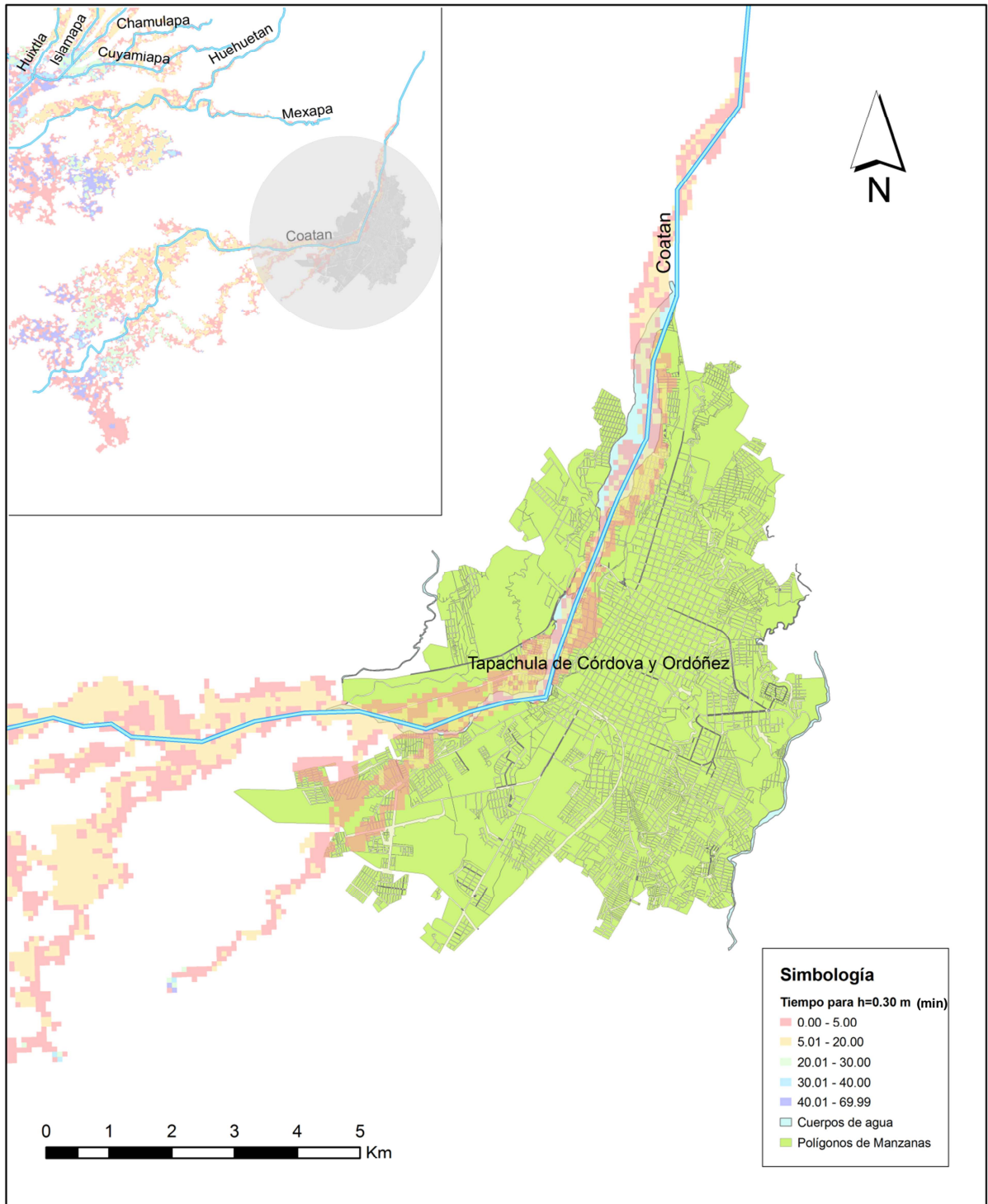


Ilustración 6.5 Mapa de tiempo para alcanzar un tirante de  $h = 0.30$  m, cuenca del río Coatán.

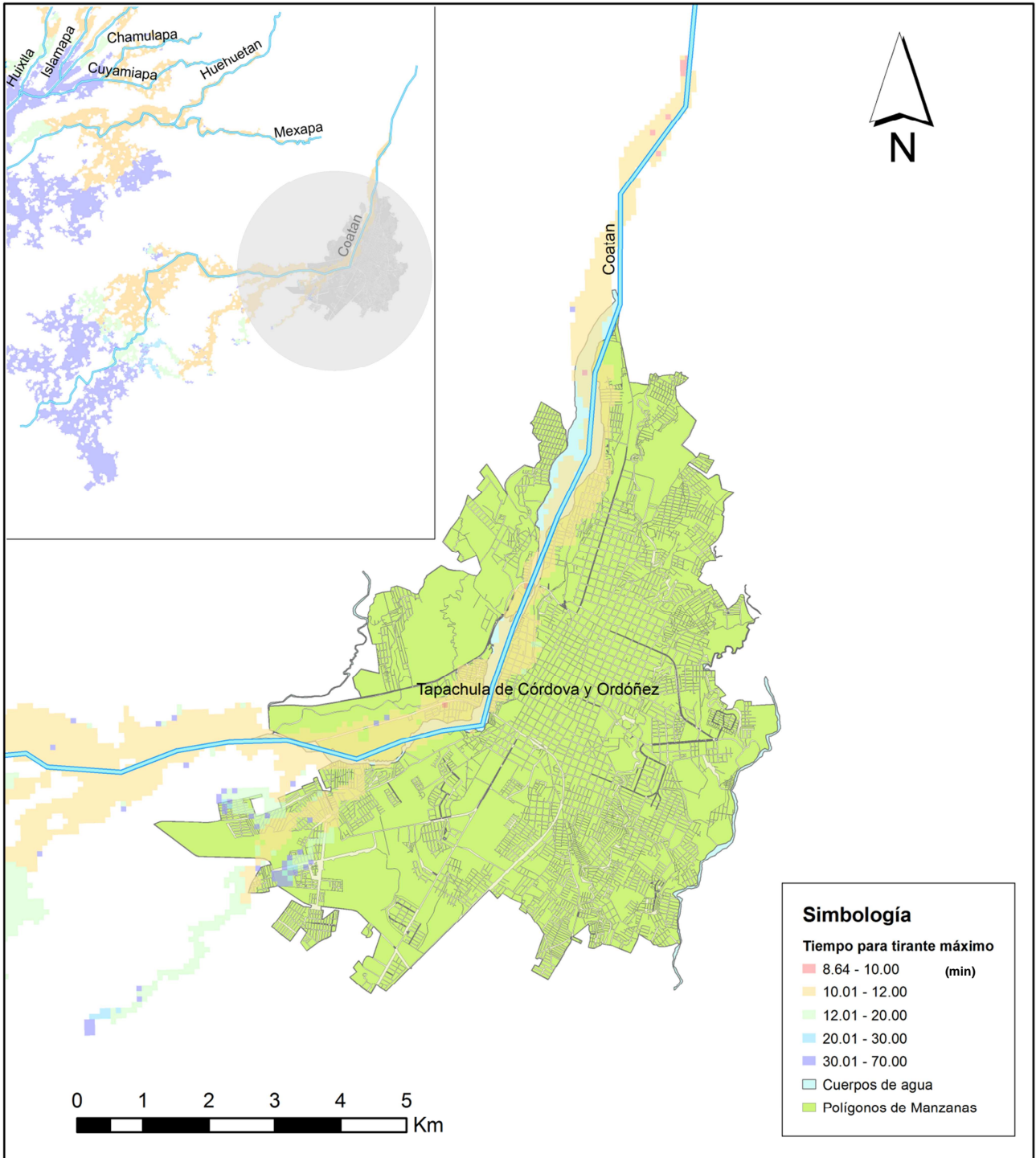
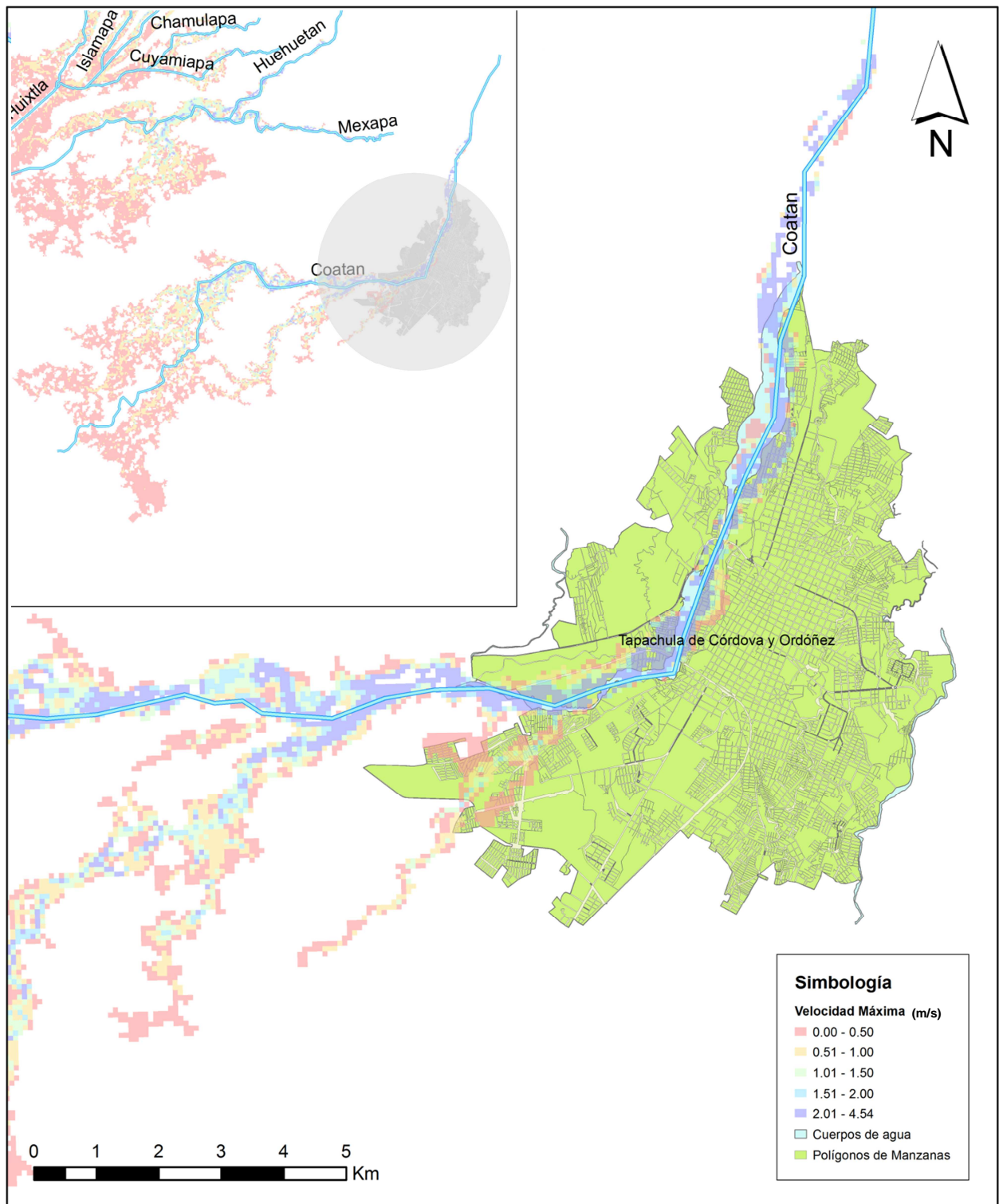


