



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS
FORENSE DE INUNDACIONES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

(HIDRÁULICA)

PRESENTA

ING. LUCÍA ALEJANDRA HERRERA LOZANO

TUTOR:

DR. ALDO IVÁN RAMÍREZ OROZCO

2010





Contenido

1. Introducción	7
1.1 Antecedentes	7
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	13
1.4 Contenido de la tesis	14
2. Estado del conocimiento	17
2.1 La ingeniería y la hidrología forenses	17
2.1.1 La ingeniería forense	17
2.1.2 La hidrología forense	18
2.2 El concepto de inundación	19
2.3 Factores comunes relacionados con inundaciones	22
2.3.1 Fisiográficos	23
2.3.2 Hidroclimáticos	24
2.3.3 Socio – políticos	24
2.4 Daños por inundación.....	25
2.4.1 Daños por inundación en zonas urbanas	27
2.4.2 Daños por inundación en zonas rurales.....	29
2.5 El Concepto de análisis forense de inundaciones.....	30
2.5.1 Casos de estudio con el enfoque forense.....	31
3. Propuesta de guía metodológica para el análisis forense de inundaciones	38
3.1 Recopilación de información	38
3.1.1 Acerca de la zona afectada	38
3.1.2 Climatología y meteorología. Pronósticos y registros	43
3.1.3 Hidrometría	46
3.1.4 Obras hidráulicas existentes en el sitio o la cuenca. Características y manejo	47
3.1.5 Infraestructura de protección.....	51
3.1.6 Daños causados	52
3.1.7 Manejo de la emergencia.....	53
3.1.8 Testimonios personales	54
3.1.9 Registros históricos	54
3.1.10 Otros factores de influencia en la inundación	54



3.2	Análisis con un enfoque hidrometeorológico.....	55
3.2.1	Génesis de las tormentas	55
3.2.2	Análisis del comportamiento general de los registros históricos y los correspondientes al evento	57
3.2.2.1	Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas	57
3.2.2.2	Estado y calidad de los registros hidrometeorológicos	57
3.2.2.3	Distribución espacio-temporal de precipitación.....	60
3.2.2.4	Análisis de tendencia de las series de tiempo	61
3.3	Análisis con un enfoque hidrológico.....	62
3.3.1	Delimitación de la zona y caracterización hidrogeomorfológica de las cuencas.....	62
3.3.2	Estado y calidad de la información hidrométrica.....	64
3.3.3	Análisis de tendencia de los registros de hidrometría	65
3.3.4	Análisis probabilístico de frecuencias. Precipitación y gastos.....	65
3.3.5	Establecimiento de períodos de retorno de precipitación y gasto	67
3.3.6	Estimación de lluvia en exceso	69
3.3.7	Modelación y simulación del proceso lluvia-escurrecimiento	70
3.4	Análisis con un enfoque hidráulico.....	75
3.4.1	Revisión del diseño y estado de las obras hidráulicas.....	75
3.4.2	Manejo y operación (teórico y real) de embalses antes y durante el evento.....	81
3.4.3	Modelación y simulación hidráulica de la red de cauces	82
3.4.4	Comportamiento de la red de cauces y de las llanuras de inundación	85
3.4.5	Procesos de socavación y sedimentación.....	86
3.4.6	Influencia de los niveles del mar.....	88
3.5	Integración de los análisis hidrológicos e hidráulicos con otros factores	89
3.5.1	Generación de mapas de inundación teóricos y comparación con los reales.....	90
3.5.2	Análisis de la afectación en asentamientos humanos.....	91
3.5.3	Manejo de la emergencia.....	97
3.5.4	Análisis de resultados del evento actual y comparación con eventos precedentes de magnitud similar.....	100
3.5.5	Conclusiones y propuestas o sugerencias.....	101
4.	Las inundaciones de 2007 en Tabasco, México, desde la perspectiva de la guía metodológica	107
4.1	Contexto general del estado de Tabasco	107
4.2	Crónica del evento de inundación entre los meses de octubre y noviembre de 2007	108



4.3 Probables causas o factores de influencia en la inundación.....	114
4.4 Actores y acciones.....	115
4.4.1 Acciones pre-desastre.....	115
4.4.2 Acciones durante el desastre	116
4.4.3 Acciones post-desastre	122
4.5 Análisis de acciones desde la perspectiva de la guía metodológica.....	127
4.6 Conclusiones	146
Comentarios finales.....	150
Bibliografía y Referencias.....	152



Índice de figuras

Figura 1.1 Catástrofes naturales de gran envergadura	8
Figura 1.2 Mapa mundial de catástrofes naturales para el año 2007	8
Figura 1.3 Mapa global de eventos extremos de inundación desde 1985 hasta 2002.....	9
Figura 1.4 Mapa global de zonas donde las inundaciones fueron probablemente sub o sobre representadas	10
Figura 1.5 Número de eventos de inundación por continente, para el periodo de 1987-1996..	10
Figura 1.6 Daños por inundación por continente, en millones de dólares, para el periodo de 1987-1996	11
Figura 1.7 Muertes por inundación por continente, para el periodo de 1987-1996	11
Figura 1.8 Inundaciones por entidad federativa de 1950 hasta 1988.....	12
Figura 2.1 Principales causas de inundación	25
Figura 2.2 Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad	26
Figura 2.3 Cultivo inundado	29
Figura 2.4 Ciudad de San Luis Obispo, Ca	31
Figura 2.5 Nueva Orleans después del paso del huracán Katrina	34
Figura 3.1 Niveles de alerta para la prevención de desastres de fenómenos hidrometeorológicos	100
Figura 4.1 Funcionamiento de la presa Peñitas del 1 de octubre al 4 de noviembre de 2007	133
Figura 4.2 Transito de avenidas en la presa Peñitas para diferentes condiciones de operación	134
Figura 4.3 Mediciones del nivel del mar en la estación de Frontera, Tabasco	136
Figura 4.4 Evolución de los cauces de la planicie tabasqueña	137
Figura 4.5 Hidrogramas producidos	138



Índice de Tablas

Tabla 3.1 Variables hidrometeorológicas medidas por cada tipo de estación	44
Tabla 3.2 Variables que miden las estaciones hidrométricas	46
Tabla 3.3 Periodo de retorno de diseño para obras de protección de acuerdo con las características de la zona a proteger	80
Tabla 3.4 Resumen de tipos de vivienda y sus características	92
Tabla 3.5 Efectos según tipo de construcción en unidades de salud	94
Tabla 4.1 Precipitaciones asociadas con un periodo de retorno	132
Tabla 4.2 Apoyos del FONDEN para el estado de Tabasco	140
Tabla 4.3 Resumen de daños en millones de pesos para Tabasco por la inundación de 2007	142



Capítulo 1: Introducción

*La naturaleza benigna provee de manera que en
cualquier parte halles algo que aprender*
Leonardo Da Vinci



1. Introducción

1.1 Antecedentes

Las inundaciones no son un fenómeno reciente. Por ejemplo, se tiene registro del diluvio universal, que más allá de tintes religiosos ha sido estudiado científicamente, generando varias teorías para su explicación. Sin embargo, es lógico pensar que la información sobre inundaciones es más abundante y está mejor documentada en los últimos siglos. Las inundaciones ocurren en cualquier lugar donde la capacidad de infiltración del suelo o del sistema de drenaje para transportar el escurrimiento se vean excedidos. Las inundaciones son también una parte del ciclo natural del agua. Este tipo de fenómenos está entre los desastres naturales más frecuentes y mortíferos, afectando a un promedio de 520 millones de personas al año. Casi la mitad de la gente que pierde la vida en desastres naturales de las décadas recientes ha sido víctima de inundaciones, mismas que también explican cerca de un tercio de pérdidas económicas en todo el mundo (UNESCO, 2008).

Con el afán de tener presente que tan recurrentes son las inundaciones, aquí se presentan algunas estadísticas a nivel mundial. De acuerdo con las Naciones Unidas, las grandes catástrofes naturales son aquellas que exceden considerablemente la capacidad de autoayuda de las regiones afectadas y se requiere de ayuda a mayor escala, como la internacional. A partir de mediados de los años ochenta, según se puede observar en la Figura 1.1, los desastres naturales aumentaron de forma notable. Una comparación de la distribución temporal de los tipos de eventos hace ver que apenas se pueden reconocer diferencias entre las categorías de eventos meteorológicos e hidrológicos, sin embargo, en total, dominan las catástrofes naturales meteorológicas (tormenta tropical, tormenta de invierno, temporal, pedrisco, tornado, tormentas locales). La tendencia pareciera creciente hacia cada vez más y más catastróficos eventos naturales, ya que mientras en los años cincuenta se registraron, en promedio dos catástrofes de gran envergadura por año, desde el año 2000 se registran siete, sobre todo meteorológicas.

La Figura 1.2 muestra el número de catástrofes naturales registradas en 2007, ilustrando mediante círculos de diferente diámetro la magnitud de acuerdo con el tipo de evento. Se puede ver que las catástrofes naturales muestran mayor ocurrencia en América, Europa y Asia, con un gran registro de eventos meteorológicos, seguidos por eventos hidrológicos de mediana a gran magnitud. Aunque los eventos geofísicos y climatológicos son menores y más dispersos, no dejan de ser importantes, ya que se puede recordar la ola de calor que se presentó en Francia en el año 2003 provocando más de 11,000 muertos, según datos difundidos tras el encuentro que mantuvieron el ministro de Sanidad, Jean-Francois Mattei, y el director general del Instituto Nacional de Vigilancia Sanitaria, Gilles Brucker (www.elmundo.es).

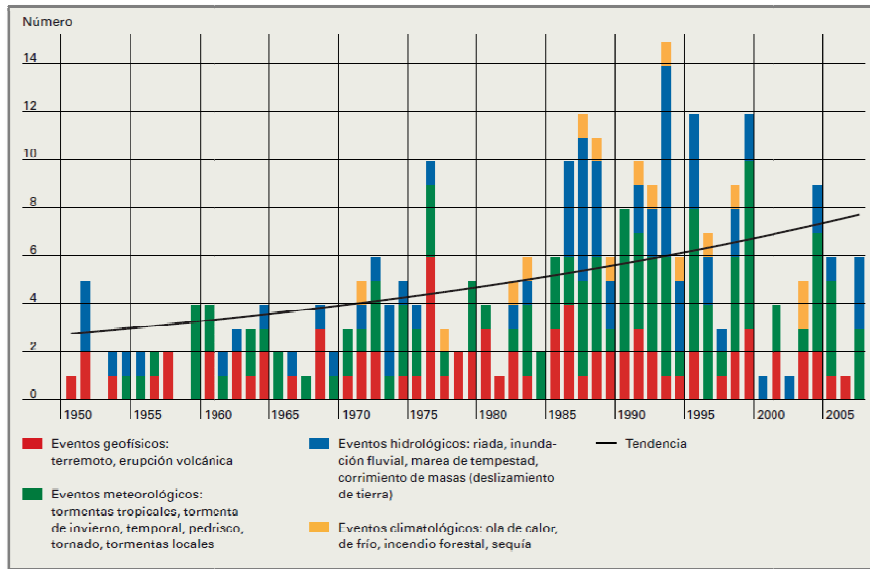


Figura 1.1 Catástrofes naturales de gran envergadura.

Número de eventos. El diagrama muestra, por cada año, el número de las grandes catástrofes según el tipo de evento. Tomada de Topics Geo, Catástrofes naturales 2007 Análisis, Valoraciones, Posiciones. Grupo de Investigación Georiesgos, Münchener Rück, www.munichre.com

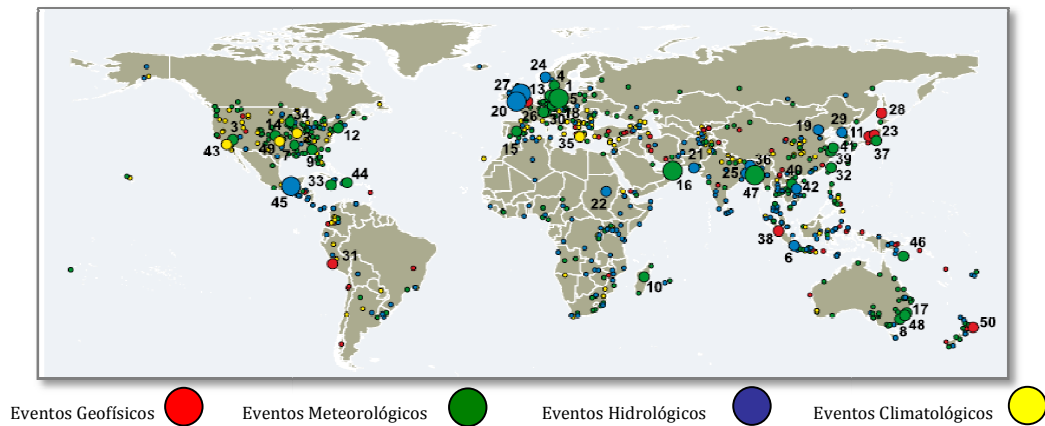


Figura 1.2 Mapa mundial de catástrofes naturales para el año 2007.

Adaptada de Topics Geo, World map of natural catastrophes 2007. Grupo de Investigación Georiesgos, Münchener Rück, www.munichre.com

Así, las estadísticas demuestran que dentro de los desastres naturales, los eventos hidrológicos ocupan regularmente el segundo lugar en los eventos extremos, siendo además las inundaciones las más citadas. Como se aprecia en la Figura 1.3, las zonas de mayor riesgo son la parte de América que colinda con el Océano Atlántico y el Caribe, la parte Sur de Europa, así como la colindancia de Asia con el Océano Indico y Pacífico. Esto puede ser consecuencia de que dichas zonas, se encuentran

entre o cercanas a las líneas del trópico de Cáncer y de Capricornio, que precisamente corresponden a las zonas del mar que presentan mayor temperatura media anual en la superficie (promedio de 25°C), provocando mayor evaporación, humedad y precipitaciones. Esta zona corresponde también a la región más activa en la generación de huracanes.

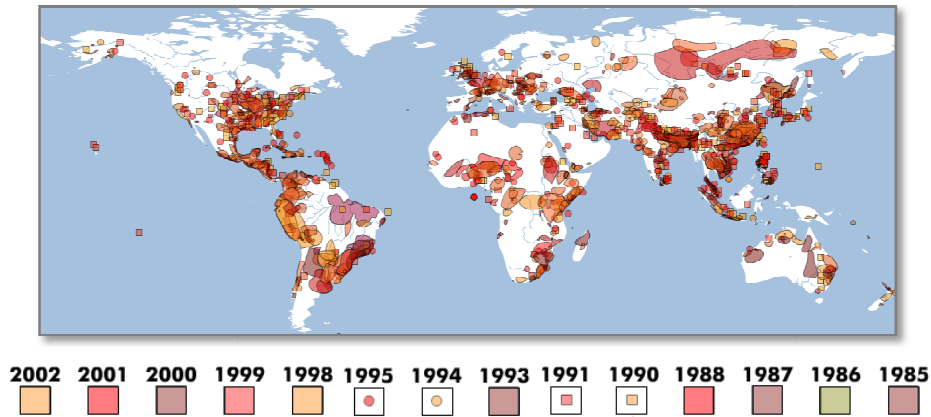


Figura 1.3 Mapa global de eventos extremos de inundación desde 1985 hasta 2002.

Adaptada de © 2004 Dartmouth Flood Observatory, www.dartmouth.edu/~floods

La información que presentan las estadísticas no siempre se debe interpretar de manera literal, pues existen factores que favorecen el hecho de que los registros se concentren en las zonas que ya se han mostrado en los gráficos anteriores. La figura 1.4 ilustra, en azul, las zonas subrepresentadas en el registro de eventos. Así, se tiene que existen países en donde hay muy pocos registros de lluvias y más aún de gastos, lo cual explica porqué el intervalo de repetición es proporcionalmente más alto en países como Estados Unidos, Francia y Reino Unido. El intervalo de repetición en Asia es proporcionalmente bajo lo cual se puede explicar por la dimensión estacional de las inundaciones en esta área, si bien algunos acontecimientos son excepcionales, la mayoría de ellos son estacionales.

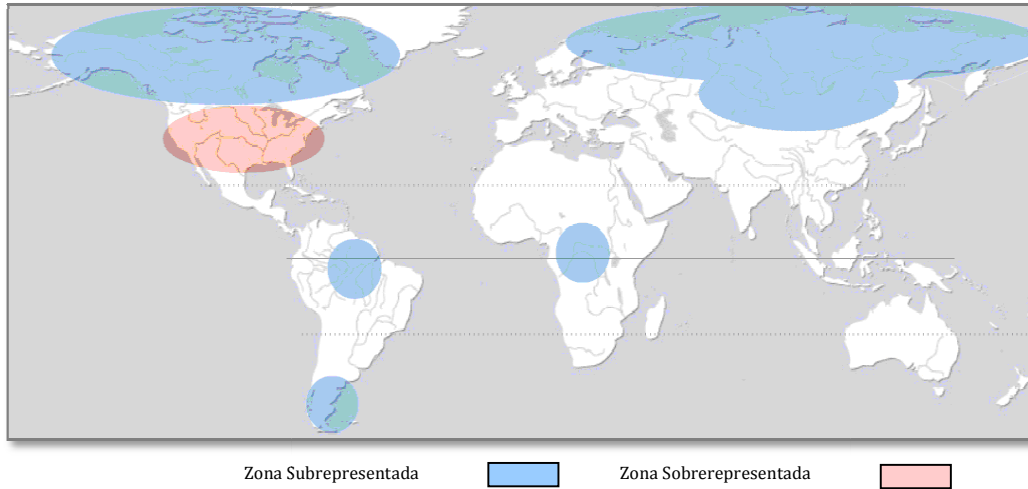


Figura 1.4 Mapa global de zonas donde las inundaciones fueron probablemente sub o sobre representadas.