Ilustración 6.6 Mapa de tiempo para alcanzar el tirante máximo, cuenca del río Coatan.



**Ilustración 6.7** Mapa de velocidad máxima, cuenca del río Coatan.

### 6.2.2. Cuenca del río Huehuetán

En la Ilustración 6.8 se muestran los tirantes finales para la cuenca del río Huehuetán. A la altura del poblado Huehuetán, el tirante final está entre 0.10 m y 0.70 m en la mayor parte de la zona urbana, esto causaría afectaciones en los bienes muebles de la población. El tirante alcanza valores entre 2 m y 4 m solo en pequeñas regiones donde, además de los daños materiales podrían ser a la salud o vida de los habitantes.

Los tirantes mayores se presentan aguas abajo de la confluencia, el modelo presenta tirantes mayores a 4m en esa región. De acuerdo a las condiciones de la modelación el poblado presenta tirantes entre 0.10 m y 0.70 m por un evento correspondiente a un  $T_r = 100$  años, por lo que es conveniente identificar zonas federales, obras de protección si están presentes, y las zonas más vulnerables potencialmente inundables o que puedan sufrir deslaves, ver Ilustración 6.9.

De acuerdo a la información presentada en la Ilustración 6.10, en la zona del poblado Huehuetán, para alcanzar un tirante de 0.30m se requieren entre 0 y 5 minutos en algunas zonas, esto nos indica que la cuenca es de respuesta rápida, mientras que el tiempo en que el cauce alcanza los tirantes máximos es entre 10 y 12 minutos. Estos tirantes en las zonas contiguas a la margen del cauce son de alrededor de 1.0 m sin embargo, hay zonas donde llegan a los 4.0 m, de acuerdo al modelo. Esta información es de utilidad para identificar las zonas en riesgo, las vías de comunicación que pueden usarse para evacuación, entre otros ver Ilustración 6.11.

En la Ilustración 6.12 se observan las velocidades del flujo de inundación a la altura del poblado de Huehuetán. El modelo presenta valores entre 2.0 y 4.0 m/s en gran parte de la zona. Cabe mencionar, que incluso para los tirantes finales menores, de 0.10 m, la velocidad de 2 m/s representa un factor que puede provocar lesiones en la población.

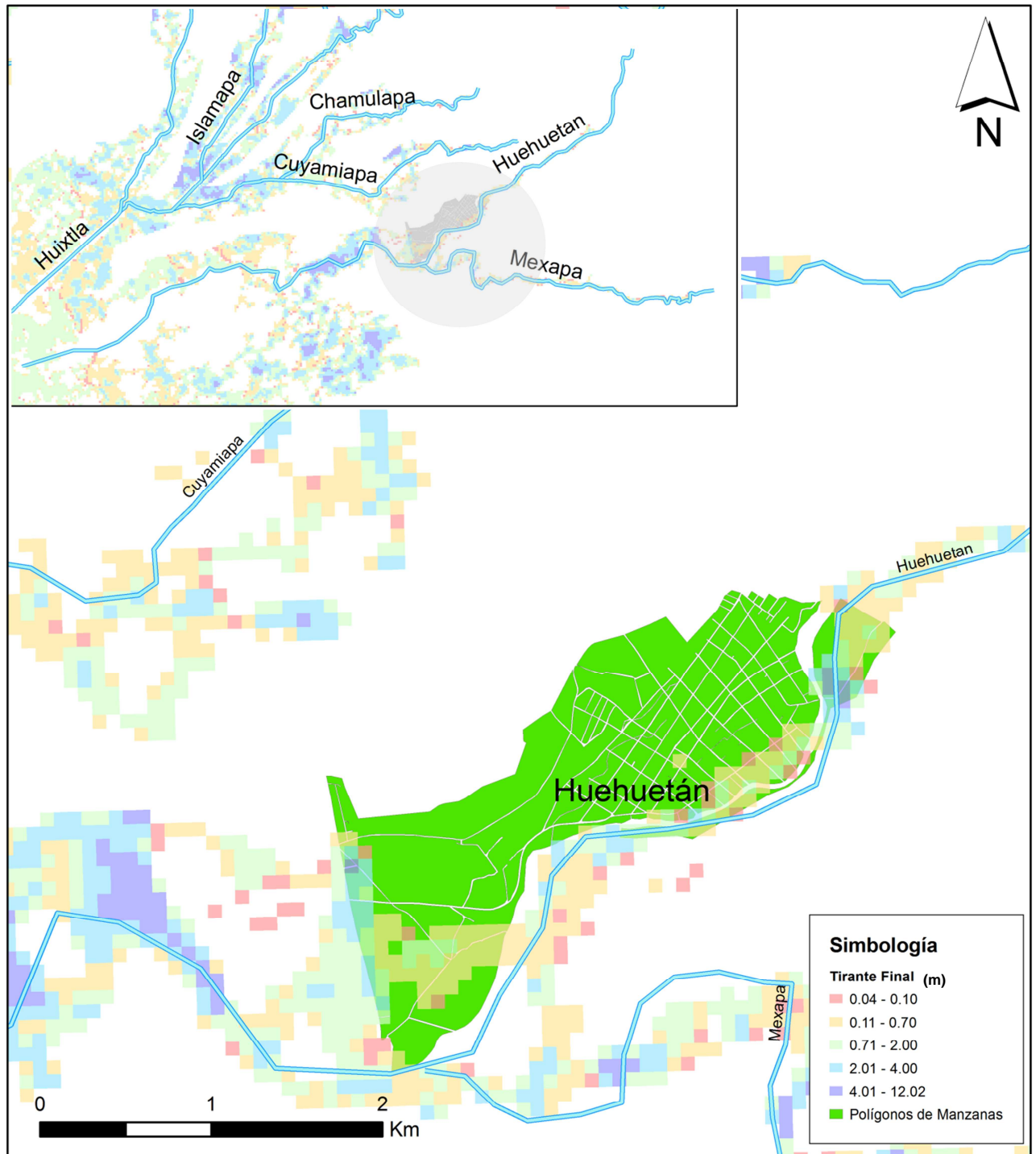


Ilustración 6.8 Mapa de tirantes finales cuenca del Río Huehuetán.

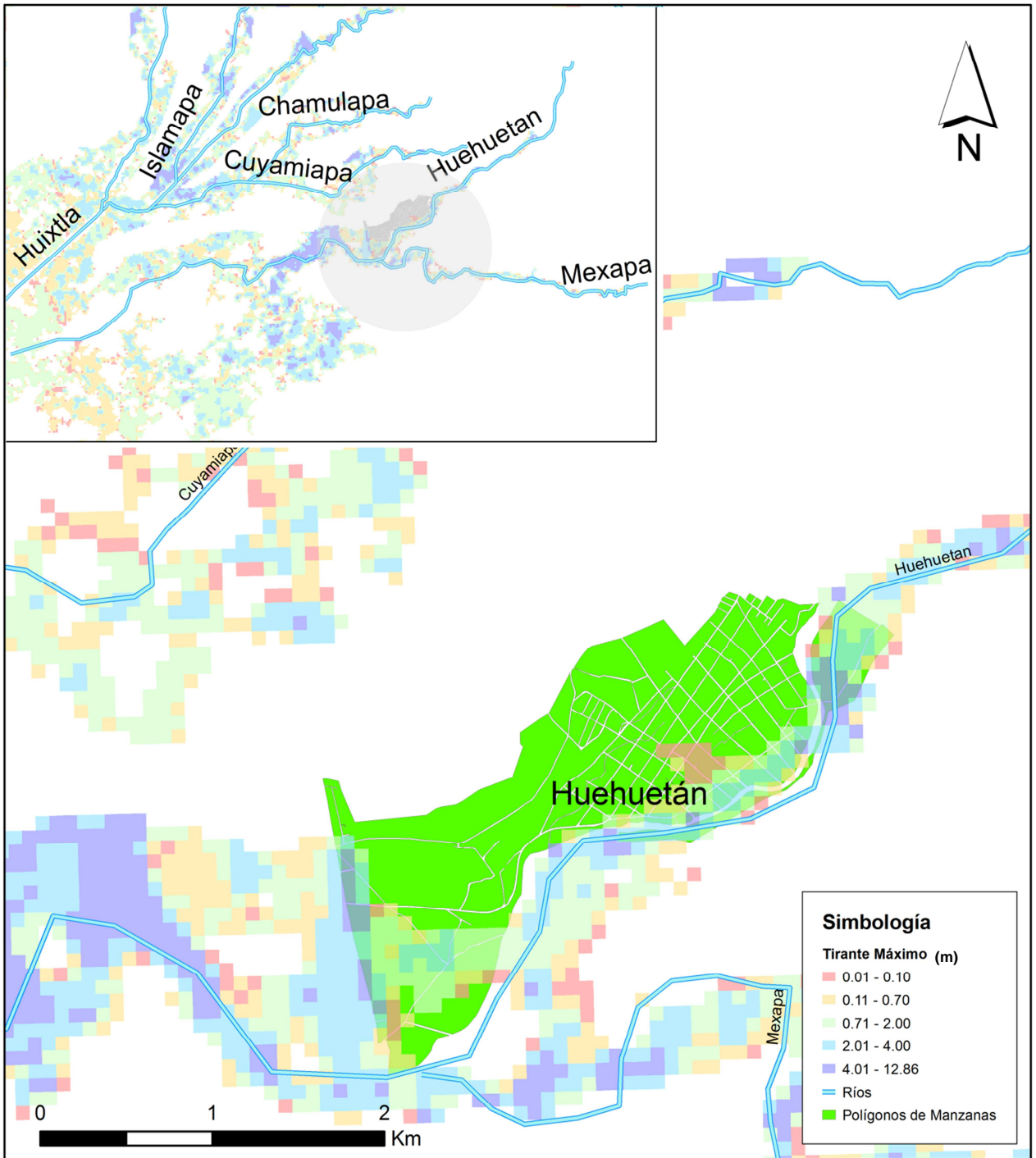


Ilustración 6.9 Mapa de tirantes máximos cuenca del Río Huehuetán.

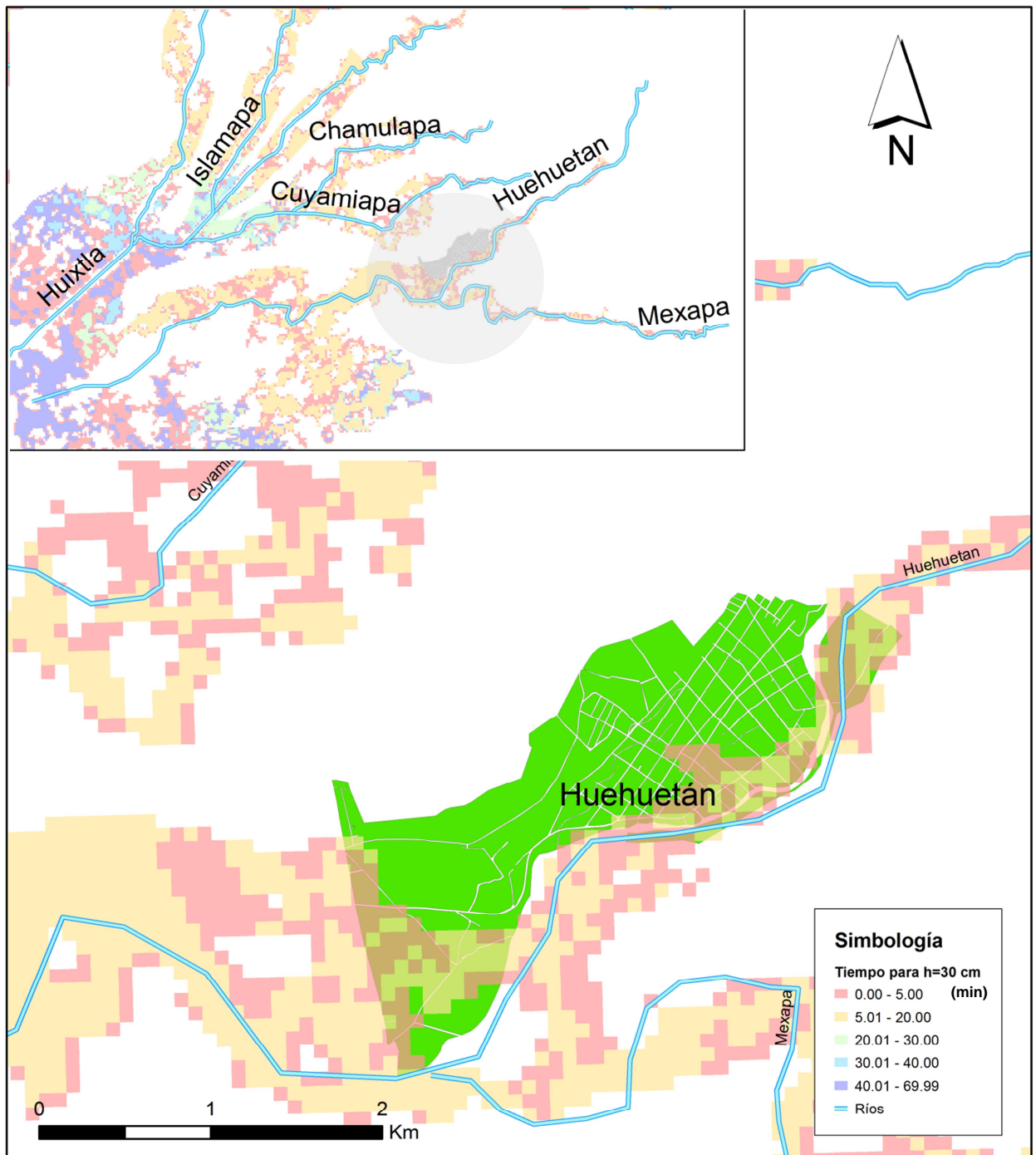


Ilustración 6.10 Mapa de tiempo para alcanzar un tirante  $h = 0.30$  m, cuenca del Río Huehuetán.