Adaptada de © 2004 Dartmouth Flood Observatory, www.dartmouth.edu/~floods

Finalizando con las estadísticas globales y organizando los eventos registrados por continentes, en las Figuras 1.5, 1.6 y 1.7 se observa que Asia ha sido el continente más azotado por este tipo de desastres naturales y en el que más daños y muertes se han generado, minimizándose estas cantidades siempre en Oceanía, con la menor incidencia, daños y muertes a causa de las inundaciones con un promedio de seis eventos por año y aproximadamente 70 muertes por evento, lo cual no deja de ser significativo.

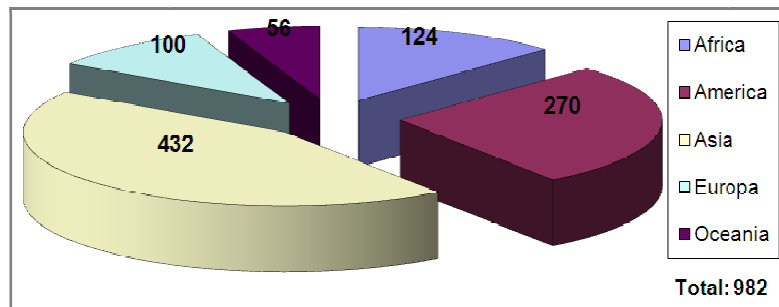


Figura 1.5 Número de eventos de inundación por continente, para el periodo de 1987-1996.

Adaptada de Kingma, 2008.

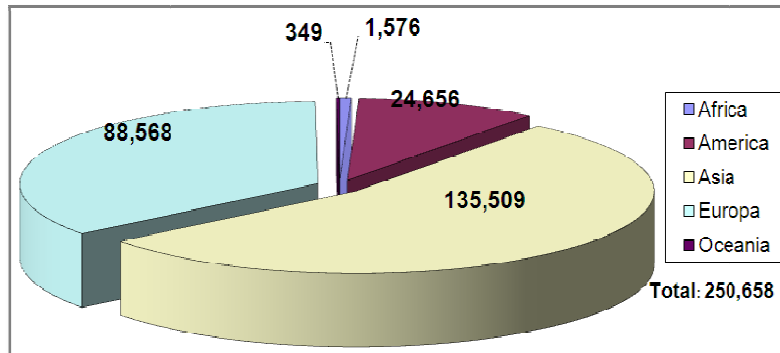


Figura 1.6 Daños por inundación por continente, en millones de dólares, para el periodo de 1987-1996.

Adaptada de Kingma, 2008.

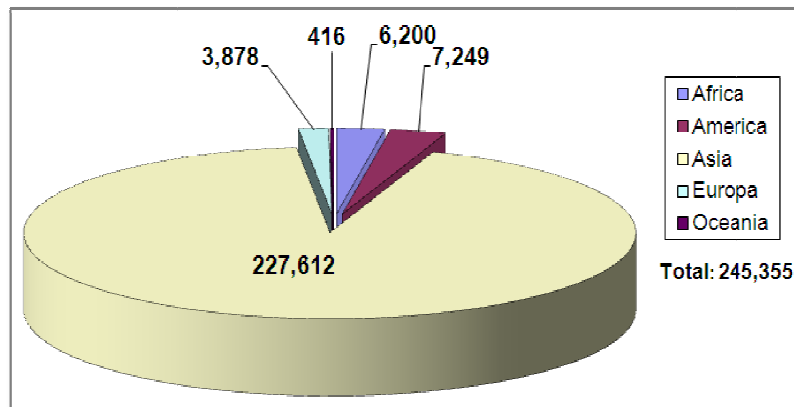


Figura 1.7 Muertes por inundación por continente, para el periodo de 1987-1996.

Adaptada de Kingma, 2008.

México no está exento de las inundaciones, ya que es azotado por una diversidad de fenómenos meteorológicos que producen condiciones extremas de precipitación, desde la acción de hasta precipitaciones originadas por fenómenos convectivos. De las situaciones catastróficas más relevantes en nuestro país se pueden recordar los daños producidos por el Huracán Gilberto en 1988 con más de 200 muertes (Domínguez *et al.*, 1994). Por otro lado, son importantes también los efectos del Huracán Pauline en 1997, las inundaciones en Chiapas en 1998 y Tabasco en 1999, 2003 y 2007. Así pues, desde el norte, centro y sur de nuestro país, se han sufrido los efectos de las inundaciones.

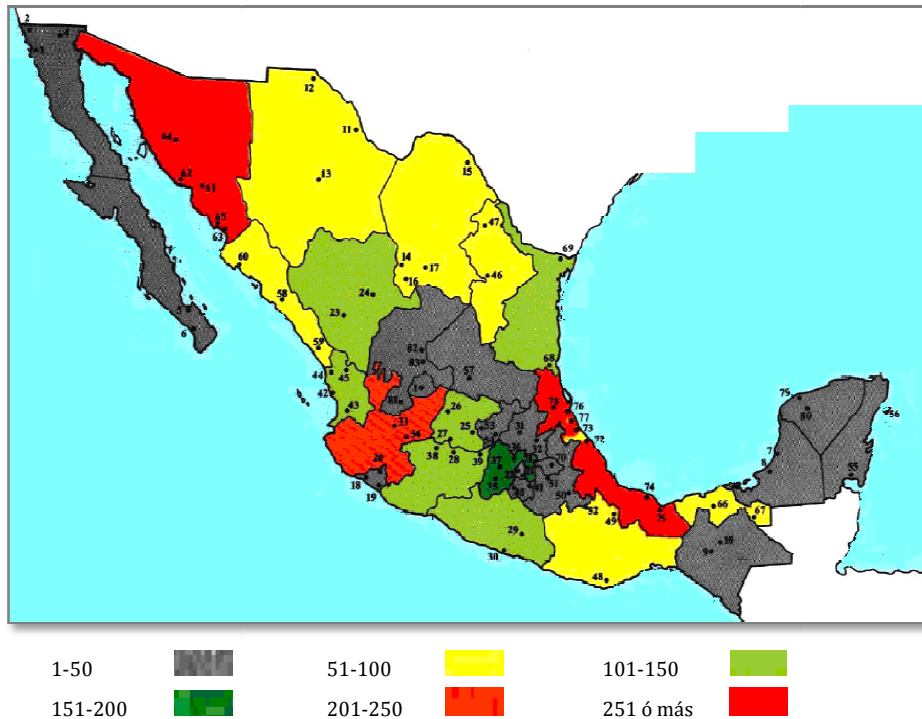


Figura 1.8 Inundaciones por entidad federativa de 1950 hasta 1988.

Fuente: Atlas Nacional de Riesgo, emitido por la Dirección General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, agosto 1991.

Durante el periodo de 1950 a 1988, en México se alcanzó un total de 2,681 inundaciones, lo cual se traduce en un poco más de 70 inundaciones significativas por año. Como se muestra en la Figura 1.8, las entidades federativas donde se presentan más inundaciones son Veracruz, Sonora y Jalisco. Es de importancia mencionar que estas zonas además de tener su parte costera, cuentan con un registro de más de 25 presas dentro de su infraestructura hidráulica, y aunque una de sus aplicaciones es el control de las avenidas, esto también podría sugerir un riesgo si llegasen a fallar en su funcionamiento o en su operación, con lo que juegan un papel determinante en la ocurrencia de inundaciones.



1.2 Justificación

Dentro de la búsqueda constante para disminuir, en lo posible, el impacto que las inundaciones causan en diferentes niveles de la economía y la sociedad de un país, se han realizado innumerables investigaciones. Sin embargo, la mayoría de éstas se ven disgregadas entre las instituciones que llevan a cabo dichas investigaciones, de acuerdo con el área del conocimiento en la que se encuentren ubicadas, además de que pocas veces se conjuntan los resultados haciendo que sea difícil obtener una herramienta sólida e integral que ayude a cumplir el objetivo. En la medida que sean identificados los factores que agravan el impacto de un desastre por inundación, se tendrán instrumentos fiables para poder mitigar el efecto que dicho impacto provoca. Para ello, han sido pocos los esfuerzos, por lo menos en conocimiento del autor, que se manejaron desde la perspectiva del análisis multidisciplinario de un evento de inundación. Una vez sucedida una inundación se lleva a cabo un proceso de restauración que se ve prolongado tanto como sea necesario, sin embargo seguido a la restauración es necesario realizar una investigación que esclarezca las causas de la inundación así como los factores que tuvieron mayor peso en el impacto provocado por el desastre. Es por ello que esta investigación trata de mostrar la importancia del análisis forense de inundaciones, como la integración de análisis particulares del evento de inundación. Así pues, mediante la guía metodológica para el análisis forense de inundaciones se pretende la unificación de criterios de actuación y además el establecimiento de pautas metodológicas que permitan tener como resultado esa herramienta sólida, que basada en un estudio objetivo, proporcione estrategias efectivas de mitigación de los efectos por inundaciones.

1.3 Objetivos

1. Disponer de un documento con base científica que ayude al análisis de inundaciones, y con éste establecer acciones para la prevención de las mismas sobre todo en regiones con susceptibilidad importante a este tipo de fenómenos.
2. Unificar criterios de actuación y establecer pautas metodológicas para el análisis forense de inundaciones, que permitan obtener resultados lo suficientemente objetivos para planear estrategias de mitigación de efectos por inundaciones.
3. Analizar integralmente factores geográficos, hidrológicos e hidráulicos, sociales, políticos y económicos, y así identificar cuáles de ellos intervinieron como los principales favorecedores o agravantes ante un evento de inundación.
4. Transmitir interés por el estudio del tema así como a la prevención de inundaciones y contribuir a la disciplina llamada Hidrología Forense.
5. Analizar las inundaciones sucedidas en Tabasco en 2007 desde la perspectiva metodológica.



1.4 Contenido de la tesis

El documento se ha ordenado de modo que el lector pueda conocer en primera instancia todos los elementos posibles relacionados con los fenómenos de inundación, para determinar los factores que incrementan el impacto derivado de estos fenómenos y los daños que causan. A continuación se establece la propuesta de la guía metodológica para el análisis forense de inundaciones, que consigna los procedimientos a aplicar desde los enfoques hidrometeorológico, hidrológico e hidráulico y finalmente se muestra a través de un caso real, la forma en que cada una de las acciones realizadas en forma aislada pudieron haber constituido un análisis completo de la inundación y la importancia de que este tipo de evaluaciones se lleve a cabo.

Particularmente, a continuación se describe brevemente los temas abordados dentro de cada capítulo.

En el capítulo dos, *estado del conocimiento*, el objetivo primordial es proporcionar información que ponga en contexto al lector ante las ciencias forenses y su aplicación en la hidrología forense. Posteriormente se aborda como tema central el concepto de inundación, describiendo éste a través de su ocurrencia así como de las causas que comúnmente lo ocasionan. A su vez se toman en cuenta los daños que las inundaciones pueden provocar tanto en zonas urbanas como rurales, enfocado principalmente a la definición de parámetros que permitan su cuantificación. Finalmente se muestran dos casos de desastre por inundación, en los que fue aplicado el enfoque forense para la determinación del factor principal de fallo del sistema que permitió la magnitud del impacto recibido. A través de la investigación bibliográfica no se encontraron más aplicaciones en la hidrología de este enfoque alrededor del mundo.

En el capítulo tres, *propuesta de guía metodológica para el análisis forense de las inundaciones*, se muestra la metodología propuesta para realizar el análisis forense de una inundación. La metodología se centra en la búsqueda de estrategias válidas para incrementar el conocimiento en este rubro sin cuestionar los conocimientos previos ya aceptados por la comunidad científica. Ésta se dividió en cinco fases principalmente, la recopilación de información, los análisis hidrometeorológico, hidrológico e hidráulico, para con ello llevar a cabo la integración de todos estos análisis con los factores de influencia de la inundación no considerados aun. Unos de los primeros productos de este análisis forense será la generación de los mapas de inundación teóricos y reales. La contrastación de éstos permitirá la identificación objetiva de las zonas con mayor problemática real y riesgo. Lo anterior se traduce en mapas de riesgo generalizados y mapas de la inundación estudiada, este último como herramienta para la determinación de las afectaciones debidas al desastre. El último análisis que se propone es el del manejo de la emergencia, el cual proporciona el factor humano que hace de esta guía una investigación integral y no solo con



enfoques técnicos. El siguiente producto esperado es la identificación de los factores con influencia en la inundación y su jerarquización para finalmente tomar en cuenta las propuestas y recomendaciones que se hacen de acuerdo con la génesis de la inundación. Estas recomendaciones se muestran a través de una lista no limitativa clasificada para diferentes factores que hayan causado el desastre.

En el capítulo cuatro, *las inundaciones de 2007 en Tabasco, México, desde la perspectiva de la guía metodológica*, primeramente se hace una descripción del estado de Tabasco, enfocándose principalmente en sus rasgos hidrológicos y poblacionales. Se continúa con la crónica del desastre debido a las inundaciones ocurridas entre finales de octubre y principios de noviembre de 2007. Esta crónica se formó a través de diferentes puntos de vista y vivencias, esto es, se involucraron los comentarios de las autoridades, de los cuerpos de ayuda, de los medios de comunicación y por supuesto de los habitantes. Posteriormente se realiza una investigación de las acciones realizadas derivadas del desastre por instituciones tanto gubernamentales como no gubernamentales. Éstas se realizaron principalmente para el establecimiento de una causa determinante en dicha inundación, sin embargo, prácticamente ninguna de las investigaciones cumple con los procedimientos necesarios para completar un análisis desde la perspectiva forense y con ello el establecimiento objetivo de las causas. Aun así, con dichas acciones se trata de integrar un análisis forense, ubicando éstas dentro de los procedimientos que les corresponderían, además de completar lo anterior con información generada a través de un SIG, para la mejor visualización de la problemática que se vivió en Tabasco. Se emiten observaciones a las acciones realizadas de acuerdo con lo que se debería haber hecho para cumplir con cada uno de los procedimientos. Finalmente y de acuerdo con las investigaciones mencionadas y la información complementaria se establecen las causas y efectos así como las lecciones aprendidas. En este sentido, no se puede decir que tal establecimiento de causas sea completamente objetivo desde la perspectiva metodológica, debido a las ausencias de gran parte de los procedimientos que en la guía se plantean como necesarios para dicha objetividad. Las conclusiones que el análisis forense integrado a través de las acciones identificadas merece, se dejan planteadas así como las debidas recomendaciones al caso.



Capítulo 2: Estado del conocimiento

*La ciencia más útil es aquella cuyo
fruto es el más comunicable
Leonardo Da Vinci*



2. Estado del conocimiento

2.1 La ingeniería y la hidrología forenses

2.1.1 La ingeniería forense

La palabra "forense" proviene del latín *forensis* que significa "relativo al foro" y se refiere a algo "de, perteneciente a, o usado en un tribunal de justicia" (Moliner, 2007). Actualmente, el vocablo casi siempre se refiere a un método de obtención de pruebas para efectos de utilizarlas en la comprobación de cómo sucedió un hecho. Por otro lado, la ingeniería es parte de las ciencias técnicas que unen el conocimiento científico general y abstracto con el tecnológico, como actividad humana, y está presente en el diseño, construcción y prueba, mantenimiento y conservación de estructuras, maquinas fijas y móviles, instalaciones y sistemas (García, 2003). La ingeniería forense es considerada como parte de las ciencias forenses y por lo tanto, también está involucrada en el estudio de los aspectos fácticos. Sólo por mencionar algunas de las ciencias forenses, se presenta una lista a continuación(www.tech-faq.com/forensic-science y www.tudiscovery.com/crimen/ciencia_forense):

- Contabilidad forense es la adquisición, interpretación y estudio de la contabilidad y las pruebas.
- Economía forense es el estudio e interpretación de pruebas relacionadas con el daño económico, que incluye la determinación de la pérdida de beneficios y ganancias, valor del negocio, pérdida de valor del servicio del hogar, el trabajo de reemplazo y gastos médicos futuros, etc.
- Biología forense incluye la identificación del ADN y el análisis sexológico (búsqueda de anticuerpos específicos producidos por el sistema inmunológico) de fluidos corporales (fisiológicos) con el fin de la individualización e identificación específica.
- Entomología forense ayuda a determinar la hora y el lugar de la muerte, mediante el examen de cómo los insectos se refieren a los restos humanos, y muchas veces puede determinar si el cuerpo bajo examen fue trasladado después de la muerte.
- Odontología forense es el estudio de los dientes y de las singularidades de la dentición.
- Psicología y psiquiatría forenses es el estudio, evaluación e identificación de las enfermedades relacionadas con el comportamiento humano con el fin de obtener las pruebas jurídicas.
- Geología forense es la aplicación consistente en la localización de evidencias encontradas en los suelos, los minerales y petróleo crudo.
- Meteorología forense es un análisis de las condiciones climáticas, propias del lugar que se esté examinando.