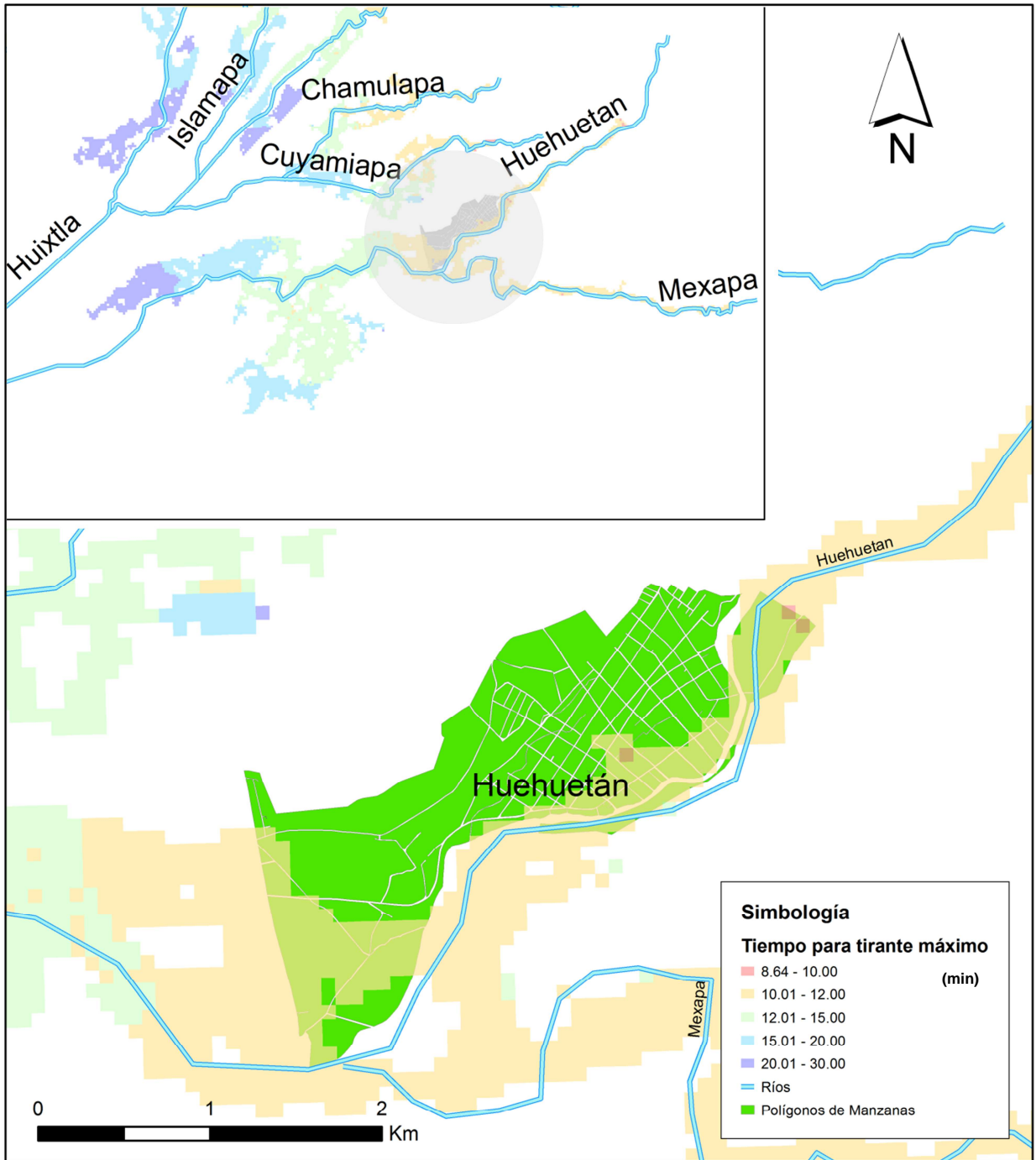


Ilustración 6.11 Mapa de tiempo para alcanzar el tirante máximo, cuenca del Río Huehuetán.

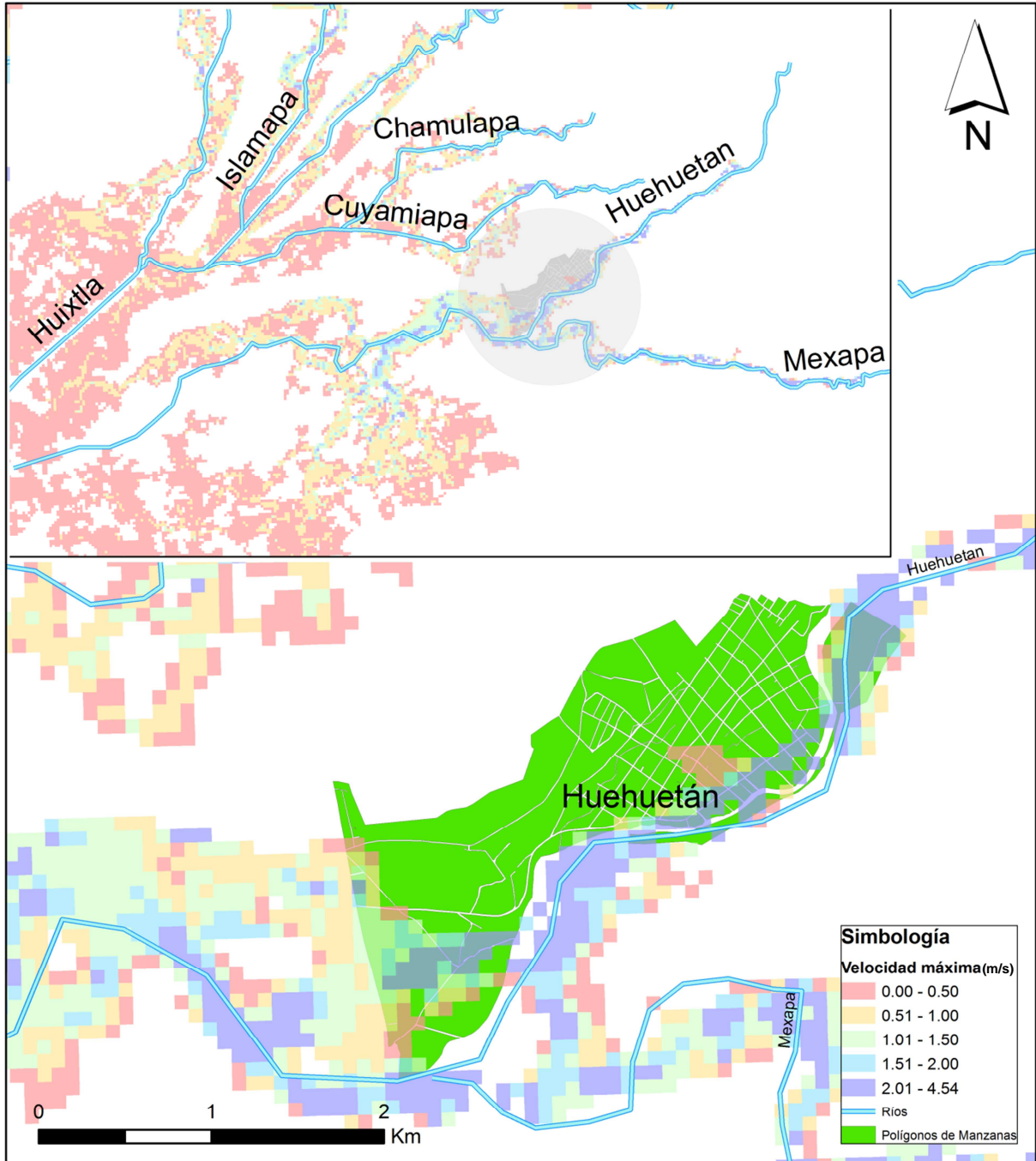


Ilustración 6.12 Mapa de velocidad máxima, cuenca del Río Huehuetán.

Reuniendo la información disponible en los mapas de riesgo presentados, podemos identificar ciertas zona con nivel de peligro alto, en caso de inundación; esto bajo las condiciones proporcionadas como datos de entrada, principalmente la topografía y el hidrograma de entrada correspondiente a un período de retorno de 100 años.

En la Tabla 6.2 se hace un resumen de los parámetros observados en las cuencas.