Cualquier investigación de tipo forense tiene la finalidad predeterminada de establecer cómo ocurrió un hecho, y eventualmente qué hacer para evitar su repetición.



La ingeniería forense tiene como objetivos, el esclarecimiento de los hechos y su naturaleza así como la identificación de los protagonistas en conjunto con su relación hacia la producción del daño; la valoración de éste y el daño futuro; y la identificación de acciones correctivas para prevenir o amortiguar el daño futuro probable, en pocas palabras, la reconstrucción, estudio e interpretación de un fallo. Los procesos en la ingeniería como actividad humana, generan conocimiento de vital importancia en el análisis de la producción de daños y riesgos, y es de donde surge la importancia de la aplicación de la ingeniería al ámbito forense (García, 2003).

Así pues, como propósito general de la ingeniería forense, puede decirse que es localizar las causas de “falla” en cualquier sistema, con el objeto de mejorar o asistir el funcionamiento. Las pérdidas o “fallas” comunes que los ingenieros forenses determinan incluyen, entre muchas otras, tormentas y lo relacionado con daños a estructuras, intrusión de agua o humedad, causantes de fenómenos, accidentes, fuego o explosiones, etc. La frecuencia de la necesidad para este tipo de investigaciones puede estar influenciada por una combinación de condiciones climáticas, de la población y la localidad, por ejemplo las zonas costeras con potencial de huracanes.

2.1.2 La hidrología forense

Los términos “forense” e “hidrología” parecen no ir bien juntos, ya que la sola palabra forense puede hacer que la imaginación se dirija hacia investigaciones de crímenes, autopsias, médicos, etc., sin embargo el término fue aplicado a subdisciplinas en las geociencias por primera vez durante el final de los 70’s, donde las preocupaciones acerca de la contaminación del suelo y las fuentes de agua venían a la vanguardia, mientras que por los 90’s las preocupaciones evolucionaron al impacto de las actividades humanas en el ambiente. Hoy en día, las investigaciones de naturaleza forense incluyen a la hidrología forense (Hurst, 2007).

La hidrología forense es parte de las disciplinas ambientales, y aunque su nombre nos circunscribiría a la definición del componente agua, ésta no tiene por qué estar necesariamente limitada a los temas de contaminación, sino que también puede estar referida a temas como inundaciones, drenaje, escurrimiento, recursos hídricos, bombeo, puentes o cualquier estructura hidráulica. Hay ocasiones en que la hidrología forense sirve para evitar males mayores, mientras que en otras sirve para racionalizar el uso del recurso, su reparto y uso. En forma más particular, es el tema de la inundación lo que compete a esta investigación.



2.2 El concepto de inundación

Se acepta que una *inundación* es un evento natural y recurrente, potencialmente destructivo, que se produce mayormente como consecuencia de la aportación inusual y relativamente repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona que comúnmente está libre de ésta. Bien puede ser el resultado de lluvias intensas o continuas, con lo que se tienen desbordamientos, subida de las mareas por encima del nivel habitual o por deslizamientos de tierra, tsunamis y huracanes (BOE, 1995; Devoli y Álvarez, 2001). De igual forma una inundación puede ser un fenómeno causado por influencia antropogénica, como lo es el caso de las inundaciones inducidas en terrenos agrícolas.

Una primera clasificación de acuerdo con SNET (2008) se refiere a:

- Inundaciones pluviales. Ocurren cuando el agua de lluvia satura la capacidad del terreno y no puede ser drenada, acumulándose por horas o días sobre el terreno, lo que puede suceder igual en el campo que en las ciudades.
- Inundaciones fluviales. Se generan cuando el agua se desborda de los ríos y queda en los terrenos cercanos a ellos, la fuerza del agua es capaz de arrastrar todo lo que encuentre en su paso.
- Las inundaciones costeras o marea de tormenta. Se desarrolla durante ciclones que pueden afectar zonas costeras, sobreelevando el nivel del mar hasta que éste penetra tierra adentro, cubriendo en ocasiones grandes extensiones de terreno.
- Inundaciones por la ruptura de bordos, diques o presas. Provocan una salida repentina de agua, provocando efectos catastróficos e inundaciones en amplias extensiones de terreno. Esto también ocurre cuando las lluvias excesivas rebasan la capacidad de contención de las presas.
- Inundaciones por la incorrecta operación de una presa, que desfoga más de lo debido y provoca el desbordamiento de un río.
- En las ciudades, las inundaciones por lo general se deben a deficiencias del drenaje, pero sobre todo a la acumulación de basura que tapa las coladeras.



De la anterior clasificación se pueden identificar que solo tres de ellas son procesos naturales. Por ejemplo, las inundaciones fluviales se han producido periódicamente y han sido la causa de la formación de las llanuras en los valles de los ríos, tierras fértiles donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura, mientras que en las zonas costeras, los embates del mar han servido para modelar las costas y crear zonas pantanosas como lagunas que tras su ocupación humana, se convierten en zonas vulnerables.

Cuando se habla de inundaciones es importante darse cuenta que éstas pueden ser debidas a diferentes causas, además se debe tener en cuenta que pueden existir inundaciones de diversos tipos en mismas regiones. En este sentido, es importante hacer la siguiente clasificación, para poder analizar el sitio en conflicto:

- Frecuencia (Kingma *et al.*, 2008):
 - Evento único: inundación presentada debido a un evento en particular.
 - Evento múltiple: inundación presentada debido a una sucesión de eventos particulares.
 - Inundaciones periódicas: inundaciones presentadas en forma cíclica o estacional.

- Duración (Domínguez, 2000):
 - Repentina: son ocasionadas por lluvias intensas en cuencas de respuesta rápida que provocan los denominados *flash floods*, los cuales casi siempre se acompañan de una gran cantidad de lodo. Ocurren con frecuencia en la periferia de las grandes concentraciones urbanas, donde el mismo desarrollo favorece los asentamientos humanos (en la mayoría irregulares) en barrancas deforestadas e incluso en la zona federal de los cauces.

 - De larga duración: se presentan en muchas partes del territorio mexicano, generalmente en zonas bajas, en áreas muy extensas, y son originadas por el volumen acumulado de precipitación pluvial durante varios días o semanas. Por la lentitud con que se producen no suelen causar pérdidas de vidas humanas, aunque ocasionan importantes pérdidas económicas, tanto en las zonas urbanas como en zonas rurales.



- Localización (Kingma *et al.*, 2008; Devoli y Álvarez, 2001; Medina y Méndez, 2006):
 - Ribereñas: son el resultado de lluvias copiosas usualmente continuas para un periodo de días sobre un área. El caudal generado por estas lluvias supera la capacidad de conducción de los ríos hasta provocar el desbordamiento.

Subclasificación de acuerdo con el régimen del cauce.

- Lenta o de tipo aluvial: este tipo de inundación se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento gradual de los caudales de los ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento con lo que se produce el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecidas producidas de esta forma son inicialmente lentas y tienen una gran duración. Los incrementos de los niveles son del orden de los centímetros, el tiempo de concentración y de viaje es cuestión de días.
- Súbita o de tipo torrencial: se produce típicamente en ríos de montaña o cauces y es originada por lluvias intensas. El área de la cuenca que aporta al cauce es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Los niveles se incrementan por el rango de los metros y el tiempo de concentración y viaje es de horas. Estas inundaciones causan muchos daños.
- Encharcamiento: es un fenómeno causado por la saturación del suelo, caracterizado por la presencia de láminas delgadas de agua sobre la superficie del suelo en pequeñas extensiones y por lo general, presente en zonas moderadamente onduladas a planas. El fenómeno puede durar pocas horas hasta unos pocos días. El nivel crítico o nivel de inundación corresponde al nivel de un río o un cauce al que comienzan los desbordamientos que pueden causar inundaciones aguas abajo o aguas arriba del punto de referencia. En general, las zonas afectadas corresponde a la planicie de inundación de la zona baja de las cuencas.



- Estuarinas: es el resultado de la combinación de la elevación del nivel de la marea, causando fuertes vientos y la inundación ribereña causada por precipitaciones tierra adentro.
- Costera: puede ser causada por huracanes y otras tormentas severas o por tsunamis. Más ampliamente, es un fenómeno aleatorio fruto de la combinación de diferentes procesos de la dinámica marina. En un instante determinado, un punto del litoral está caracterizado por un nivel de marea compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje rompe, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de la costa.

Finalmente, dentro de los conceptos relevantes en cuanto a inundaciones se refiere, restan:

Llanura de inundación: es el área aledaña al cauce del río que es periódicamente cubierta por agua, también es el área ocupada por el río durante los periodos de máximo nivel, generalmente cubierta por depósitos aluviales (arenas). Los depósitos arcillosos y/o limosos son el resultado de inundaciones periódicas (BOE, 1995).

Extensión de la inundación: la extensión de una inundación y la profundidad de la capa de agua están controladas por la magnitud de los gastos y la configuración de la topografía local (BOE, 1995).

2.3 Factores comunes relacionados con inundaciones

Se puede pensar que las inundaciones son generalmente causadas por fenómenos hidrometeorológicos, sin embargo, en ocasiones son inducidas con fines técnicos y de beneficio económico-social o bien, para evitar daños superiores. Por ejemplo, las presas pueden ser operadas con extracciones controladas cuando han llegado a los niveles extraordinarios, con objetivos de seguridad. En cuanto a los beneficios económicos y sociales, se puede inundar un área no productiva para disminuir los daños en los centros de desarrollo urbano, industrial y agropecuario.

Así mismo, en vista de la evolución que históricamente han tenido las cuencas, además de verse influenciadas principalmente por la acción antropogénica, actualmente se puede hablar del incremento de las inundaciones y con ello de las pérdidas que éstas causan, desde bienes materiales hasta vidas humanas. El cambio en el uso de suelo es un condicionante para la respuesta de una cuenca hacia el escurrimiento, y dentro de ese ámbito los factores responsables son la urbanización,



deforestación, trabajos sobre la red de drenaje (canalizaciones), solo por mencionar algunos. De igual forma, los hundimientos de terrenos por la extracción de hidrocarburos, agua y minerales. El incremento de las poblaciones en áreas marginales con altos niveles de amenaza (urbanización informal) también contribuye a ello. Y como última mención, los trabajos de ingeniería que tratan de recuperar áreas inundables o modifican la geometría de las llanuras de inundación y hasta el curso de un cauce, con lo que ofrecen en ocasiones una sensación de seguridad.

Los principales factores relacionados con los eventos de inundación son los siguientes (Aldana, 2006):

2.3.1 Fisiográficos

- Naturales
 - Tamaño de la cuenca
 - Morfologías de un cauce o geometría del fondo marino
 - Naturaleza de la línea costera
 - Obstrucción de cauces por deslizamiento de laderas, hielo y avalanchas
 - Arrastres y objetos flotantes
 - Maremotos o tsunamis

- Artificiales
 - Obstrucción de cauces por infraestructura:
 - Efectos de presas y embalses (normales o permanentes), en la modificación de hidrogramas
 - Accidentes o mal manejo de la infraestructura, como roturas parciales de estructuras de una presa o maniobras erróneas, así como insuficiencia de las obras construidas
 - Puentes o alcantarillas mal diseñadas

 - Desvío de cauces
 - Urbanización y deforestación
 - Arrastre de objetos y materiales
 - Malas prácticas en las técnicas de drenaje urbano



2.3.2 Hidroclimáticos

- Avenidas:
 - Excesiva precipitación, ya sea alta intensidad o duración; distribución espacio-temporal de la precipitación
 - Deshielo
 - Dirección y potencial del viento

- Temporales ciclónicos:
 - Ciclones en el Caribe, Océano Atlántico y Pacífico
 - Tifones en Japón, Filipinas, Indonesia, etc.
 - Ciclones extra-tropicales o de media latitud

- Acciones del mar:
 - Estática: marea alta
 - Dinámica: intrusiones por oleaje o sobreelevación del nivel del mar
 - Marea de tormenta

2.3.3 Socio - políticos

- Urbanización en sitios inundables
- Invasión de cauces
- Desconocimiento del tipo de cauces en una zona y del comportamiento del mismo
- Ideologías y costumbres sociales

Dartmouth Flood Observatory ha compilado una serie de registros desde 1985 de inundaciones y sus causas, en todo el mundo, con lo que integra y sintetiza los factores anteriormente enlistados. La Figura 2.1 muestra que de acuerdo con los registros, las lluvias intensas son la mayor causa de inundación de larga duración, mientras que la segunda causa es por lluvias torrenciales breves que generan los *flash floods*. Las inundaciones por ciclones o monzones también son importantes y finalmente se han registrado aproximadamente 52 inundaciones por rotura o desfogue de una presa.

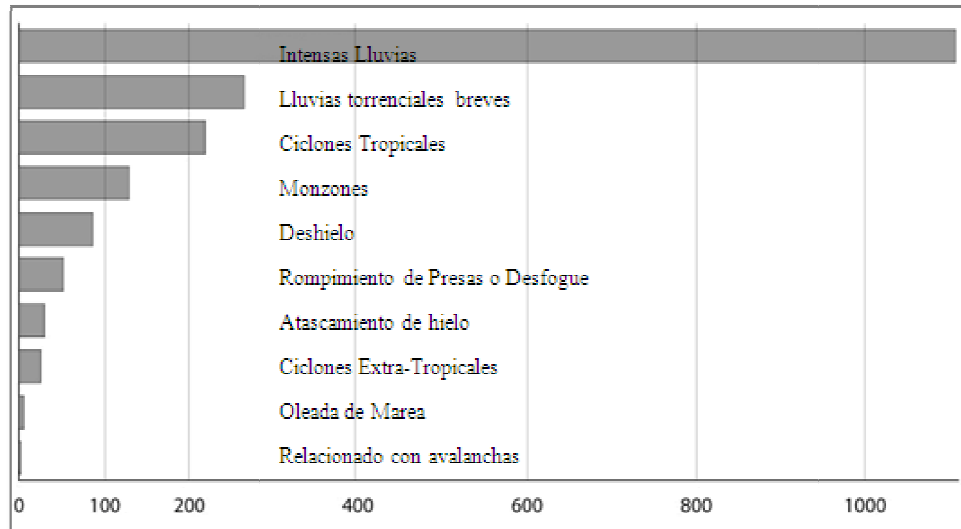


Figura 2.1 Principales causas de inundación.

Adaptada de © 2004 Dartmouth Flood Observatory, www.dartmouth.edu/~floods

2.4 Daños por inundación

Si se habla de daños, es conveniente también conocer algunos conceptos para el análisis de riesgos antes de entrar en materia (Aldana, 2006):

Peligrosidad es la probabilidad de ocurrencia de las condiciones para que se produzca una afectación (daño a vidas humanas o bienes), dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área dada; es función del volumen y del tiempo de permanencia, entre otros factores.

Vulnerabilidad es una medida de qué tan susceptible es un bien expuesto a ser afectado por un fenómeno perturbador. También se refiere a las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Implica una combinación de factores que determinan el grado hasta el cual la vida y la subsistencia de alguien quedan en riesgo por un evento distinto e identificable de la naturaleza o de la sociedad.

Riesgo es el daño potencial que puede surgir por un proceso presente o suceso futuro. En ocasiones se le utiliza como sinónimo de probabilidad, pero en el asesoramiento profesional de riesgo, éste combina la probabilidad de que ocurra un evento negativo con cuánto daño dicho evento causaría. Es decir, el riesgo es la posibilidad de que un peligro pueda llegar a materializarse. También es la probabilidad de que un resultado esperado ocurra.

En forma resumida se tiene que:

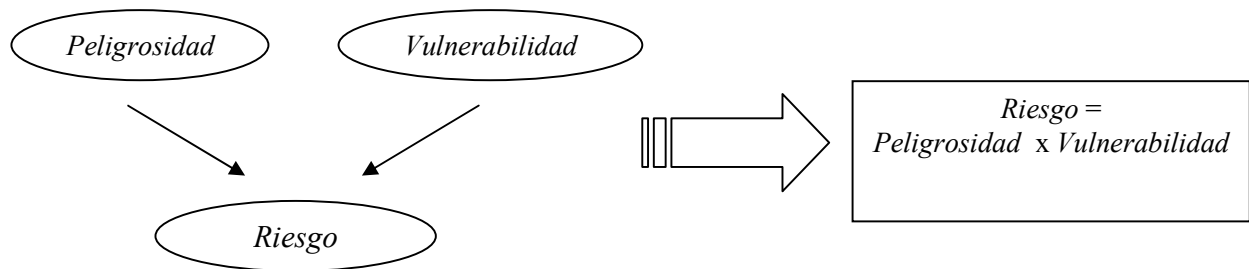


Figura 2.2 Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad.