**Tabla 6.2 Valores de los parámetros de inundación más importantes observados en las cuencas de estudio**

<b>Cuenca</b>	<b>Coatán</b>	<b>Huehuetán</b>
Tirante máximo (m)*	0.01 - 0.70	2 - 4
Velocidades máximas (m/s)*	4.5	2 - 4.5
Tiempo en que se alcanza el tirante máximo (min)*	9 – 15	10 - 12

\*En la mayor parte de la mancha de inundación de la zona urbana

Los anteriores valores muestran que las condiciones de mayor peligro para la población, en caso de inundación, se presentarían en el poblado Huehuetán.

Hasta ahora el análisis de los parámetros tirante y velocidad se ha presentado de manera independiente. Los umbrales para cada rango, en caso del tirante, corresponden a los posibles daños, muebles y electrodomésticos, casa habitación de una planta y casa habitación de dos plantas. Por otro lado, en cuanto a la velocidad, se manejaron los valores que de acuerdo al capítulo 5, representan un riesgo de daño a la población ante la presencia de flujo de inundación. A continuación se hará un análisis aplicando el criterio que involucra la combinación de ambos parámetros.

### **6.3. Generación de mapas de riesgo de inundación a partir de tirante, velocidad y factor de sumersión.**

La Directiva Europea de Inundaciones recomienda, la realización de mapas de riesgo de inundación correspondientes a los siguientes periodos de retorno:

- Eventos con probabilidad de ocurrencia elevada  $Tr = 10$  años
- Eventos con probabilidad de ocurrencia media  $Tr = 100$  años
- Eventos con probabilidad de ocurrencia baja (eventos extremos)

En la Tabla 6.3 se enlista la utilidad de los tipos de mapa relacionados con inundaciones.

**Tabla 6.3 Información esencial (E) o recomendable (R) según su uso dentro del ciclo de gestión del riesgo**

	Extensión/ Probabilidad	Tirante	Velocidad /Debris	Progreso/ Incremento tirante	Vulnerabilidad	Elementos en riesgo
Planeación de uso de suelo	E	R	R			R
Prevención/ Evaluación preliminar	E				E	R
Prevención /Planeación de gestión de riesgo	E	E	R	R	E	E
Respuesta/ Gestión de desastres	E	E	E	E	E/R	E/R
Recuperación / Seguro contra desastres	E	R	R			E
Alerta Publica	E	R		R		

El post-procesador Mapper puede crear un mapa de riesgo basándose en la metodología de García et al. (2003, 2005). Esta delimitación se propuso por primera vez en el proyecto PREVENE en 2001, en Caracas, Venezuela y posteriormente se adaptó para otras aplicaciones.

El nivel de riesgo de inundación en un punto, está definido por la intensidad de la inundación así como su probabilidad. La intensidad se define en función del tirante y velocidad del agua, mientras que la probabilidad está inversamente relacionada con la magnitud y periodo de retorno del evento.

En los mapas se muestran tres niveles de riesgo: alto, medio y bajo. Este nivel de riesgo es una función discreta resultante de las combinaciones mostradas en la Ilustración 6.13.

Así como la probabilidad del evento está en función de su magnitud, la definición de la intensidad se basa en el método Suizo (OFEE et al. 1997). Éste asigna una intensidad de acuerdo con el tirante ( $h$ ) y el producto del tirante y la velocidad ( $h \cdot v$ ), permitiendo asignar una intensidad alta cuando se presente un tirante elevado independientemente de la velocidad del flujo.

INTENSIDAD	ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO
	MEDIO	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO
	BAJO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO	MUY BAJO
	PROBABILIDAD	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO

PERÍODO DE RETORNO		10	100	500	>>500
PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA		10%	1%	0.2%	<<0.2%

Fuente: (O'Brien J.S., 2009).

#### Ilustración 6.13 Niveles de riesgo de inundación.

Las intensidades se definen en términos del producto del tirante máximo por la velocidad máxima. Aunque basado en él, este modelo difiere del método suizo en varios aspectos por ejemplo, el método suizo para flujo con escombros (*debris flow*) establece que un evento de alta intensidad ocurre cuando el tirante  $h > 1.0$  m y el producto  $v \cdot h > 1.0$  m<sup>2</sup>/s.

La interpretación del daño potencial a la población y viviendas correspondiente a cada nivel de riesgo, es la siguiente:

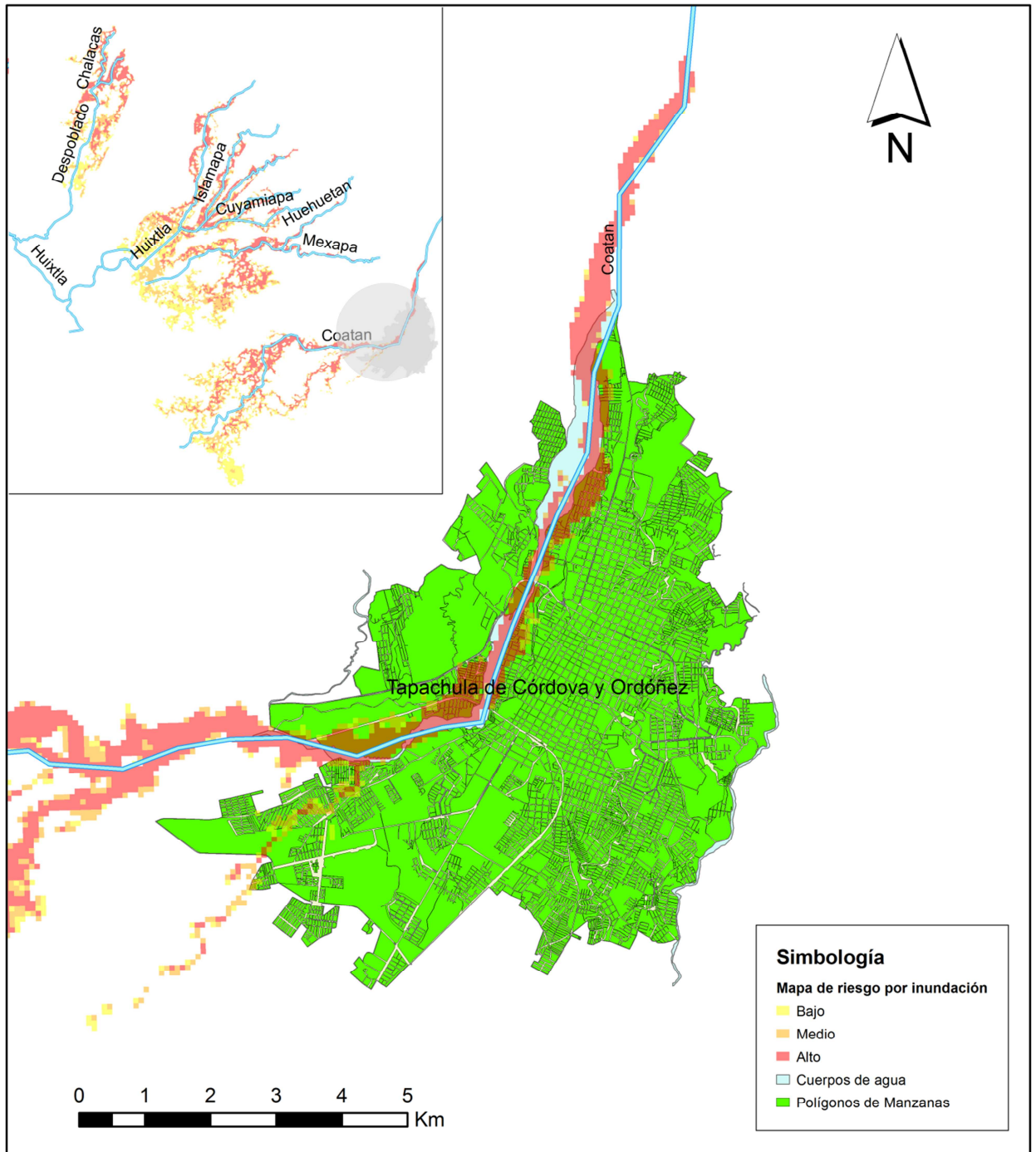
- **Nivel de riesgo alto:** La población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas. Las edificaciones están en peligro de colapsar.
- **Nivel de riesgo medio:** La población está en riesgo fuera de las viviendas. Las edificaciones pueden sufrir daños y colapsar dependiendo de sus características estructurales.
- **Nivel de riesgo bajo:** El riesgo para la población es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir daños leves sin embargo, la inundación o los sedimentos arrastrados llegan a afectar su interior.

**Tabla 6.4 Criterio de riesgo aplicado para generación de mapas de riesgo**

Intensidad del evento de inundación	Altura máxima $h$	Valor sumersión $v \cdot h$
Alta	$h \geq 1.0$	$vh \geq 1.0$
Media	$1 > h \geq 0.5$	$1.0 > vh \geq 0.5$
Baja	$0.5 > h \geq 0.0$	$0.5 > vh \geq 0.1$

En las ilustraciones siguientes se muestran los mapas de riesgo generados con el criterio en la Tabla 6.4.

La Ilustración 6.14 y la Ilustración 6.15, muestran los mapas de riesgo por inundación para un evento con un periodo de retorno de 100 años, corresponden respectivamente a las cuencas del río Coatán y Huehuetán.



**Ilustración 6.14 Mapa de riesgo por inundación, ciudad de Tapachula.**

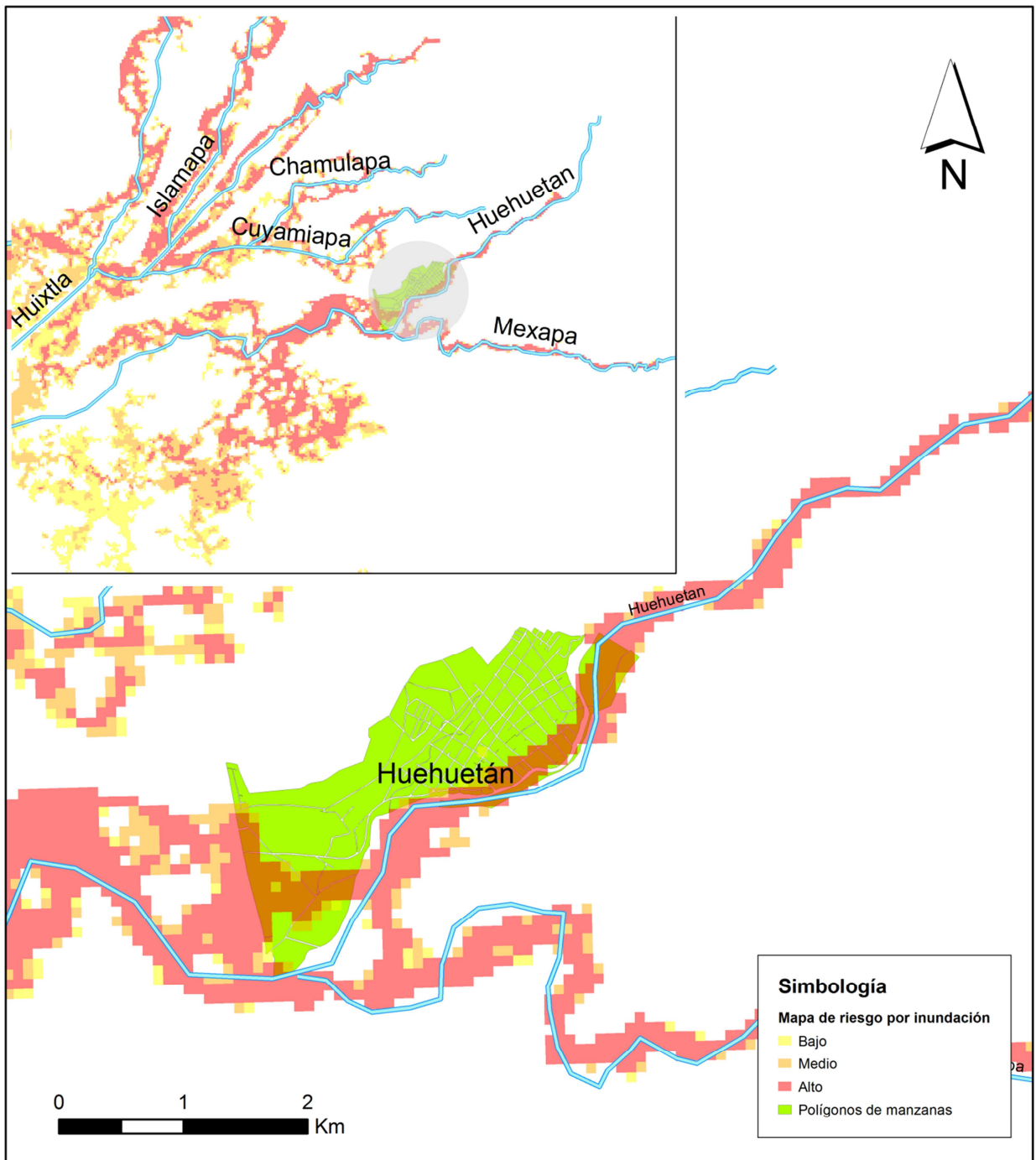


Ilustración 6.15 Mapa de riesgo por inundación, poblado de Huehuetán.



La generación de los mapas de tirante, velocidad y tiempos se realizó para un evento con periodos de retorno de 100 años, asimismo los mapas de riesgo por inundación. En los mapas de riesgo, de acuerdo al criterio aplicado, prácticamente toda la mancha de inundación es zona de alto riesgo. En el perímetro de la mancha se observan zonas de riesgo medio y sólo en la parte baja de la cuenca, en la zona de descarga, es que se observan zonas de riesgo bajo.

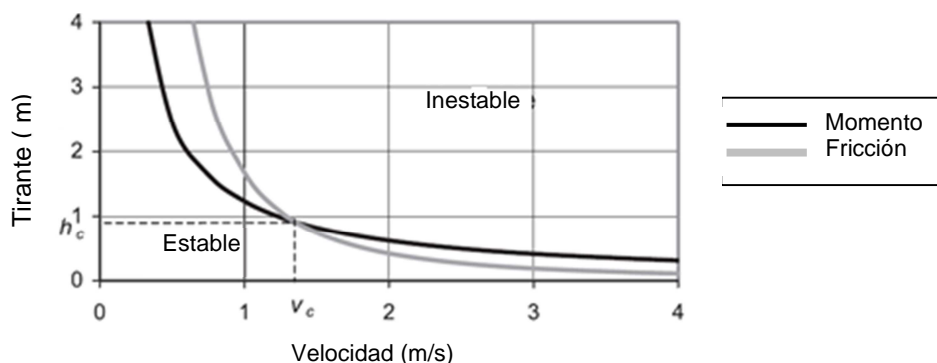
En el siguiente capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos en la modelación.

## 7. Análisis de resultados

En la generación de mapas de inundación, el parámetro que comúnmente determina las zonas de riesgo, es el tirante. En el capítulo 5 se han descrito los diferentes criterios en función de tirante y velocidad, para la definición de zonas de riesgo y en el capítulo 6 se incluyen dos ejemplos aplicando un criterio propuesto para delimitar las zonas de riesgo alto, medio y bajo. A continuación se analiza los resultados.

### 7.1. Efecto de la velocidad y el tirante

A partir de los valores obtenidos en los experimentos, se pudieron establecer ecuaciones empíricas para la inestabilidad por momento y por fricción, las curvas se muestran en la Ilustración 7.1, (variables de entrada:  $m = 75 \text{ kg}$ ;  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $\alpha = 75^\circ$ ;  $L = 1.75 \text{ m}$ ;  $C_D = 1.1$ ;  $B = 0.4 \text{ m}$ ;  $\mu = 0.5$ ;  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ). En ésta se puede observar que el tirante crítico es cercano a 1 m, mientras que el valor crítico para la velocidad es aproximadamente de 1.3 m/s es decir, para valores mayores la persona dentro del flujo pierde estabilidad.



Fuente: Jonkman y Penning-RowSELL, 2008

**Ilustración 7.1 Límite teórico para la inestabilidad por momento y fricción.**

A partir de las ecuaciones, se llega a que la inestabilidad por fricción está relacionada con el producto del tirante por la velocidad al cuadrado  $hv^2$ , mientras que la inestabilidad debida al momento con el producto tirante por velocidad  $hv$  (Jonkman y Penning-RowSELL, 2008). Esto nos dice que mediante análisis teórico de los resultados, además del tirante, el factor de sumersión ( $I = hv$ ) y la velocidad, son determinantes para la pérdida de estabilidad.

Desde el punto de vista práctico, la definición de un valor crítico para el tirante y la velocidad para cada caso, incluiría una gran cantidad de variables. Hasta ahora la velocidad del flujo se consideró uniforme y el análisis de fuerzas estático. A esto se suma la gran variabilidad en peso, estatura y agilidad de la población expuesta.