Así pues, las inundaciones se convierten en un problema sólo cuando se ven involucrados los asentamientos humanos o zonas de actividad productiva (ganadería, agricultura, entre otras), porque es entonces cuando quedan expuestas las vidas humanas y propiedades. Para hacer medibles los daños por inundación se debe tomar en cuenta el tamaño de la inundación, el cual es usualmente medido en términos del gasto máximo, el volumen de escurrimiento, tiempo de arribo de la onda de avenida, las velocidades alcanzadas, duración de la lluvia y área afectada de acuerdo con un tirante alcanzado, así como la naturaleza y condición del terreno en el que llueve.

Derivado de lo anterior, visto desde la perspectiva de la seguridad pública en las zonas urbanas, donde los factores más importantes son la elevación máxima de agua, relativa a la elevación de las aceras y la velocidad del flujo (Eagleson, 1992), no se puede perder de vista que, lo que en un lugar es una inundación, en otro puede ser un flujo bien controlado, por lo que la diferencia estará en los factores a evaluar antes mencionados.

Los daños se pueden clasificar como (Aldana, 2006; Bitran, 2001):

- Daños económicamente intangibles:
 - Damnificados
 - Heridos
 - Pérdidas humanas

- Pérdidas de bienes y servicios:
 - Daños directos son los causados por un desastre en los acervos de capital (construcciones, maquinaria, equipos, entre otros), y en general en el patrimonio de las personas, empresas o instituciones incluyendo la existencia de los bienes terminados en proceso y de materias primas. Se agregan a este tipo de daño las



cosechas agrícolas que al ocurrir el desastre estaban a punto de ser levantadas. Este tipo de daños se manifiestan en el momento del desastre o inmediatamente después de concluido éste.

- Daños indirectos se refieren básicamente a los flujos de bienes y servicios que se dejan de producir durante el periodo en que se lleva a cabo la reconstrucción de la infraestructura física. Se incluyen también los mayores gastos para la sociedad motivados por el desastre y que tienen por objeto proveer en forma provisoria los servicios hasta que se restituya la capacidad operativa original de los acervos destruidos. También se incluye en esta clasificación el costo que significó la atención de la emergencia. Este tipo de daños se prolongan durante un cierto periodo más allá del evento.

2.4.1 Daños por inundación en zonas urbanas

Las actividades ciudadanas como el tránsito peatonal y vehicular son primordiales para la dinámica de una ciudad. Las calles tienen como objetivo principal, por una parte, la circulación de personas en aceras y, por la otra, el tránsito de vehículos en el arroyo o calzada.

No existen muchos trabajos referentes a criterios de seguridad en cuanto a inundaciones se refiere en zona urbana a nivel mundial; para el caso de México, no se conoce algo similar. A continuación se mencionan algunos de los trabajos ya realizados (Nanía y Gómez, 2006).

- Criterios basados en un calado o altura de banqueteta máxima admisible: un calado máximo admisible en una calle es aquel que no produce el ingreso del agua pluvial en edificios públicos y privados.
 - Criterio de Denver: el Manual de Criterios de Drenaje de Denver, Colorado, Estados Unidos, establece que en las calles se permite un calado tal que la cota de la lámina de agua no produzca la inundación de la planta baja de edificios residenciales, públicos, comerciales e industriales, y como máximo se aceptan 45 cm sobre el nivel mínimo de la calle.
 - Criterio del Condado de Clark: el Manual de Criterios Hidrológicos y de Diseño del Drenaje del Condado de Clark, Nevada, Estados Unidos, establece que para las calles locales con anchos menores a 24 m se permite considerar un calado máximo sobre la parte más baja de la calle, normalmente junto al bordillo, de 30 cm, para evaluar la capacidad de transporte de la misma. Por otro lado en zonas con riesgo de



inundación, se establece que el nivel de piso terminado en las viviendas debe ser, como mínimo, 45 cm sobre el nivel de la parte alta del bordillo.

- Criterios basados en la consideración conjunta de los calados y las velocidades. Muchas veces no es suficiente con definir sólo un calado máximo para saber si un determinado flujo es peligroso, sino que es necesario saber algo con respecto a la velocidad o la combinación entre calado y velocidad.
 - Criterio de Témex: se utiliza para definir una zona de inundación peligrosa, aquella donde existe riesgo serio de pérdida de vidas humanas o daños personales graves, con las condiciones siguientes, calado mayor a 1 m, velocidad mayor a 1 m/s y producto de calado por velocidad mayor a 0.5 m²/s.
 - Criterio del Condado de Clark: en el Manual de Criterios Hidrológicos y de Diseño del Drenaje del Condado de Clark, Nevada, Estados Unidos, se exige que en las calles con anchos menores a 24 m, el producto del calado en la parte más baja de la calle, junto al bordillo, por la velocidad no supere el valor de 0.55 m²/s.

En complemento con los criterios anteriores y de acuerdo con Aldana (2006), existe una forma para la diferenciación y evaluación de daños, se debe considerar:

- Las variables representativas:
 - Altura del agua
 - Velocidad
 - Permanencia de la inundación
 - Aportación sólida

Con lo anterior se establecen criterios para determinar las condiciones en que existe peligro tanto para las vidas humanas como para los bienes materiales.

- Peligro para vidas humanas: altura > 1 m y velocidad > 0.7 m/s
- Peligro para edificios y estructuras: altura > 3.6 m y velocidad > 6 m/s

2.4.2 Daños por inundación en zonas rurales

Las inundaciones afectan también las áreas rurales, que aunque menos pobladas, tienen sembradíos, haciendas y viviendas, en donde se pueden generar graves consecuencias para los pobladores y para la economía regional.

Las mayores pérdidas que se pueden presentar en estas áreas, están relacionadas con la ganadería y agricultura, por lo que aquí se hace mención de las principales afectaciones que dichas actividades pueden tener a causa de una inundación.

Según lo comparte la Organización Semillas Rural (www.reddehuertas.com.ar) en Argentina, la inundación o en su caso anegamiento (cuando los macroporos están saturados de agua) causa ausencia de oxígeno en el suelo ocasionando, en la mayoría de las plantas, una asfixia celular, perdiendo funcionalidad en sus raíces y provocando decaimiento de las plantas. La falta de oxígeno ocasionado por el exceso hídrico hace que aumente la actividad de microorganismos ocasionando:

- Que los microorganismos anaeróbicos causen pérdida de nitrógeno por desnitrificación. El nitrógeno es esencial en el proceso de fotosíntesis y su carencia torna a la planta amarilla o si es muy grave, rojiza.
- Los microorganismos pueden producir procesos de reducción biológica del hierro. La deficiencia de hierro produce que las hojas jóvenes de la planta se pongan amarillas.
- Algún grupo de bacterias anaerobias se ven favorecidas por las condiciones de exceso hídrico con lo que reducen el sulfato, lo cual provoca que las raíces se pudran o evitan que la absorción de algunos compuestos.



Figura 2.3 Cultivo inundado.



El exceso hídrico es un problema muy importante, que sin embargo ha sido poco estudiado, y aunque es difícil establecer niveles de agua críticos, por la variabilidad de cultivos que existen y la cantidad de agua que estos necesitan, los expertos agricultores sugieren que se tendrán daños en cosechas por inundación cuando se excedan tres días de inundación, o bien cuando la humedad permanente del suelo pasa del 25 % del peso de la tierra (Ruiz, 2003).

Así mismo, la actividad ganadera no está exenta de sufrir daños a causa de las inundaciones. En general la crítica situación climática y alimentaria que se genera por el desastre, repercute en la respuesta inmune de los animales. Se pueden afectar los aspectos hormonales, ser vulnerables a enfermedades como la neumonía, diarrea, heridas y abortos y hasta verse en situaciones de peligro cuando se encuentran atrapados en lugares rodeados de agua y sin comida. Es difícil hablar de niveles de inundación que afecten a los animales en las ganaderías, ya que es muy variable, dependiendo básicamente de la edad del animal, estado sanitario, raza, disponibilidad de alimentos, etc. Ni aun las aseguradoras cuentan con una cobertura para este tipo de desastres en la actividad ganadera, tomando solo en cuenta cuestiones físicas del animal, como los son las enfermedades. Aun así, aquí se presentan algunos ejemplos de los animales más comunes en granjas, que se ven afectados con los niveles de agua también consignados:

- Gallina 20 cm
- Chivo 50 cm
- Puerco 50 cm
- Borrego 50 cm
- Burro 1 m
- Vaca 1 m
- Caballo 1.2 m

El hecho de llevar a cabo una evaluación de los daños ocasionados por un desastre como el que aquí se está tratando, permite disponer de una sustentación idónea, para así desarrollar programas futuros orientados a la reducción de desastres.

2.5 El Concepto de análisis forense de inundaciones

Antes de definir el concepto de análisis forense de inundaciones es conveniente mencionar que además de la ingeniería e hidrología forenses, existe una rama de ésta última, llamada *hidrología forense de inundaciones*, la cual soporta las investigaciones en caso de inundaciones con el objetivo de determinar su causa probable y las fuentes humanas que han contribuido a los daños por inundación (Loáiciga, 2001).



El *análisis forense de inundaciones* es entonces, la aplicación de una metodología después de sucedido el desastre, que consta de la reconstrucción del evento para determinar cómo sucedió, qué factores contribuyeron, qué falló, cuáles fueron los protagonistas que tuvieron relación con el daño. Después de esto, el análisis incluye la realización de una valoración o estudio del evento teniendo claros los puntos expuestos anteriormente. El objetivo final del análisis es sugerir lo necesario para la asistencia o mejora del sistema y así evitar en lo posible este tipo de desastres en un futuro.

El análisis de inundaciones debe integrar principios meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos, sociales y políticos con la ayuda de herramientas tecnológicas para la modelación y simulación para con ello distinguir las causas probables de los daños por inundación en una cuenca y con ello documentar los factores clave implicados en dichos daños.

2.5.1 Casos de estudio con el enfoque forense

Como se ha mencionado, la ingeniería forense es una técnica relativamente nueva, poco difundida, y sin estándares aceptados, los casos de aplicación de igual forma, son pocos. La mayoría de los sitios donde se ha utilizado esta técnica son de los EE.UU. A continuación se presentan dos casos de estudio que tomaron el concepto de la aplicación de la técnica de ingeniería forense.

Análisis forense de inundaciones del Río San Luis Obispo, en San Luis Obispo, California, el 10 de marzo de 1995 (Loáiciga, 2001).



Figura 2.4 Ciudad de San Luis Obispo, Ca.

Tomada de es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Sanluisobispo.jpg



Este caso de estudio, dentro del campo de la hidrología forense, fue publicado en el año 2001. El estudio presenta una de las primeras aproximaciones para integrar este tipo de análisis, y con base en eso, documentar las causas probables de los daños causados por la inundación.

La zona de estudio es la cuenca del Río San Luis Obispo, tiene una precipitación media anual de 614 mm y un clima mediterráneo suave con veranos cálidos y secos entre los meses de junio y septiembre, e inviernos húmedos y fríos entre los meses de diciembre a marzo. El área de drenaje aguas arriba de la confluencia entre el Río San Luis Obispo y sus tributarios es de 183.9 km². No se cuentan con registros históricos de gastos, por lo que para el análisis se hizo uso de ecuaciones regionalizadas para estimar los gastos pico.

Los daños por inundación debidos al evento analizado afectaron todos los terrenos con diferentes usos de suelo en la parte baja del Río San Luis Obispo, la cual tiene un cauce principal relativamente pequeño respecto a la extensión de la planicie de inundación.

Un estudio previo realizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos demostró que el evento con un periodo de retorno estimado mayor a 10 años, excedió las condiciones del cauce lleno provocando la inundación. En vista de la limitada capacidad hidráulica del canal principal, muchos autores advirtieron acerca de la necesidad de planear el desarrollo en la planicie de inundación.

La hipótesis que se planteó fue que el daño por inundación fue ocasionado no por una lluvia extraordinaria, sino por inducción antropogénica, o sea, por el manejo inadecuado de las prácticas dentro de la planicie de inundación, que toman lugar desde la gran inundación del año 1969 de este mismo lugar. De acuerdo con esta hipótesis, la planicie fue cambiada entre 1969 y 1995, así que las propiedades tanto existentes como nuevas se hicieron más vulnerables a las inundaciones.

Se siguió una metodología, específica y particular, para analizar la hipótesis propuesta, que consta de los siguientes análisis individuales:

- De los eventos de precipitación de los días 9 y 10 de marzo de 1995
- De los efectos de maremoto
- Del rol del arroyo See Canyon
- De los impactos humanos inducidos en la zona
- Del relleno de la planicie de inundación
- Del gasto a la salida del bordo
- De la construcción del puente Ontario



- De la vegetación y acumulación de escombros en la planicie de inundación
- De las prácticas agrícolas que incrementan la rugosidad de la planicie de inundación

La metodología anterior se complementó con un análisis hidráulico de la inundación:

- Análisis de los niveles de inundación y gastos del día 10 de marzo de 1995.
- Análisis de los factores que contribuyeron al aumento en los niveles.

Con todo lo anterior se concluyó que desde los años 60's, grandes modificaciones en la parte baja del Río San Luis Obispo cambiaron la rugosidad hidráulica del canal principal y de las márgenes, con lo que el almacenamiento en el cauce se vio reducido y la resistencia al flujo incrementada. Los cambios en la planicie de inundación entre finales de los años 60's y el invierno de 1995 consisten en:

- Relleno de la planicie de inundación en la zona adyacente al Río San Luis Obispo.
- Construcción del puente Ontario.
- Construcción de un bordo de 0.7 Km. de largo y el cercado adyacente y a lo largo de la margen izquierda del Río San Luis Obispo.
- Aumento incontrolado de la vegetación (principalmente por especies no nativas) en el canal principal y en las márgenes.
- Prácticas agrícolas, principalmente en forma de árboles de manzana, los cuales incrementaron la rugosidad hidráulica de la planicie de inundación.
- Desarrollo de un parque en la planicie de inundación.

Finalmente, el estudio realizado sobre el Río San Luis Obispo demostró que la inundación y los daños que ésta generó el 10 de marzo de 1995 fueron una combinación de varios factores y no de sólo uno de ellos: las lluvias intensas, que según el análisis no excedieron de un periodo de retorno de 10 años, además de que las condiciones de humedad antecedente de la cuenca no fueron significativamente diferentes en el invierno de 1995 de los años previos, ni siquiera al del año 1969 en el que también se presentó una inundación considerable; de las modificaciones de la planicie de inundación, como lo fue la construcción del puente Ontario, el bordo y cercado a lo largo de la margen izquierda y prácticas agrícolas conjuntamente con la vegetación incontrolada; llevando a la conclusión de que dichos cambios en la planicie de inundación aumentaron el riesgo de inundación, y son una causa probable detrás de los severos daños por inundación en la parte baja del Río San Luis Obispo en el invierno de 1995.

La inundación en Nueva Orleans a causa del Huracán Katrina.



Figura 2.5 Nueva Orleans después del paso del huracán Katrina.

Tomada de pparis.wordpress.com/2008/04/22/kuracan-katrina

Un caso más reciente y muy mencionado, fue la inundación del año 2005 causada por el Huracán Katrina en Nueva Orleans, y donde la aplicación de las investigaciones forenses no se hizo esperar. Las más recientes, publicadas en el año 2008 (Seed *et al.*, 2008).

Nueva Orleans es la ciudad más grande del estado de Louisiana, en los Estados Unidos y es también el principal puerto del río Mississippi. A finales de agosto de 2005, el huracán Katrina, de categoría 5, hizo impacto en las costas de Louisiana, arrasando la parte Este de la ciudad. Los fuertes vientos dañaron la infraestructura de la ciudad y produjeron una devastadora inundación. Una gran sección de los diques que separan a la ciudad del lago Pontchartrain cedió ante el embate de los vientos y, como consecuencia, se produjo un colosal vertido de aguas del lago en la ciudad. Cuando el huracán Katrina en el año 2005 alcanzó la categoría de intensidad 5, algunos expertos predijeron que el sistema de diques podría fallar completamente si la tormenta se mantenía con esa fuerza y pasaba muy cerca de la ciudad. A pesar que Katrina se debilitó y pasó a ser un huracán de categoría 4 antes de tocar tierra el 29 de agosto de 2005, los diques sufrieron roturas múltiples y al día siguiente



fueron rebasados en algunos lugares, inundando la totalidad de la ciudad de Nueva Orleans. Katrina perteneció a la temporada de huracanes en el Atlántico de 2005 y fue la tercera tormenta más poderosa de la temporada y el sexto huracán más fuerte desde que hay registros.

El 2 de septiembre de 2005 el 85% de la ciudad de Nueva Orleans estaba bajo el agua, con tirantes que alcanzaron 7 m en algunas zonas. Durante un tiempo, la ciudad estuvo inhabitable. Todos los servicios públicos estaban suspendidos y no era posible utilizar la infraestructura física debido a la gran cantidad de agua. Además se generó una crisis de orden público debido al violento saqueo generalizado que se presentaba por la falta de alimentos y servicios públicos (www.wikipedia.com/Nueva_Orleans y www.wikipedia.com/Huracán_Katrina).