## **7.2. Aplicaciones del mapa de riesgo en zonas urbanas**

Los ejemplos del capítulo 6 se realizaron para un hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de 100 años sin embargo, el criterio es aplicable para un hidrograma con menor o mayor probabilidad de ocurrencia.

El período de retorno seleccionado está en función del objetivo con el que se genera el mapa. Para la zona de estudio, los mapas generados siguen la recomendación del Manual para el Control de Inundaciones (CONAGUA, 2011), específicamente para las zonas aún no urbanizadas.

En cuanto a las recomendaciones por parte de Centro Nacional de Prevención de desastres, el enfoque es de tipo económico. Para poder hacer una evaluación económica de las pérdidas con los mapas de riesgo por inundación generados, se debe involucrar información de tipo estadística. La información de INEGI que incluye los datos a nivel más detallado se presenta en las AGEB; Baró (2004) presenta una metodología detallada y un ejemplo de la obtención de curvas de daños económicos potenciales por inundación en zonas agrícolas y habitacionales.

### **Ubicación de Infraestructura**

La delimitación de las zonas de riesgo tiene un papel importante en la ubicación de infraestructura, así como de vías de comunicación. Una vez que se conocen las zonas de alto riesgo la infraestructura clave para la seguridad de la población puede ser ubicada en zonas seguras por ejemplo, albergues y hospitales.

Otro tipo de obras de gran importancia son los puentes. En el evento del 2005, varias comunidades quedaron aisladas, lo que impedía proporcionar ayuda a la población afectada debido a la destrucción de los puentes. Debido de las condiciones presentadas con el huracán Stan, actualmente para el diseño de estos para la zona de estudio, la CONAGUA solicita un diseño con un gasto correspondiente a un período de retorno de 1000 años.

## 8. Conclusiones

En el desarrollo de esta tesis se generaron mapas de peligrosidad y riesgo, en estos el nivel de peligro está en función del tirante, velocidad y factor de sumersión del flujo. Se realizaron para dos cuencas de la región Soconusco en el Estado de Chiapas, para un evento correspondiente a un período de retorno de 100 años.

Los mapas de peligrosidad (mapas de tirante, velocidad) muestran un parámetro a la vez, y pueden llevar a subestimar el efecto del flujo de inundación. Como se describió en el capítulo 6 del presente trabajo la velocidad tiene un efecto determinante en la pérdida de estabilidad de una persona que se desplaza dentro de un flujo de inundación.

Los mapas de riesgo generados con base en el factor de sumersión delimitan las zonas de riesgo apegándose al valor crítico de tirante, de velocidad y el producto de ambos, es por ello que proporcionan un panorama más completo de las regiones en la que la vida de la población se verá amenazada. En los mapas correspondientes para diferentes periodos de retorno, el criterio propuesto es aplicable; la selección estará en función del uso. Entre los principales se encuentran:

- Delimitación de las áreas de inundación.
- Identificación de zonas expuestas.
- Identificación de las vías de comunicación que se verán afectadas durante el evento, principalmente en puntos estratégicos (puentes).
- Evaluación de afectaciones y daños potenciales debidos a la falla de una obra de control o aprovechamiento.
- Evaluación del beneficio de una obra de protección.
- Orientación de la planificación territorial y urbana.
- Establecimiento de las restricciones al uso y dominio del suelo.
- Definición de zonas propensas a deslaves y prevención de éstos.
- Planificación de acciones de protección civil.
- Valoración de la capacidad de arrastre del agua y la posibilidad de muerte por ahogamiento de la población.
- Ubicación de puntos de monitoreo (estaciones climatológicas o hidrométricas).

Para la zona de estudio, por ser una cuenca de respuesta rápida, la información proporcionada por los mapas de tiempos (para alcanzar el tirante máximo, por ejemplo), contienen información esencial para la coordinación de un plan de evacuación.

La generación de mapas de riesgo por inundación correspondientes a un período de retorno de 1000 años se recomienda específicamente para la infraestructura que será indispensable en caso de un evento hidrometeorológico: albergues, hospitales y puentes que permitan la evacuación de la población y la llegada de ayuda a la zona de desastre.

Finalmente, para la generación de cualquiera de los mapas mencionados, se deben considerar los cambios en la morfología de la topografía de la zona y particularmente la morfología del cauce, el arrastre de sedimentos y la observación en campo para evaluar la calidad de la información hidrométrica disponible. Todos estos factores afectarán directamente la calidad de los resultados que arroje el modelo y que se representen en los mapas, así como la efectividad de su uso en la planificación, acciones en caso de emergencia y por lo tanto en la protección de las vidas expuestas.

## 9. Referencias

1. 10th International Conference on Urban Drainage. 2005. Urban streets and the design inlets systems. Application in a real case study. Copenhagen, Dinamarca.
2. Abbott M. J., Refsgaard J. C.; 1996. Terminology, Modelling Protocol and Classification of Hydrological Model Codes. En Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers.
3. Ahmed. Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre. Quito, 2008.
4. Almagro García E., Calibración y validación de un modelo numérico de flujo bidimensional con malla no estructurada. Aplicación a un cauce meandriforme. PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT. Universitat Politècnica de Catalunya. 2009
5. Arellano M. J. L. El manejo de cuencas en Chiapas: Una estrategia para el desarrollo regional sustentable. En Medina, R (Editor) Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Simposio 4. IX Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, México, 57-66, 1999.
6. Arreguín Cortés Felipe I., Rosengaus Moshinsky Michel, Acosta Godínez Antonio, Chávez Guillen Rubén, López Pérez Mario, Hungsberg Engelmann Ulrich, Dávila Capiterucho Antonio, Mejía Maravilla Enrique y Rubio Gutiérrez Horacio. 2011. Manual para el Control de Inundaciones.
7. Barnes, B. S., 1940, "Discussion on analysis of runoff characteristics by O. H. Meyer." Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 105, 104–106.
8. Barredo J, I., de Roo A., Lavalle C., 2007; Flood risk mapping at European scale. En: Water Science and Technology Vol. 56 No. 4 pp 11-17.
9. Baumann J., Arellano M. J. L. y Borgman J. Adaptation of the Universal Soil Loss Equation to the Tropical Pacific Coastal Region of the Chiapas State, Mexico. 12<sup>th</sup> ISCO Conference, Beijing 2002
10. Castillo N.L.F. "Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú" Tesis para optar el título profesional de: ingeniero civil Lima, Perú 2006.
11. CENAPRED, 2009. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos.

12. Chiew FHS and Siriwardena L, 2005. Estimation of SIMHYD parameter values for application in ungauged catchments. En: MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Melbourne, December 2005, pp. 2883-2889, CDROM (ISBN 0-9758400-2-9).
13. Cummings, N. W. 1935. "Evaporation from water surfaces: Status of present knowledge and need for further investigations." *Trans., Am.Geophys. Union*, 16-21, 507–510.
14. CONAGUA, 2000. Gerencia Frontera Sur. Información proporcionada directamente por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca.
15. Crawford, N. H., and S. J. Burges, 2004. History of the Stanford Watershed Model, *Water Resour. Impact*, 6, 3–5.
16. Guha-Sapir Debarati, José M. Rodriguez-Llanes, Thomas Jakubicka, 2011. "Using disaster footprints, population databases and GIS to overcome persistent problems for human impact assessment in flood events". Springer.
17. Départementale des Territoires et de la Mer. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS D'INONDATION (P.P.R.I). Commune de TARADEAU. La Florieye 2010.
18. Donigian A. S. Jr., Imhoff J. C., 2006; History and Evolution of Watershed Modeling Derived from the Stanford Watershed Model. Capítulo 2 en *Watershed Models*. pp 21.
19. Emergency Management Australia (1999). "Managing the Floodplain", Australian Emergency Manual Series, Guide 3, Australia.
20. EXCIIMAP (European exchange circle on flood mapping). Handbook on good practices for flood mapping in Europe. 2007
21. Fair, G. M., and Hatch, L. P. 1933. "Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand." *J. Am. Water Works Assoc.*,25, 1551–1565.
22. Garcia, R. & Lopez, J.L, 2005. "Debris Flows of December 1999 in Venezuela." Chapter 20<sup>th</sup> of *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Jakob, Matthias, Hungr, Oldrich Eds. Springer Verlag Praxis, Berlin.