Dentro del IV Foro Mundial del Agua, en marzo de 2006, Steven Stockton, director suplente de Trabajos Civiles del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, hizo comentarios pidiendo recurrir a la “ingeniería forense” para analizar las fallas en el sistema, la priorización y la futura planificación, de los daños severos en la ciudad de Nueva Orleans. También destacó el rol crítico de los sistemas de protección, la gestión integral de los recursos hídricos, la participación ciudadana y una mejor comunicación, y resaltó actividades que incluyen un blindaje de los diques y la restauración de los humedales costeros.

Algunos de los estudios de ingeniería forense aplicada en Nueva Orleans después del Huracán Katrina, estuvieron bajo la conducción del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. La investigación forense se centró en los diques y bordos, perforando en la tierra para examinar el suelo y revisar el diseño de las estructuras. Con la ayuda de modelos computacionales y evidencia visual, se pudo comprobar que los niveles de inundación simplemente empujaron la estructura completa del dique fuera de su forma, permitiendo que el agua fluyera del Lago Ponchartrain hacia Nueva Orleans. Así es como se concluyó que el diseño defectuoso, construcción inadecuada, o alguna combinación de ambos, son las probables causas de las brechas en los bordos a lo largo de calle 17 y la avenida London (www.gadr.giees.uncc.edu/hzevents/forensickatrinaeq.ppt).

Por supuesto, vale la pena mencionar que este es un ejemplo de ingeniería forense, sin embargo, no es como tal, un análisis forense de la inundación desde un punto vista hidrológico, ya que la mayoría de las investigaciones forenses que se realizaron, estuvieron ligadas a las estructuras, más que a un carácter hidrológico, esto se debe a que la causa de la inundación siempre fue relacionada principalmente con la falla de los diques y bordos que protegían a Nueva Orleans de las inundaciones.



La ingeniería forense en la actualidad es ampliamente usada en temas como investigación de incendios, averías de maquinas, patología de edificaciones, reconstrucción de accidentes de tráfico, entre otros, sin embargo, son pocos los casos encontrados que hayan aplicado la hidrología forense y más aun particularizándola en el análisis forense de inundaciones, por tanto, tampoco hay una metodología establecida para llevar a cabo este tipo de análisis, ni aun en los lugares del mundo más azotados por este tipo de eventos.



Capítulo 3: Propuesta de guía metodológica para el análisis forense de inundaciones

Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento, madre de toda certidumbre
Leonardo Da Vinci



3. Propuesta de guía metodológica para el análisis forense de inundaciones

3.1 Recopilación de información

En este apartado se consigna la relación de información que debe recabarse tanto en forma documental como en las etapas previas a cualquier evento inundante, y en las fases posteriores al desastre. Sin embargo, en el caso en que el evaluador forense tenga la oportunidad de participar con el equipo encargado de la atención directa durante la emergencia, podría adquirir información adicional de gran valor por ser constituir una fuente de primera mano. Ello será aplicable solo en algunos rubros aquí enlistados. En estos casos, las actividades factibles de realizar serán mencionadas específicamente.

3.1.1 Acerca de la zona afectada

Para iniciar con la recopilación de la información documental para análisis forense de una inundación es deseable obtener de la zona afectada la siguiente información:

- Datos geográficos como:
 - Posición geográfica. Se prefiere manejar en coordenadas UTM, puesto que éstas son de manejo más universal, además su comprensión es mejor por tener como unidad básica el metro.
- Aspectos humanos:
 - Población. Se deben incluir datos sobre tamaño, habitantes por km², nivel de educación, indicadores de salud.
 - Actividades económicas. Se debe hacer referencia a las actividades que básicamente sostienen la economía de la zona, como por ejemplo la agricultura, ganadería, industria, y comercio.
 - Servicio básicos. Indicando la existencia y disponibilidad de agua potable, alcantarillado, drenajes pluviales, sanitarios o combinados, electricidad, etc.
 - Comunicaciones y transportes. Características actuales de la red vial, los niveles de seguridad en ella y conflictos de circulación.



- Mapas temáticos: esta información se puede tener como datos tipo “raster” que pueden ser visualizados con algún visor de imágenes o bien, “vectores” para ser visualizados en algún software especializado como lo son los de la familia CAD, MapInfo, Arc GIS, etc. Se recomienda utilizar vectores ya que son más fáciles de manipular y ocupan menos espacio en memoria. En México, la disponibilidad de información está a cargo principalmente del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Los mapas son de gran importancia antes y durante el análisis. Son modelos a escala de una porción de la superficie de la Tierra y por lo tanto muestran detalles referentes a tamaño, forma y relaciones espaciales en un área determinada. Se requiere de los siguientes mapas:

- Político. Servirá como herramienta para analizar la división política, así como programas y acciones correspondientes a cada nivel de gobierno.
- Topográfico. Las curvas de nivel permitirán reflejar la forma de la superficie de la Tierra, además de que la utilización de los colores en los diversos niveles con otros símbolos, permitirán reconocer montañas, valles, ríos y otras características del terreno. Como información extra se tendrá también datos sobre construcciones urbanas.
- Hidrográfico. Proporcionará información sobre los cuerpos de agua, como los cursos de ríos, arroyos y líneas de la costa, lo cual resulta primordial en este tipo de análisis, pues el agua es el principal componente.
- Geológico y geomorfológico. Estas representaciones de los diferentes tipos de materiales geológicos y formas según su génesis que afloran en la superficie permitirán tener una idea de las características geológicas del territorio que representa, lo cual condiciona muchas propiedades que se relacionan con el uso que el hombre puede hacer de ellas.
- Uso de suelo y vegetación. Mostrará básicamente la clasificación del uso del suelo. Se puede distinguir la superficie forestal o de cultivos, municipal, de parques naturales, etc. El uso de suelo tiene una implicación directa en el escurrimiento del lugar.
- De riesgos y vulnerabilidad. En caso de ya haberse realizado este tipo de mapas para la zona en conflicto, éste nos permitirá conocer los lugares u obras de infraestructura que pudieran dañarse si se presentara un desastre, así como



identificar si se cuenta puntos de referencia útiles ante el desastre, como lo son, Cruz Roja, Centros de Salud, Policía, etc.

- Imágenes de satélite y fotografías aéreas de antes, durante y después del evento de inundación, si así fuera posible, para completar la información proporcionada por los mapas temáticos. En el caso en que el evaluador forense tenga acceso a las autoridades encargadas de atender la zona en desastre, se recomienda que éste gestione la toma de imágenes satelitales con mayor periodicidad a la habitual y de zonas específicas de interés, relacionadas con el evento.
- Levantamientos topográficos realizados con antelación, de la planicie así como de los cauces (batimetría).
- Levantamiento de imágenes de la zona en desastre. Este levantamiento debe incluir fotografías y video tomados por terceros durante el evento, además de las que podrían ser adquiridas en visitas posteriores al evento como referencia. Es de especial interés en el caso de estar presente durante el evento, adquirir imágenes que pudieran aportar a criterio del evaluador información provechosa para el análisis. Estas imágenes deben incluir, entre otros:
 - A nivel de cuenca:
 - Zonas de alta erosión y deslizamientos de tierra
 - Regiones de daño a la vegetación
 - A nivel de cauce:
 - Cambios en el alineamiento y divagación
 - Tramos desbordados
 - Estructuras de cruce y obstrucción
 - Secciones críticas
 - Velocidades del flujo
 - Transporte de sólidos
 - Erosión
 - Azolve



- A nivel urbano:
 - Nivel del agua en construcciones
 - Evidencias del ímpetu del flujo
 - Daños a la infraestructura de servicio
 - Zonas de daño en construcciones civiles
 - Ubicación y orientación de objetos arrastrados
 - Puntos de aportación de agua servida
- Mapas base de reconocimiento de la zona inundada y de las cuencas aportadoras, básicamente aplicado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Si se cuenta con este SIG en el momento de ocurrencia del evento, se podrá ingresar la información que se vaya recopilando en campo y con ello ir actualizando en tiempo real registros específicos que hagan de éste una herramienta dinámica altamente útil para los análisis posteriores. Si no se cuenta con él en el momento de la recopilación, podrá ser generado con toda la información recopilada a través del uso de software especializado.

Los siguientes son un ejemplo de paquetes de software de adquisición con costo que pueden ser útiles en este tipo de procesos:

- ArcGIS. Es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como ArcGIS Server, para la publicación y gestión web, o ArcGIS Móvil para la captura y gestión de información en campo. ArcGIS Desktop, la familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene, ArcGlobe y ArcPad, además de diversas extensiones. ArcGIS Desktop se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades y costo: ArcView, ArcEditor y ArcInfo.
- Map Info. Es un producto de *Location Intelligence*, el cual incluye el acceso directo a datos de fuentes como ESRI SDE, GeoDatabase, y los formatos de CAD más recientes, permiten utilizarlo con otras aplicaciones sin la necesidad de traducir datos. Adicionalmente, se incluyen capacidades de análisis de datos asociados con tiempos o eventos, funcionalidades que mejoran la productividad al optimizar tareas



rutinarias, y funcionalidad para apoyar la creación de mapas más atractivos y más fáciles de entender.

- TNT mips. En esencia, este software ofrece una mezcla de métodos visuales para transmitir información y resolver problemas. Utiliza objetos raster, vector, CAD, TIN, y bases de datos relacionales. Este paquete posee una gran variedad de funciones centradas en proporcionar el poder de crear, importar, exportar, editar, visualizar, georeferenciar, estudiar, modelar, simular, analizar, y manipular información visual junto con bases de datos adjuntos. TNTmips incluye TNTedit, y TNTview; además incluye poderosas herramientas de procesos para todos los objetos espaciales (raster, vector, CAD, TIN, y bases de datos), así como modelamientos de superficies, funciones de conversión de objetos raster a vector, vector a raster, interpretación de fotos, clasificación de imágenes, mosaico y fusión de imágenes, captura de aerovideos, creación de modelos digitales de elevación y orto-imágenes, HyperIndex para la creación de atlas (para su uso con TNTatlas y/o TNTserver), y TNTsim 3B Builder para la creación de paisajes 3D (para su uso con TNTsim 3D en plataformas Windows), entre otros.
- ILWIS. Éstas son siglas que significan “Sistema de Información Integral de Tierra y Agua”. Es un SIG con capacidad para hacer procesamiento digital de imágenes. Ha sido desarrollado por el Instituto Internacional de Estudios Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC) de Enschede, Holanda (Países Bajos). Permite entrar, manipular, analizar y presentar datos geográficos. A partir de estos datos se puede generar información espacial, modelos espaciales y evaluar diferentes procesos de la superficie de la tierra.

O bien, software gratuito:

- Thuban GIS. Es un visor interactivo de datos geográficos con los siguientes elementos: soporte de datos vectoriales en shapefile, postGIS Layer y OGR; soporte de datos raster como Geo TIFF Layer y GDAL; mapa de navegación; objetos de identificación y anotación; editor de leyenda y clasificación; proyección de apoyo; impresión y exportación de vectores; multisoporte de lenguajes como inglés, francés, alemán, húngaro, italiano, ruso, checo y español.



- OpenEV. Aplicación que permite, por un lado, visualizar y analizar datos de tramas y vectores geospaciales. Y por otro, puede utilizarse como una librería para programadores, con la que crear nuevas aplicaciones gráficas. Bastante sencilla de manejar, utiliza GDAL, está disponible en inglés.
- Jump. Es una aplicación SIG modular de código libre que permite la consulta y la creación/modificación de datos geográficos vectoriales almacenados bajo distintos formatos incluidos como GML, DXF o ESRI shapefile. El programa permite también la explotación de servicios WMS. Este Sistema de Información Geográfica está programado en Java y es multiplataforma. Su arquitectura modular facilita la creación de numerosos plugins que añaden funcionalidades específicas tales como: comprobación de topología; generación de modelos digitales de elevaciones; lectura de formatos raster, métodos de interpolación (kriging, triangulación de Delaunay, polígonos de Voronoi); tracing; creación de metadatos; entre otros.

Uno de los objetivos principales de esta recopilación es el de obtener una cartografía de calidad y precisión adecuadas para que sirva de soporte a los análisis posteriores. Así pues, toda la información ya enlistada permitirá caracterizar la zona y así tener una visión general de lo que se pretende analizar.

3.1.2 Climatología y meteorología. Pronósticos y registros

La observación, interpretación y análisis de datos meteorológicos suficientes es de primordial importancia para este tipo de estudios. La siguiente recopilación de información es referente al clima, cuyos datos se registran en diferentes tipos de estaciones meteorológicas (estación meteorológica de agujas, estación meteorológica con termohigrómetros y estación meteorológica digital, o bien, mejor conocidas las dos primeras como convencionales y las segundas como automáticas). Además de lo anterior, existen también observatorios meteorológicos, los cuales generan información meteorológica y climatológica del país, tanto para el servicio de Instituciones Nacionales Gubernamentales y Privadas, como a Organismos Internacionales. Los observatorios trabajan las 24 horas del día los 365 días del año ininterrumpidamente y en ellos se realizan mediciones de los elementos del tiempo atmosférico de la siguiente forma:

- Cada tres horas, a tiempo real y por acuerdos internacionales, para ser transmitidas por diversos medios de comunicación al Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM), para su posterior retransmisión al Centro Meteorológico Mundial de Washington (CMMW) para su difusión mundial, así como a todos los usuarios nacionales.



- Mensualmente con los registros horarios, se realiza un reporte de acuerdo con la normatividad de la OMM, el cual es transmitido al CNTM a más tardar a los cuatro días siguientes de concluido el mes, para su retransmisión al CMMW para ser difundida mundialmente.

Las estaciones y observatorios tienen la posibilidad de medir las siguientes variables con un registro como se muestra en la tabla 3.1.

Cuando sea posible se debe acudir al servicio meteorológico nacional del país, o a las instituciones que manejen este tipo de información, para conocer qué tipos de datos meteorológicos se tienen a disposición y de qué tipo de estaciones meteorológicas provienen.

Estación	Automática	Convencional	Observatorio
Temperatura del Aire, °C	Cada hora o menos	Diaria	Cada 3 horas
Humedad Relativa, %	Cada hora o menos	Diaria	Cada 3 horas
Velocidad del Viento, m/s	Cada hora o menos	-----	Cada 3 horas
Dirección del Viento, grados	Cada hora o menos	-----	Cada 3 horas
Presión Barométrica, mb	Cada hora o menos	-----	Cada 3 horas
Precipitación, mm	Cada hora o menos	Diaria	Cada 3 horas
Radiación Solar, W/m ²	Cada hora o menos	-----	Cada 3 horas
Evaporación, mm	Cada hora o menos	Diaria	Cada 3 horas

Tabla 3.1 Variables hidrometeorológicas medidas por cada tipo de estación.

Aunado a todo lo anterior, se tiene la posibilidad de acceder a la información que proporcionan los radares meteorológicos (RADAR que viene de las siglas en inglés **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging). La medición que se tiene con éstos es equivalente al empleo de cientos de pluviómetros distribuidos a lo largo de la zona de cobertura del radar. Los registros del seguimiento de fenómenos atmosféricos constituidos por agua en forma de lluvia, granizo y nieve principalmente, son transmitidos en tiempo real, además permite conocer la velocidad y dirección del viento gracias al sistema Doppler.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2008), México cuenta con 5,880 estaciones climatológicas convencionales pertenecientes a la misma comisión, de las cuales 3,348 están actualmente en operación. Adicionalmente, la Conagua, a través del Servicio Meteorológico Nacional, opera 79 observatorios y 146 estaciones meteorológicas automáticas. En cuanto a los radares meteorológicos, de acuerdo con el SMN, existe la Red Nacional de Radares Meteorológicos que está formada por 12 radares, todos provistos con el sistema Doppler. Las fuentes de información disponibles son Clicom que es la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC), el Sistema del Información



Climatológica (SIC), la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Conagua y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), además se cuenta con una red de 80 observatorios meteorológicos administrados por la Unidad del Servicio Meteorológico Nacional (USMN).

En la medida que los conocimientos científicos y los recursos tecnológicos lo hagan posible, los datos meteorológicos proporcionarán información del evento en cuanto a su:

- Génesis
- Localización
- Extensión
- Magnitud
- Duración e intensidad

La información requerida incluye:

- Sobre las estaciones meteorológicas:
 - Cantidad de estaciones disponibles y cercanas a la zona de desastre (el área representativa de las estaciones automáticas es de 5 Km. de radio aproximadamente en terreno plano, excepto en terreno montañoso, según lo estipula la Organización Mundial de Meteorología, (OMM)).
 - Ubicación geográfica
 - Tipo de información registrada
 - Periodos de registro.
- Sobre la información meteorológica:
 - Pronósticos meteorológicos generales antes del evento y asociados directamente con éste. Deben proporcionar información sobre los fenómenos significativos, de nubosidad y lluvias, de temperaturas y vientos. Generalmente el formato de publicación es diario.
 - Información meteorológica sinóptica antes y durante el evento. Éstos deben contener imágenes de fenómenos significativos con frecuencia de publicación diaria, aunque el análisis presentado puede ser de 12 hasta más de 96 horas de pronóstico el cual nos mostrará el avance y evolución del fenómeno, así como áreas de vigilancia por desarrollo de dichos fenómenos.
 - Boletines de marea y oleaje antes y durante el evento. Éstos informan sobre las condiciones de temperatura de la superficie del mar y pronósticos de oleaje,



normalmente de forma diaria. Así mismo, niveles del mar a través de mareógrafos, los cuales forman parte de las redes meteorológicas y oceanográficas.