23. Garcia, R, J.L. López, M. Noya, M.E. Bello, M.T. Bello, N. González, G. Paredes, M.I. Vivas & J.S. O'Brien, 2003. "Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela." Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. Davos, Switzerland. September 10-12.
24. Green, W. H., and Ampt, C. A. 1911. "Studies on soil physics: 1. Flow of water and air through soils." *J. Agric. Sci.*, 4, 1–24.
25. Horton, R. E. 1933. "The role of infiltration in the hydrologic cycle." *Trans., Am. Geophys. Union*, 145, 446–460.
26. Horton, R. E. 1935. "Surface runoff phenomena, Part 1—Analysis of hydrograph." *Horton Hydrology Laboratory Publication No. 101*, Voorheesville, N.Y.
27. Horton, R. E. 1939. "Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacities." *Trans., Am. Geophys. Union* 20-IV, 683–694.
28. Horton, R. E. 1940. "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity." *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5, 399–417.
29. Hoover, M. D., and Hursh, C. R. 1943. "Influence of topography and soil-depth on runoff from forest land." *Trans., Am. Geophys. Union*, 24, 693–697
30. HR Wallingford, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University y Risk & Policy Analysts Ltd. Flood and Coastal Defence R&D Programme. Flood Risks to People Phase 2 FD2321/TR2 Guidance 2006
31. Hursh, C. R. 1944. "Appendix B—Report of the subcommittee on subsurface flow." *Trans., Am. Geophys. Union*, 25, 743–746.
32. IPCC 2001. *Climate change: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.
33. Jacob, C. E. 1943. "Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 1. Theory." *Trans., Am. Geophys. Union* 24, 564–573.
34. Jacob, C. E. 1944. "Correlation of groundwater levels and precipitation on Long Island, New York: 2. Correlation of data." *Trans., Am. Geophys. Union*, 24, 321–386.
35. James, W. P., J. Warinner, and M. Reedy, 1992. "Application of the Green-Ampt infiltration equation to watershed modeling," *Water Resources Bulletin*, AWRA, 28(3), pp. 623-634.



36. JICA. Reporte intermedio del estudio sobre desastre causado por la inundación en septiembre de 1998. En Estudio de desarrollo integral de agricultura, ganadería y desarrollo rural de la región del Soconusco, Chiapas. SAGAR-JICA-PCI. 1999
37. Jiménez Bello M. A., Martínez Alzamora F., Arviza Valverde J., Bou V., Bartolín H., Manzano Juárez J.; Optimización de la sectorización de redes de riego a presión mediante algoritmos genéticos. : XXVI Congreso Nacional de Riegos: Huesca 2008. pags. 97-98.
38. Jonkman S.N. y Penning-Rowsell E., 2008. "Human instability in flood flows". Journal of the American water resources association. American Water Resources Association. Vol. 33, No. 4
39. Karl Spachinger, Wolfgang Dorner, Rudolf Metzka, Kamal Serrhini, Sven Fuchs, Flood Risk and Flood Hazard Maps – Visualisation of Hydrological Risks. XXIVth Conference of the Danubian Countries. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 4 (2008).
40. Kostiakov, A. M. 1932. "On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and of the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration." Trans. 6th Communic., Int. Soil Science Society, Part 1, 17–29. Russia.
41. Kundzewicz W. Zbigniew, 2002, Non-structural Flood Protection and Sustainability. Water International, Vol. 27, No. 1, pp 3-13.
42. Kundzewicz W. Zbigniew y Kuyoshi Takeuchi, 1999. Flood protection management: quo vadimus?. Journal del Sciences hydrologiques. 44:3, 417-432.
43. Lighthill, M. J., and Whitham, G. B. 1955. "On kinematic waves: Flood movement in long rivers." *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 229,281–316.
44. Loster T., Flood trends and global change. Proc. Euroconference on global change and catastrophe risk management: Flood risk in Europe. IISA Laxenburg, Austria. 1999
45. Lloyd, P. M., and Stansby, P. K., 1997. Shallow water flow around model conical islands of small side slope. Part 1: Surface piercing. J. Hydraul. Eng. 123, 1057-1067.
46. Manilow G. V., Condición de peligrosidad de inundación para las personas. En: RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos. H. D. Farias, J. D.

- Brea y R. Cazeneuve (Editores). Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén, Argentina.
47. Moel H. de, van Alphen J., and J. C. J. H. Aerts. Flood maps in Europe – methods, availability and use. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 289–301, 2009.
  48. Moradkhani H., Sorooshian S., General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis, En *Hydrological Modelling and the Water Cycle*. Springer 2009.
  49. D.P. Solomatine. Data-driven Modelling: paradigm, methods, experiences. *Proc. 5th Int. Conference on Hydroinformatics*. Cardiff, UK, July 2002, pp.757-763.
  50. O'Brien J.S. 2009. FLO-2D User's Manual, Versión 2009.06, Nutrioso, Arizona. Ubicación: <http://www.flo-2d.com>.
  51. Olarte R. E., Obregón N. Y Rengifo P.; Algoritmos evolutivos en hidroinformática. 2003.
  52. Penman, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 193, 120–145.
  53. Pujol, A., Menéndez, A.; Análisis unidimensional de escurrimiento en canales. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 1987
  54. Ribera Masgrau L., Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. 2004.
  55. Richardson, B. 1931. "Evaporation as a function of insolation." *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 95, 996–1011.
  56. Roessel, B. W. P. 1950. "Hydrologic problems concerning the runoff in headwater regions." *Trans., Am. Geophys. Union*, 31, 431–442.
  57. Rossi M., Corso di rischio geologico ed idrogeologico. Rischio da inondazioni. Sapienza Università di Roma Facoltà di Ingegneria. 2009.
  58. Russo B., Gómez M., Martínez P., Sánchez H., Methodology to study the surface runoff in urban streets and the design of drainage inlets systems. Application in a real case study. 2005.
  59. Salas S., M. A. "Obras de protección contra inundaciones". No. 49, Serie cuadernos de investigación, CENAPRED, Coordinación de Investigación, Área de riesgos hidrometeorológicos. México, noviembre 1999.
  60. Salas S. y Jiménez E, Inundaciones. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2007.

61. Saldarriaga J., Salas D. y Gómez R.; Aplicabilidad de métodos de inteligencia artificial a la calibración de redes de acueducto. Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos 2003.
62. Sherman, L. K. 1932. "Stream flow from rainfall by the unit graph method." *Eng. News-Rec.*, 108, 501–505.
63. Singh V. P., Frevert D. K.; *Watershed Models*. CCR 2006.
64. Singh Vijay P. y Woolhiser David A., *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*, *Journal of Hydrologic Engineering*. 2002.
65. Spatka J., Jirinec P., Sklenár P., Zeman E.; Hydroinformatics tool in practice "Before-During-After" August 2002 flood on Vltava and Elbe Catchments-Czech Republic. En *Flood risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer, 2006. 35-46.
66. Tate E. C., *Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS*. 1999
67. Thornthwaite, C. W. 1948. "An approach toward a rational classification of climate." *Geogr. Rev.*, 38, 55–94.
68. Todini, E., Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology & Earth System Sciences* 11(1), 2007 pp 468-482.
69. United Nations, Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR) 2005. *Guidelines for Reducing Flood Losses*. Geneva.
70. van Alphen J., Martini F., Loat R., Slomp R. y Passchier R.; *Flood risk mapping in Europe, experiences and best practices*.
71. Vásquez Ojeda J. A. *Modelación Numérica en Hidráulica*. Perú. 2003.
72. Visser J.H. Use of mathematical models in water resources and water management studies. *Options Méditerranéennes* 14, Agosto 1972. pp 72-75.
73. World Meteorological Organization, *Urban Flood Risk Management. A Tool for Integrated Flood Management*. 2008.

## **Nota aclaratoria**

La presente tesis puede considerarse una guía para la aplicación de un criterio para generar mapas de riesgo de inundación. Este criterio, considera el tirante, la velocidad y el factor de sumersión de un flujo de inundación para asignar un nivel de riesgo (alto, medio o bajo).

Las condiciones hidrológicas e hidráulicas presentadas en la cuenca de estudio llevan a resultados que no son válidos en ningún caso para esa zona de estudio actualmente, dado que las condiciones del cauce han cambiado, en particular habrá que señalar el hecho de que en el modelo no se incluyeron bordos, obras de control o cualquier otro elemento estructural que protege a la población vulnerable y expuesta a inundaciones.

Se recomienda a futuro utilizar un modelo actualizado del cauce que incluya todas las obras de protección y control, considerando la presente metodología o guía; definiendo así una mejor calibración del mismo para la obtención de nuevos mapas de riesgo en situaciones reales o aproximadas a la zona de estudio.