- Número de eventos menores antecedentes, su duración e intensidad.
- Condiciones precedentes y durante el evento de inundación. Esta información es de primordial importancia, aunque para poder realizar los análisis en forma adecuada, se debe recopilar la serie de tiempo histórica disponible de precipitación.

Esta recopilación será de ayuda para aclarar si el fenómeno presentado se encontró dentro del comportamiento normal o fue un evento extraordinario que tuviera influencia directa en el problema de inundación.

3.1.3 Hidrometría

La hidrometría se refiere a la recopilación de todos los datos de caudales que circulan por la sección de un río o canal, llamada punto de control. Dependiendo de la ubicación del punto de control, los registros que se pueden tener son:

- De caudales en ríos
- De salidas de presas
- Caudales captados y entregados a sistema de riego o abastecimiento
- Niveles

Para la obtención de estos registros y al igual que en la climatología y meteorología, se tienen dos tipos de estaciones hidrométricas, las estaciones convencionales y las automáticas, que miden y registran como se muestra en seguida:

Estación	Automática	Convencional
Niveles, m	Cada 15 minutos	Diaria
Gastos, m ³ /s	Cada 15 minutos	Diaria

Tabla 3.2 Variables que miden las estaciones hidrométricas.

Una vez más, como en la climatología, es necesario obtener la información precedente al evento, durante la ocurrencia de éste y los registros de las series de tiempo históricas disponibles.

En México, la Conagua cuenta con una base de datos histórica de 2,014 estaciones con información de niveles, así como mediciones mediante aforos directos. De éstas, sólo 499 se encuentran en operación actualmente (Conagua, 2008). Los registros se encuentran disponibles en los sistemas de información siguientes tales como el Banco de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) y la propia



GASIR de la Conagua. Además existen otras redes operadas por la CFE y algunos Gobiernos Estatales.

Si fuera posible que el evaluador se integre a los recorridos realizados por las autoridades en la zona de desastre tanto aéreos, como marítimos y terrestres, es deseable que se documente en forma cuantitativa lo siguiente:

- Niveles del agua a lo largo de tramos críticos y en la vecindad de estructuras que estén dentro del cauce o en sus márgenes.
- Velocidad del flujo
- Transporte de sedimentos
- Gastos

3.1.4 Obras hidráulicas existentes en el sitio o la cuenca. Características y manejo

Se hará una recopilación de todas las obras hidráulicas presentes en la zona de desastre y en las cuencas de aportación. Todas estas obras intervienen en la dinámica hidráulica de la zona de estudio, de acuerdo con el propósito para el cual fueron construidas. En el caso en que sea posible adquirir información en el momento preciso en que el evento se suscita, el evaluador deberá registrar particularmente y en forma detallada las políticas de operación seguidas y cualquier indicio sobre el posible daño estructural. En cuanto a los registros de caudales tanto de entrada como de salida es pertinente verificar que la medición se esté realizando con la forma y frecuencia adecuadas. En caso contrario, deberá procurarse la generación de dichos registros.

- Embalses y presas
 - Datos de diseño:
 - Fecha de construcción
 - Ubicación geográfica
 - Uso del embalse
 - Longitud de la corona de la cortina y bordo libre
 - Geometría del vertedor
 - Periodo de retorno
 - Gastos
 - Curva Elevaciones – Capacidades de diseño y actualizadas
 - Batimetría del vaso



- Obra de desvío (para obras en proceso de construcción). Perfil de la plantilla del canal, curva Elevaciones – Gastos del canal
- Obra de toma. Carga mínima sobre la obra de toma

- Políticas de operación de la obra de excedencias y obra de toma
 - De diseño
 - Reales (las que rigen actualmente, así como antes y durante el fenómeno de inundación)

- Información del flujo:
 - Hidrogramas de entrada (estimados o medidos), antes y durante el fenómeno de inundación
 - Hidrogramas de salida, antes y durante el fenómeno de inundación, así como máximo gasto de salida registrado históricamente
 - Niveles de azolve
 - Extracciones, antes y durante el fenómeno de inundación

- Condiciones estructurales actuales de la obra
- Estado de conservación
- Información general sobre incidentes previamente presentados
- Edad y vida útil de la estructura

- Estaciones de bombeo
 - Datos de diseño
 - Fecha de construcción
 - Ubicación geográfica
 - Características generales del edificio
 - Diseño en planta de la estación y accesorios
 - Características de la tubería de succión y distribución de flujo de entrada
 - Tipo de bombas
 - Número de unidades
 - Capacidad de las unidades
 - Curvas características y modificadas de las bombas



- Políticas de operación de la obra
 - De diseño
 - Reales
- Información del flujo:
 - Caudal de bombeo, antes y durante el fenómeno de inundación
- Condiciones actuales de la obra
- Estado de conservación
- Información general sobre incidentes previamente presentados
- Canales y drenes
 - Determinar si el canal es natural, artificial, corregido o protegido solamente.
 - Ubicación geográfica
 - Características geométricas
 - Topografía del canal
 - Curva Elevaciones – Capacidades de diseño y actualizadas
 - Datos de diseño de obras en el canal, así como políticas de operación. Las obras pueden ser:
 - Tomas de derivación
 - Compuertas
 - Controles de nivel
 - Dispositivos de medición de caudal
 - Dispositivos de seguridad
 - Cruces (alcantarillas o puentes)
 - Información del flujo:
 - Escurrimientos, antes y durante el fenómeno de inundación
 - Extracciones, antes y durante el fenómeno de inundación
 - Niveles de azolve



- Condiciones actuales del canal
- Estado de conservación
- Información general sobre incidentes previamente presentados

- Sistemas de abastecimiento de agua potable
 - Datos de diseño
 - Fecha de construcción
 - Ubicación geográfica
 - Fuente de abastecimiento
 - Topología y características geométricas

 - Condiciones actuales del sistema
 - Estado de conservación
 - Información general sobre incidentes previamente presentados

- Sistemas de drenaje sanitario y pluvial
 - Datos de diseño
 - Fecha de construcción
 - Ubicación geográfica
 - Tipo de drenaje. Pluvial, sanitario o combinado
 - Topología y características geométricas
 - Gastos de diseño
 - Lugar y características de la descarga
 - Vida útil del sistema

 - Información del flujo:
 - Escurrimientos, antes y durante el fenómeno de inundación

 - Condiciones actuales del sistema
 - Estado de conservación
 - Información general sobre incidentes previamente presentados



Resulta importante enfatizar que la lista anterior es la información óptima requerida para continuar con el análisis forense de la inundación en el que se esté trabajando, sin embargo, la realidad sugiere que recopilar tal cantidad de información no siempre será posible aunque si útil para los procesos aquí planteados, de tal manera que, en la mayoría de los casos, se deberá proceder aunque no esté completa esta información.

3.1.5 Infraestructura de protección

Las obras creadas para la protección de una zona en riesgo por inundaciones son importantes para la completa simulación del sistema que se encuentra en desastre, esto, en cuanto a la parte técnica. De igual forma que para el apartado anterior correspondiente a la infraestructura hidráulica, en el caso de estar presente en el sitio durante la contingencia, es importante registrar las políticas de operación seguidas y los indicios sobre el posible daño estructural, así como los registros de caudales tanto de entrada como de salida.

Entre las obras consideradas en este rubro, se encuentran:

- Bordos y muros marginales o perimetrales
- Cortinas o presas de control de avenidas
- Estructuras de control o derivación
- Rectificación, corte de meandros y drenes
- Lagunas de regulación naturales o construidas
- Estructuras de protección costera como:
 - Diques
 - Espaldones
 - Rompeolas
 - Barreras para marea de tormentas

Es necesario obtener la siguiente información:

- Fecha de construcción
- Ubicación geográfica



- Datos de diseño
 - Periodo de retorno
 - Gastos de proyecto
 - Capacidades
 - Curvas características
 - Políticas de operación

- Condiciones actuales de la obra
- Estado de conservación
- Información general sobre incidentes previamente presentados

3.1.6 Daños causados

Los desastres naturales causan un número importante de víctimas fatales y cuantiosas pérdidas materiales, por lo que es adecuado tener una visión general de los daños causados en la zona afectada y así crear un contexto amplio sobre la repercusión del desastre en particular que se analiza en la economía y en la sociedad así como su impacto en la economía nacional, esto sin el afán de realizar una evaluación completa de los daños, en el sentido de no aplicar costo a las pérdidas, a menos que estos costos se apliquen mediante el respaldo de laguna institución financiera.

Es deseable conocer los niveles y permanencia de la inundación si así fuese posible, para referir la clase de daños que se tuvieron según se tratara de zonas urbanas o rurales, así como en forma más específica la cuantificación de lo siguiente:

- Daños directos en:
 - Viviendas
 - Centros educativos
 - Infraestructura de Salud
 - Locales públicos
 - Vías de comunicación
 - Infraestructura
 - Agricultura
 - Ganadería
 - Acuicultura



- Daños indirectos en:
 - Flujo de bienes
 - Servicios por interrupción, como los de energía, agua potable y alcantarillado, industria, comercios, entre otros
 - Sistemas de comunicación pública
 - Pérdidas de horas hombre

- Económicamente intangibles:
 - Damnificados
 - Heridos
 - Pérdidas humanas

3.1.7 Manejo de la emergencia

Los desastres de origen natural y antrópico son tratados como un tema de asistencia humanitaria, orientando la acción hacia los preparativos para la atención de las emergencias y la reconstrucción postdesastre.

Las acciones ante un riesgo latente y ante la emergencia como tal son importantes para evitar daños mayores a los inevitables, es por ello que se debe conocer qué tipo de acciones fueron tomadas con base en lo anterior y así conjuntarlo con la información técnica, para poder encontrar el factor de fallo en todo el sistema que comprende la zona afectada.

Es necesaria la información relativa a las siguientes acciones:

- De previsión y alerta
 - Programas para el conocimiento de la población sobre las consecuencias de las inundaciones
 - Programas de prevención y mitigación de riesgos
 - Apoyo del gobierno federal en temas de protección y control de inundaciones
 - Simulacros y rutas de evacuación en inmuebles así como vías de comunicación para el acceso alternativo a la zona en caso de desastre
 - Monitoreo constante para la correcta identificación de zonas de riesgo
 - Sistemas de alerta temprana en diversas partes de la cuenca



- Planes de emergencia que indiquen acciones antes, durante y después de una contingencia
- De atención a la población durante la emergencia
 - Cuerpos de emergencia capacitados
 - Planes de desalojo de poblaciones
 - Asistencia social, como refugios o albergues
 - Ayuda en especie y víveres

3.1.8 Testimonios personales

Los testimonios de la población y de la gente involucrada en el desastre ya sea en forma directa o indirecta resultan ser muy importantes, pues ello proporcionará información que difícilmente se encontrará en reportes técnicos, además dirá realmente como se vivió internamente dicho desastre. Se debe realizar la recolección de la siguiente información:

- Entrevistas realizadas a:
 - Afectados directos
 - Observadores
 - Autoridades

3.1.9 Registros históricos

- Historial sobre los eventos de inundación y destrucción que han azotado a la zona de estudio.
- Memorias en medios de comunicación como radio, TV, diarios, etc.

3.1.10 Otros factores de influencia en la inundación

Existen factores que aunque no sean determinantes en la inundación pueden influir en ella en cierto grado. Aquí se pretende conocer que tan correctamente se ha manejado la zona en forma integral para evitar riesgos en ella, en aspectos íntimamente ligados al plan de desarrollo.

- Niveles de tala y deforestación en la zona de desastre, así como otros cambios en el uso de suelo en las cuencas de aportación. Esto puede ser analizado con mapas históricos de vegetación y uso de suelo, para así ver la evolución de la zona.
- Niveles de marginación



- Venta de terrenos de bajo valor pero con alto riesgo, así como invasión de llanuras de inundación. Planes de ordenamiento territorial
- Cumplimiento de los planes de desarrollo
- Sistemas de recolección de basura y cultura de los desechos

La fase de recopilación será complementada con investigaciones de campo posteriores al evento, para actualizar la información que así lo requiera. Como resultado del análisis de la información existente y completada por las investigaciones en campo, se elabora la propuesta final de los sitios críticos a estudiar con detalle en la zona en desastre. Se debe saber que la recopilación de información no es una actividad sencilla puesto que tener acceso a todo tipo de información sugerida aquí se ve obstruido por la dispersión de dicha información en diversas instituciones y dependencias.

3.2 Análisis con un enfoque hidrometeorológico

3.2.1 Génesis de las tormentas

Una tormenta es un conjunto de lluvias de características bien definidas que obedecen a una misma perturbación meteorológica. Ésta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aun días, así mismo, puede abarcar desde pequeñas zonas hasta vastas regiones. La escala temporal y espacial del estudio de una tormenta está dividida en dos escalas: mesoescala y escala sinóptica (www.meteorologia.mil.ve).

- Mesoescala: son los sistemas con una escala horizontal del orden de varios cientos de metros a kilómetros y con duración de unas cuantas horas, tales como las tormentas convectivas, las circulaciones de brisas, los vientos de montaña y valles.
 - Tormentas convectivas: Los requisitos para la formación del *cumulonimbus* que desemboca en tormenta son la presencia de aire húmedo en un espesor considerable de la atmosfera; un gradiente vertical de temperatura superior al adiabático saturante (oscila entre 0.5 y 1°C cada cien metros), hasta grandes alturas y finalmente un fuerte mecanismo de elevación para forzar al aire hacia arriba, a niveles altos (www.ideam.gov.com).

Las nubes convectivas, debido a sus corrientes ascendentes y descendentes, pueden ocupar una gran porción en la tropósfera llegando incluso a perforar la tropopausa y agruparse en grandes sistemas convectivos de mesoescala que pueden dar lugar a tiempo severo en superficie y fuertes lluvias (www.meteored.com/ram).



- Frentes: Los frentes se forman cuando se encuentran dos masas de aire de distinta temperatura. Debido a que el aire caliente es más ligero que el frío, el primero asciende sobre la capa fría. Los frentes son llamados según la masa de aire que se mueva más rápido. De esta forma, si una masa de aire caliente se mueve rápido hacia el aire frío, el espacio comprendido entre las dos masas de aire se conoce como frente cálido. Los cambios meteorológicos son rápidos si pasa un frente frío, y son más lentos si se trata de un frente cálido (Schlanger, 2003).
- Escala sinóptica (viene del griego y significa “vistos juntos”): también llamada escala grande o ciclónica, son los sistemas que tienen diámetros de varios cientos de kilómetros y una duración de varios días o semanas, tales como los ciclones de latitudes medias. De acuerdo con Holland (1993), los términos “Huracán” y “Tifón” son regionalmente nombres específicos para un “Ciclón Tropical” fuerte. Un ciclón tropical es el término genérico para una escala sinóptica no frontal de sistema de baja presión sobre aguas tropicales o subtropicales, con convección organizada, como la actividad de una tormenta eléctrica.

Los ciclones tropicales con máximos vientos sostenidos de menos de 17 m/s son llamados depresiones tropicales. Cuando el ciclón tropical alcanza rachas de viento de por lo menos 17 m/s es típicamente llamado tormenta tropical. Si las rachas de viento son de 33 m/s, entonces son llamados:

- Huracán, en el Océano Atlántico Norte y el Noreste del Océano Pacífico.
- Tifón, en el Noroeste del Océano Pacífico.
- Ciclón tropical severo, en el Suroeste del Océano Pacífico o Sureste del Océano Índico.
- Tormenta ciclónica severa, en el Norte del Océano Índico.
- Ciclón tropical, en el Suroeste del Océano Índico.

De acuerdo con Jiménez *et al.* (2007), la escala Saffir-Simpson define y clasifica la categoría de un huracán en función de la velocidad de los vientos del mismo. La categoría 1 es la menos intensa (vientos de 119 a 153 km/h); la categoría 5 es la más intensa (vientos mayores que 250 km/h). La categoría de un huracán no está relacionada necesariamente con los daños que ocasiona. Los huracanes categorías 1 ó 2 pueden causar efectos severos dependiendo de los fenómenos atmosféricos que interactúen con ellos, el tipo de región afectada y la velocidad de desplazamiento del huracán. Los huracanes de categoría 3,4, ó 5 son considerados como severos.



La fuerza de los vientos huracanados puede extenderse hacia afuera de su centro alrededor de 40 kilómetros, si es un huracán pequeño y más de 240 kilómetros si es grande, alcanzando en ciertas ocasiones, hasta 500 kilómetros. El huracán puede cambiar rápidamente de forma, tamaño, intensidad, velocidad de traslación y dirección de desplazamiento. La velocidad y la trayectoria de un huracán dependen de complejas interacciones entre la atmósfera y el mar. Típicamente un huracán se desplaza a una velocidad de 24 a 32 kilómetros por hora aunque a veces permanecen estacionarios un intervalo de tiempo. Como regla general el lado derecho del huracán (relativo a la dirección de su desplazamiento) es la parte más peligrosa del mismo, debido a que a su velocidad se le suma la velocidad de la corriente de viento en el cual éste se está desplazando. El incremento de la velocidad del viento en el lado derecho del sistema aumenta la marea de tormenta en aquellas áreas costeras de poca pendiente (<http://www.snet.gob.sv>).

Así pues, la información ya analizada que proporciona la información sinóptica solicitada así como los boletines y pronósticos, debe ser suficiente para establecer la génesis del fenómeno ocurrido de igual forma que dejar claro si fue un solo fenómeno o una combinación con otros.

3.2.2 Análisis del comportamiento general de los registros históricos y los correspondientes al evento

3.2.2.1 Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas

Se hará uso de cualquier software de los ya mencionados en el apartado 3.1.1, o algún otro para ubicar geográficamente las estaciones hidrometeorológicas disponibles y con ello determinar cuáles son de influencia en el área de estudio. Se recomienda la generación de un SIG, donde se aplique toda la información geográfica ya recopilada y en él vaciar la información geográfica de las estaciones hidrometeorológicas, para de esta forma manejar en forma integral toda la cartografía de la zona.

3.2.2.2 Estado y calidad de los registros hidrometeorológicos

Es muy común que los registros de estaciones estén incompletos, ya sea debido a una ausencia en el operador, fallas en los aparatos o hasta cambios físicos en la propia estación o en el ambiente, por lo que desafortunadamente se tendrán uno o varios datos faltantes en el total de ellos.

Como primer cálculo se puede determinar la altura de precipitación media que cae en la cuenca afectada y en las cuencas de aportación para diferentes duraciones, ya sea desde la duración del evento que causó la inundación hasta mensuales y anuales. Para esto se utilizan generalmente tres métodos, mencionados por orden decreciente de exactitud:



- Método de las Isoyetas. El método consiste en trazar líneas que unan puntos de igual altura de precipitación (isoyetas), con base en la información registrada en las estaciones. La precipitación promedio para el área se calcula ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas (por lo general tomando el promedio de dos valores de las isoyetas) por el área de las isoyetas, totalizando estos productos y dividiendo por el área total (Linsley *et al.*, 1990 y Aparicio, 2005). Las isoyetas pueden tener en cuenta la fisiografía de las cuencas.
- Polígonos de Thiessen. Este método supone una variación lineal de la precipitación entre las estaciones y asigna un segmento de área a la estación más cercana, sin embargo sí trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos. Las estaciones se colocan en un mapa y se trazan líneas que las conecten unas con otras. Las mediatrices, o perpendiculares bisectrices de estas líneas, formarán polígonos alrededor de cada estación. Los lados de cada polígono son los límites del área efectiva que se considera para cada estación. Se determina el área de cada polígono y se expresa como un porcentaje del área total. El promedio ponderado de lluvias para el área total se calcula multiplicando la precipitación en cada estación por su porcentaje de áreas asignado y sumando estos valores parciales (Linsley *et al.*, 1990), para ampliar el conocimiento de este método se puede consultar a Aparicio (2005).
- Método Aritmético. Este método consiste en obtener simplemente el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación, mediante la siguiente expresión:

$$\bar{hp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hp_i$$

Donde, \bar{hp} es la altura de precipitación media, hp_i es la altura de precipitación registrada en la estación i y n es el número de estaciones bajo análisis (Aparicio, 2005).

Para la construcción del escenario medio histórico es posible realizar la estimación de los datos faltantes de estaciones hidrometeorológicas. Los procedimientos que se recomiendan son:

- Por regresión, mediante la curva de mejor ajuste de los registros, donde se correlacionan los registros en una estación cercana o el promedio de los registros en varias estaciones circundantes con la información registrada en la estación que se está estudiando. Sí la correlación es aceptable es suficiente con conocer el registro de la estación más cercana o bien el valor medio en las estaciones circundantes consideradas. Se recomienda revisar a McCuen (1998) para ampliar el conocimiento de este procedimiento.



- Por promedio aritmético, en donde se hace uso del valor medio anual de cada una de las estaciones circundantes para verificar que difiera en menos del 10% del registrado en la estación bajo estudio, con lo que los datos faltantes pueden estimarse como un promedio aritmético a partir de las estaciones circundantes (Aparicio, 2005).
- Por el método del inverso de la distancia al cuadrado, cuya importancia radica en la fácil aplicación en un SIG. El método divide la cuenca en celdas, considerando que la precipitación de una celda sin medición, es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa elevada al cuadrado:

$$hp_x = \frac{\sum_{i=1}^n (hp_i w_i)}{W} \quad w_i = \frac{1}{d_i^2} \quad W = \sum w_i$$

Donde hp_x es el registro de lluvia faltante en la estación de estudio y hp_i es el registro de lluvia en la estación circundante (McCuen, 1998).

- Por promedio ponderado, esto con el registro anual y cuando las diferencias son mayores al 10%, para lo que se usa la siguiente ecuación (Aparicio, 2005):

$$hp_x = \frac{1}{n} \left[\frac{p_x}{p_1} hp_1 + \frac{p_x}{p_2} hp_2 + \dots + \frac{p_x}{p_n} hp_n \right]$$

Donde hp_x es el registro de lluvia faltante de la estación en estudio, hp_i es el registro en la estación auxiliar, p_i valor medio anual de la estación i , p_x es el valor medio anual de la estación bajo estudio y n es el número de estaciones auxiliares, siempre y cuando este sea mayor a tres (Aparicio, 2005).

En caso en el que no hubiera registros disponibles de precipitación, existen métodos para transponer tormentas de un sitio a otro, en donde se trata de establecer las cantidades máximas que se producen en diferentes áreas y para diferentes duraciones con base en una red de estaciones que registran simultáneamente la precipitación durante una tormenta dada (Aparicio, 2005). Sin embargo usar estos procedimientos no es lo ideal, porque los análisis subsecuentes estarían basados en información inferida para la propia cuenca y por lo tanto, el análisis general resultaría poco confiable. Así pues en el caso de que falte información de precipitación todavía queda la opción de utilizar solo los registros hidrométricos aunque se debe enfatizar que es más común que una cuenca cuente con registros pluviométricos más aun que con registros hidrométricos.



3.2.2.3 Distribución espacio-temporal de precipitación

La distribución espacial se estudia mediante los denominados mapas de isocontenidos, que están formados por isolíneas de igual valor. Estos mapas se pueden dibujar manualmente mediante la interpolación de los datos, sin embargo existen programas que facilitan dicha labor, aunque algunas veces requieren un refinamiento con criterios personales. Los mapas permiten visualizar la distribución de las variables y obtener información sobre su evolución espacial.

La distribución temporal se representa a través de gráficos de evolución temporal, los cuales representan la variación de cualquier variable con el tiempo en un punto determinado. Esta información permite manifestar tendencias y detectar variaciones estacionales.

La cantidad de precipitación en una región hidrológica es uno de los factores climáticos que mayor variabilidad registra año con año. Esta variabilidad no está sólo referida al tiempo sino también al espacio, lo que significa que la lluvia depende de las condiciones locales (Gutiérrez *et al.*, 2005).

Para la representación de la lluvia mensual dentro de la cuenca afectada y de las cuencas aportadoras, se puede realizar una distribución porcentual de la lluvia mensual tomando en cuenta la totalidad de las estaciones y de los registros, que proporcionará información sobre los meses donde se concentra mayormente la precipitación. Así mismo se pueden generar gráficos para la representación de la precipitación acumulada mensual para cada una de las estaciones, con la finalidad de hacer evaluaciones parciales en cada una de ellas, todo lo anterior como análisis antecedente y marco de referencia.

De igual forma se pueden construir curvas masa media para determinar esta variación en el tiempo de la precipitación media en la cuenca, la cual se construye aplicando el método aritmético o de los polígonos de Thiessen a las alturas de precipitación acumuladas a cada estación para diferentes tiempo (Aparicio, 2005).

Para reconstruir el campo de lluvias que ocurrió antes y durante el fenómeno de inundación, se deben realizar mapas de isoyetas para visualizar la distribución espacial de la tormenta con duraciones diarias, así como duraciones desde 5 minutos hasta más de 96 horas, y así identificar el foco y la evolución de las tormentas, según sea necesario.

3.2.2.4 Análisis de tendencia de las series de tiempo

De acuerdo con Escalante y Reyes (2005), las series de tiempo son un conjunto de observaciones $\{x_t\}$ realizadas en forma secuencial, normalmente a intervalos iguales, y presentan características estadísticas que muestran su tendencia en el comportamiento. Las series de tiempo pueden ser anuales o periódicas y dentro de estas últimas, estacionales, mensuales, semanales, diarias u horarias. Las series de tiempo pueden ser univariadas o multivariadas, dependiendo si se trata de una o varias variables, respectivamente.

Las series univariadas anuales $x_t, t=1,2,3,\dots,n$ años de registro se describen mediante sus características estadísticas:

- Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t$$

- Varianza sesgada

$$S_{sesg}^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2$$

- Varianza insesgada

$$S_{insesg}^2 = \frac{n}{n-1} S_{sesg}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2$$

- Coeficiente de asimetría sesgado

$$g_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^3}{(S_{sesg}^2)^{3/2}}$$

- Coeficiente de asimetría insesgado

$$g_{insesg} = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} g_{sesg}$$

- Coeficiente de curtosis sesgado

$$k_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^4}{(S_{sesg}^2)^2}$$

- Coeficiente de curtosis insesgado

$$k_{insesg} = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} k_{sesg}$$



- Desviación estándar sesgada
- Desviación estándar insesgada
- Coeficiente de variación

$$S = \sqrt{S_{sesg}^2}$$

$$S = \sqrt{S_{insesg}^2}$$

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}}$$

Debido a que las series hidrológicas se consideran relativamente cortas, se deben preferir los estadísticos no sesgados.

Este es el análisis más básico, pero fundamental en todo estudio. Con estas medidas se persigue plasmar en pocos indicadores el conjunto de observaciones de una variable y describir con ellas ciertas características de grupos, logrando una comparación más precisa de los datos que la que se puede conseguir con tablas y gráficas. Además, estos estadísticos descriptivos serán de utilidad para el cálculo de los parámetros de las funciones en el análisis de frecuencias. Si se quisiera profundizar más en el tema se puede hacer uso de metodologías de hidrología estocástica, ya que los eventos hidrológicos, tales como las inundaciones son procesos estocásticos. Éstos se caracterizan porque, de un lado tienen un patrón medio de comportamiento a largo plazo, y por el otro el pronóstico de sus magnitudes en un momento dado tiene un mayor o menor grado de incertidumbre. El patrón medio corresponde a lo que se denomina la tendencia general o componente determinística y la incertidumbre constituye la componente aleatoria del evento.

3.3 Análisis con un enfoque hidrológico

3.3.1 Delimitación de la zona y caracterización hidrogeomorfológica de las cuencas

La delimitación de cuencas y subcuencas, tanto las afectadas por la inundación como las de aportación, se debe basar en criterios técnicos que tomen en cuenta las características topográficas e hidrológicas del lugar. Se trazará el parteaguas de cada una de las cuencas ya mencionadas, que será la línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico; así las cuencas delimitadas serán la base para la caracterización geomorfológica. Para conocer más sobre el trazo de parteaguas se puede consultar a Campos (1997).

Es deseable contar con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), con una escala de por lo menos 1:25,000, según los recursos lo permitan, aunque para la cuenca alta se puede usar una escala de 1:50,000 y para la planicie sería provechoso una escala de 1: 10,000. Con el MDE se puede tener la representación de la forma y las elevaciones de la superficie de estudio en forma gráfica y se



convierta en una herramienta más para los análisis subsecuentes, por ejemplo para la obtención de datos morfométricos para el cálculo de los parámetros hidrológicos.

Las cuencas, vistas desde un enfoque hidrológico, funcionan como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimiento. Esta transformación depende de una gran variedad de parámetros, por lo cual, para conocer el funcionamiento de la cuenca, se debe caracterizarla hidro-geomorfológicamente, mediante los siguientes parámetros (Linsley *et al.*, 1990; Valtierra y Domínguez, 2007):

- Parámetros físicos de la forma de la cuenca que afectan las características de la descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo:
 - Número de orden de un cauce. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones, un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden, mientras que un río de tercer orden es uno que contiene solamente ramificaciones de primero y segundo orden. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.
 - Densidad de corrientes. Es el número de canales o corrientes de agua presentes en la cuenca por unidad de superficie.
 - Densidad de drenaje. Es el cociente de la longitud total de canales o corrientes de agua presentes y el área total de la cuenca. Una densidad alta sugiere una cuenca muy bien drenada, una de baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.
 - Longitud de la cuenca. Es la distancia de una línea recta que va desde el punto de salida de la cuenca hasta el parteaguas de la misma y que además es paralela al cauce principal.
 - Longitud del cauce. Es la longitud del cauce principal, es decir, el cauce más largo y de mayor orden presente dentro de la cuenca. L
- Parámetros de relieve de una cuenca:
 - Elevación máxima. Es la cota del punto más elevado de la cuenca.
 - Elevación mínima. Es la cota del punto más bajo de la cuenca.



- Elevación media. Es el promedio de las elevaciones presentes en la cuenca.
- Pendiente de la cuenca. Es la que controla el tiempo de flujo sobre el terreno y tiene influencia directa en la magnitud de las avenidas.
- Pendiente del canal. Solo se considera la pendiente del cauce principal, y es el indicador más importante del grado de respuesta de una cuenca durante una tormenta. Para obtenerla se pueden utilizar varios métodos, el más sencillo de aplicar es la definición como tal en topografía de pendiente, que es la variación de la distancia en la horizontal entre la variación de la distancia en la vertical. Para conocer más métodos para la obtención de la pendiente del canal, se recomienda consultar a Aparicio (2005).
- Información de área – elevación. Se obtiene con el trazo de una curva hipsométrica, midiendo el área entre contornos de curvas de nivel y representado en una grafica el área acumulada por encima o por debajo de cierta elevación.

Se recomienda nuevamente el uso de un software especializado, por ejemplo Arc View debido a que cuenta con la extensión *carterosion.avx* o bien, *HEC-GeoHMS*, para la generación de esta caracterización, ya que de esa forma se simplifican los procesos a realizar, automatizándolos y con ello siendo eficientes en tiempo. Además, cabe mencionar que al usar la extensión *HEC-GeoHMS* para la obtención de la topología y conectividades de las cuencas, se hace un procedimiento casi automático pues de esto se puede pasar directamente a HEC-HMS, software para la modelación hidrológica, tema que se abordará más adelante en este documento.

3.3.2 Estado y calidad de la información hidrométrica

Al igual que para la estaciones hidrometeorológicas, en las estaciones hidrométricas es común que los registros estén incompletos. La ausencia de información puede presentarse en lapsos en los que precisamente se dieron eventos importantes, en cuyo caso se puede acudir a métodos alternativos donde se lleve a cabo interpolaciones con fundamento espacial en apoyo de otras estaciones cercanas que cuenten con registros. O bien, cuando los registros de hidrometría son nulos se puede recurrir a métodos como lo es el análisis regional (método de la avenida índice, estaciones – año, correlación múltiple, entre otros). Sin embargo, es preciso reiterar que la información de escurrimiento generada con análisis regional no puede ser usada directamente en el análisis de la guía que aquí se propone.



Por otro lado, puede que se trate de pequeños espacios solamente donde el analista sea capaz de inferir la información mediante algún método para completar registros como *Spline* que se refiere a la información obtenida a través de curvas que están definidas por porciones mediante polinomios de bajo grado evitando así las oscilaciones, indeseables en la mayoría de las aplicaciones, encontradas al interpolar mediante polinomios de grado elevado.

El análisis de datos de escurrimiento se realiza usualmente para aplicaciones específicas. Si en la cuenca de interés, existe un registro de gastos, éste debe usarse directamente.

3.3.3 Análisis de tendencia de los registros de hidrometría

Para el análisis de tendencia de los registros de hidrometría se sigue la misma metodología que para los registros de precipitación, de igual forma prefiriendo lo estadísticos muestrales no sesgados. La aplicación de la hidrología estocástica sigue siendo un proceso opcional también para este tipo de registros.

3.3.4 Análisis probabilístico de frecuencias. Precipitación y gastos

El análisis de frecuencias puede ser conducido tanto gráfica como matemáticamente. En el caso gráfico, se trazan las observaciones históricas de la variable de interés en forma creciente o decreciente, y se obtiene un estimado de su frecuencia de excedencia o un intervalo de recurrencia. Entonces se ajusta una curva suave para describir la probabilidad de cualquier evento particular del pasado o del futuro.

La aproximación matemática al análisis de frecuencias se basa en una descripción matemática específica, conocida como una distribución de probabilidad, que define el equivalente de la curva suavizada de la aproximación gráfica. Los parámetros de la distribución de probabilidad están definidos como funciones de las estadísticas de las observaciones (WMO, 1994), y definen propiedades de ubicación (P.E. Tendencia central), escala (dispersión o concentración), forma, asimetría, entre otras propiedades.

Así pues la estimación de los parámetros es importante. Cada estimador de un parámetro es una función de los valores de la muestra, los cuales son observaciones de una variable aleatoria. Así, el propio parámetro estimado es una variable aleatoria que tiene su propia distribución muestral. Un estimador que se obtiene a partir de un grupo de valores puede considerarse como un valor observado de una variable aleatoria, por lo cual, la bondad de un estimador puede ser juzgado a partir de su distribución (Escalante y Reyes, 2005).



Existen varias técnicas de estimación de parámetros, tradicionalmente el método de momentos (MDM) ha sido usado en hidrología incluso aunque ha sido reconocido como ineficiente estadísticamente en comparación con el método de máxima verosimilitud (ML). El método de momentos pesados (PWM_s), es en muchos casos conveniente de ser comparable con ML en sus propiedades estadísticas para muestras de tamaños que son normalmente encontradas en hidrología (WMO, 1994). Para conocer con detalle sobre estos métodos y otros más, se recomienda ver a Escalante y Reyes (2005).

El análisis probabilístico de frecuencias es simplemente un procedimiento para estimar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad de ocurrencia de eventos futuros o pasados (Haan, 1986). Para los fines de este estudio, lo que se requiere es determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento ya pasado, específicamente del evento inundante.

Debido a que el gasto máximo y su correspondiente hidrograma están controlados por muchos factores climáticos y fisiográficos, su estimación más confiable se basa en el procesamiento probabilístico de la información de las crecientes observadas ya sean de gastos o niveles. Por otra parte, el análisis probabilístico de las lluvias máximas o precipitaciones extremas permite la construcción de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno, las cuales caracterizan a las tormentas en la región de estudio. Estas curvas son también una herramienta invaluable para la determinación de escurrimientos en cuencas no aforadas. Para abundar más sobre el tema se recomienda revisar a Campos y Gómez (1990).

Una vez que ya se ha recabado la información hidrometeorológica e hidrométrica, se ha verificado la calidad y cantidad de la misma, así como haber obtenido ya los estadísticos muestrales y parámetros estadísticos, se puede realizar el procedimiento de análisis probabilístico de frecuencias. La longitud mínima recomendada por varios autores va desde 10, 20 y hasta 25 años según Esparza (2005).

En forma general, tanto para registros de precipitación como para registros de flujo, el procedimiento que se debe seguir para continuar con el análisis hidrológico de esta guía propuesta es ajustar los datos a varias funciones mediante un proceso analítico, después seleccionar la distribución de mejor ajuste, para con ella evaluar en varios puntos de interés.

No se deben perder de vista los conceptos indispensables en el análisis probabilístico de frecuencias. Una Función de Distribución de Probabilidad (FDP) es una función que asigna una probabilidad a cada evento definido sobre la variable aleatoria. La función de distribución describe el rango de valores de la variable aleatoria así como la probabilidad de que el valor de la variable aleatoria esté dentro de un subconjunto de dicho rango. La probabilidad de no excedencia está



definida como $F(x) = P(X \leq x)$ e indica la probabilidad de que ocurran eventos menores que X ; mientras que la probabilidad de excedencia es $P(X \geq x) = 1 - F(x)$. Algunas distribuciones teóricas que han sido usadas en análisis de frecuencias en hidrología son Log Normal, la Gamma, Log Pearson de 3 parámetros, Gumbel, Log Gumbel, así como la de General de Valores Extremos. Kite (1988) afirma que no existe consistencia sobre cuál es la distribución que mejor se ajusta a los caudales máximos y recomienda seleccionar el mejor ajuste a criterio del modelador con la prueba de ajuste gráfico o basado en el comportamiento de las pruebas estadísticas de bondad del ajuste (por ejemplo Chi Cuadrada, Kolmogorov - Smirnov, entre otros) en las que se calcula un estimador y se compara con un valor tabulado para determinar si el ajuste es adecuado o no. En la prueba de ajuste gráfico se dibujan los valores registrados en la serie contra la distribución teórica de probabilidades y de manera visual (subjetiva) se determina si el ajuste es adecuado o no.

3.3.5 Establecimiento de períodos de retorno de precipitación y gasto

El periodo de retorno se debe entender como el intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento de magnitud X , puede, en promedio ser igualado o excedido por lo menos una vez. En término de probabilidades, el periodo de retorno es el inverso de la probabilidad de excedencia de dicho evento, $T = 1/P(X \geq x)$.

Todas las obras de protección contra inundaciones se dimensionan para un evento con determinado período de retorno. Ahora bien, es frecuente creer que si se construye un bordo para la contención de avenidas, ya nunca habrá inundaciones en ese lugar. Sin embargo en realidad, si el periodo de retorno para el cual se ha calculado la altura del bordo es, por ejemplo de 20 años, es importante entender que en promedio, cada 20 años ocurrirá una avenida que sobrepase dicho bordo. De cualquier forma nadie puede asegurar que ese evento o uno superior no ocurrirá al año siguiente, de hecho existe una probabilidad del 5% de que el evento ocurra o sea excedido en un año cualquiera.

A este nivel de la guía, se han aplicado ya métodos estadísticos en registros de lluvias y gastos, tanto para datos históricos como para los asociados con el evento de inundación. Por lo que el paso siguiente es establecer los periodos de retorno correspondientes a éstos. Con ello será posible identificar claramente si las lluvias y gastos presentados durante la inundación correspondían a un periodo de retorno fuera de las capacidades del sistema.

Debe diferenciarse entre el periodo de retorno para lluvias y gastos, debido a que una lluvia con periodo de retorno determinado no es el mismo para el gasto que esta lluvia genere. Aldama *et al.* (2006) han demostrado ya matemáticamente que el periodo de retorno de una tormenta difiere del periodo de retorno de la avenida que produce. Del proceso lluvia - escurrimiento es ya sabida su no linealidad aun son pocos los esfuerzos que se han hecho por establecer la naturaleza de dicha linealidad. Eagleson (1972) fue el primero en abordar esta temática y analizarla en forma analítica.



Este proceso por naturaleza es complicado, sin embargo, el contenido de humedad del suelo al momento del evento de precipitación es una variable clave en el análisis, aunado a esto y a las ya intrínsecas características físicas de la cuenca, se podrían identificar los cambios que el uso de suelo y la vegetación podrían haber tenido a lo largo de los registros históricos, además de las actividades antropogénicas, lo cual lo hace más complicado aun. Así pues, una lluvia de 100 años de periodo de retorno no genera un gasto de 100 años de periodo de retorno, pero es probable que en una cuenca sujeta a urbanización o deforestación, esa lluvia genere escurrimientos con periodos de retorno cada vez mayores.

El procedimiento para establecer periodos de retorno, dada ya una FDP de mejor ajuste para el grupo de datos del análisis es, aplicando la expresión del periodo de retorno desde el punto de vista de las probabilidades de excedencia $T = \frac{1}{1-F(x)}$, donde $F(x)$, será evaluada con el valor particular presentado en el evento de inundación (x). Lo anterior es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud del caudal asociado con un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones, el error relativo asociado con la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones la incertidumbre está asociada principalmente con la calidad de los datos a modelar.

Otro procedimiento que se puede ejecutar sin tener que realizar un análisis probabilístico de frecuencias es el conocido como *Plotting Position* o posición de graficación, el cual trabaja con la probabilidad de excedencia asignada a cada valor de la muestra. Si n es el total de valores y m es el rango de un valor en una lista ordenada de mayor a menor ($m=1$ para el valor máximo) la probabilidad de excedencia se puede obtener por medio de las siguientes expresiones:

$$\text{California} \quad T = \frac{m}{n} \quad \text{Weibull} \quad T = \frac{m}{n+1} \quad \text{Hazen} \quad T = \frac{2m-1}{2n}$$

La expresión más utilizada es la Weibull. Con esto se encuentra lo que se conoce como distribución empírica de una muestra, ésta luego se puede ajustar a una de las distribuciones teóricas mencionadas anteriormente. Con este procedimiento se pueden ubicar en cuanto a periodo de retorno los datos de niveles obtenidos a través de marcas de inundación. Así se podrá establecer directa y empíricamente los periodos de retorno de eventos de inundación particulares importantes para este análisis.



Basado en lo anterior, se propone estimar el periodo de retorno asociado con el evento inundante de la siguiente forma:

- Ubicar el gasto asociado con el evento inundante mediante posición de graficación, considerando que en la longitud de los registros no se incluyó el valor del evento en cuestión, solo los valores históricos, o sea, solo los registros hasta el año anterior al que sucedió la inundación. Si este gasto se encuentra dentro de las magnitudes registradas en los datos históricos, fácilmente se podrá asignar un T a dicho evento, sin embargo si el gasto se ubica fuera de las magnitudes de los registros, se deberá hacer lo que se menciona a continuación.
- Calcular T del evento inundante a partir del ajuste de los registros a la FDP, una vez más, considerando que en el ajuste no se incluyó el valor del evento en cuestión. Para este caso, aunque el gasto tenga una magnitud mayor que la de los históricos, será posible extrapolar para asociarlo con un T .

Con estas dos formas de asignación de T se pretende que el valor que se obtenga no se vea influenciado por la longitud del registro y la magnitud del evento.

- Integrar el valor del gasto asociado con el evento inundante a los históricos, lo que dará como resultado una modificación tanto en el ajuste de los registros a la FDP como en los valores para el T mediante posición de graficación, y por consiguiente se tendrá que el valor de T que se asignó también se verá modificado.

Con lo anterior se pretende esclarecer el hecho de que la asignación de probabilidad de ocurrencia es evolutiva y no estática como se pudiera pensar.

3.3.6 Estimación de lluvia en exceso

La lluvia en exceso es la diferencia entre la lluvia total registrada y las abstracciones hidrológicas. Se trata entonces de la precipitación que no es interceptada, no es retenida por la superficie, no se infiltra y no se evapora. Así pues, es la precipitación que genera el escurrimiento directo a la salida de la cuenca.

La lluvia en exceso se calcula a partir del hietograma de precipitación (de la tormenta severa elegida), considerando que:



- Si se conocen las abstracciones. Se tiene un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, con lo que se podría estimar el gasto directo a partir del hidrograma de la avenida y con ello la lluvia en exceso como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca.
- No se conocen las abstracciones. En este caso se utilizarían métodos específicos para estimar las abstracciones, como las ecuaciones de infiltración de Green - Ampt o el modelo del número de curva desarrollado por el *Soil Conservation Service*. Para conocer más sobre estas ecuaciones se recomienda revisar a Chow(1994a).

Por lo que de acuerdo con la información recolectada, se elegirá el procedimiento a aplicar para el análisis forense de inundaciones que se esté llevando a cabo.

3.3.7 Modelación y simulación del proceso lluvia-escurrimiento

Los flujos de agua que son provocados por la precipitación se estiman con un modelo lluvia - escurrimiento, el cual es complejo. Los procesos lluvia - escurrimiento son usados principalmente para el diseño de obras, pronóstico y evaluación de eventos cuando no se tienen datos de gastos. En el caso que nos ocupa, serán usados como parte del proceso de evaluación del sistema de respuesta de las cuencas analizadas ante un evento de inundación. Los métodos de simulación por medio de software se tornan más eficientes y en la actualidad confiables para calcular el escurrimiento a partir de la lluvia, ya que permiten un análisis relativamente detallado utilizando intervalos pequeños de tiempo.

Entonces, sí no hay registros hidrométricos disponibles o son muy limitados para una interpretación o extrapolación confiable, las relaciones lluvia - escurrimiento pueden ser muy útiles por su habilidad de inferir información de flujo a partir de registros de precipitación.

Para la modelación del proceso lluvia - escurrimiento, las condiciones iniciales de humedad de la cuenca al comienzo de la tormenta son importantes así como las características de ésta, como lo son la cantidad de precipitación, intensidad y duración.

Para la humedad de la cuenca es importante el aspecto de la precipitación antecedente, la cual es la suma de las cantidades de precipitación diaria en el pasado, donde se considera generalmente como una función exponencial o inversa del tiempo, de forma que las precipitaciones más recientes serán las mayormente influyentes.



Para el análisis de la tormenta, en la parte de cantidad de precipitación, es necesario que cuando éstas son complejas, de larga duración, separarlas en tantos intervalos como sea posible. Ahora, en cuanto a la intensidad de la tormenta, según Linsley *et al.* (1990) sugiere que para cuencas de 250 km² o mas, es generalmente adecuado el uso de una intensidad promedio dada por la duración y cantidad total de la precipitación.

Los modelos lluvia – escurrimiento se clasifican en:

- Empíricos. Estos métodos no predicen la dinámica del escurrimiento, sólo el escurrimiento pico.
 - Envolventes. Estos métodos no analizan propiamente la relación lluvia – escurrimiento y no se asocia a probabilidades específicas de ocurrencia, sin embargo sí proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los gastos, lo cual para el análisis forense de inundaciones resulta interesante puesto que los eventos que se presentan generalmente serán eventos extraordinarios aun así ellos serán estimados gruesos. En general, este estimado puede ser útil en la estimación de eventos en zonas donde se carece de información hidrométrica. Algunos de estos métodos son el de Creager y el de Lowry, los cuales están básicamente en función del área de la cuenca (Aparicio, 2005). Resulta conveniente para el caso de México que conociendo la magnitud del gasto asociado con el evento inundante que se estudia, se contrastará con la envolvente obtenida para la región hidrológica y administrativa correspondiente que presentan Ramírez *et al.* (2005) en su artículo denominado “Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la República Mexicana”, esto con el afán de ubicar dicho evento dentro del comportamiento general de los gastos máximos anuales en la región. Para esto, no se debe perder de vista que el fundamento para la generación de envolventes en el artículo citado consistió en tomar en cuenta en el análisis, solamente los registros de estaciones de aforo correspondientes a cuencas que presentaron un régimen de escurrimiento virgen o inalterado. Aun ello, con la propuesta que aquí se hace será posible ubicarse en el contexto de la respuesta de la cuenca.
 - Formula racional. Este modelo además de tomar en cuenta el área de la cuenca, considera la altura o intensidad de la lluvia, esto es de gran importancia puesto que los datos pluviométricos son más fáciles de conseguir. Las hipótesis bajo este método son que la lluvia se considera uniforme en toda la superficie de la cuenca, por lo que es aplicable para cuencas pequeñas, en donde la variación espacio –



temporal de la lluvia sea pequeña, además, dado que la intensidad media se considera constante se debe limitar la duración a valores iguales o menores que el tiempo de concentración (Aparicio, 2005). Este método es sencillo de aplicar y se puede usar además en el cálculo de gastos máximos para diseñar canales, drenajes o alcantarillas, también en el cálculo de niveles máximos de inundación, siendo éste de competencia para esta investigación.

$$Q = \frac{C i A}{K}$$

Donde

Q	Gasto	[m ³ /s]
C	Coefficiente de escurrimiento	[adim]
i	Intensidad máxima	[mm/h]
A	Área de la cuenca	[Has]
K	360	

- Hidrogramas unitarios. Se define como el hidrograma de escurrimiento directo que se produce por una lluvia efectiva o en exceso de lamina unitaria, duración d_e y repartida uniformemente en la cuenca y considera las hipótesis de tiempo base constante, linealidad o proporcionalidad y superposición de causas y efectos (Aparicio, 2005).
 - H.U. Tradicional. Este modelo puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de lluvia en exceso, siempre y cuando se cumpla con que la lluvia en exceso tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva y está uniformemente distribuida en toda el área de drenaje. El tiempo base de la duración del escurrimiento directo resultante de una lluvia en exceso de duración dada es constante (Chow, 1994a).
 - H.U. Instantáneo. Éste se denomina como una función impulso respuesta a un exceso de lluvia considerado como una cantidad unitaria y con duración infinitesimal. El exceso de lluvia se aplica al área de drenaje con el tiempo cero. Por ser un concepto teórico, no puede utilizarse en cuencas reales, pero es útil para caracterizar la respuesta de la cuenca a lluvia sin referencia a la duración de ésta y con ello se puede relacionar con la geomorfología de la cuenca (Chow, 1994a).
 - H.U. Sintéticos. El hidrograma unitario desarrollado a partir de la información de lluvia y de gasto en una cuenca se aplica solamente para la cuenca y para el punto de la corriente donde se aforo. Los procedimientos de hidrograma unitario sintético se



utilizan para desarrollar hidrogramas unitarios para otros puntos de la corriente dentro de la misma cuenca o para cuencas adyacentes de carácter similar (Chow, 1994a).

- Método de Snyder. Snyder estudió los Montes Apalaches, Estados Unidos, tomando áreas de 30 a 30,000 km², con lo que estableció relaciones sintéticas para un hidrograma unitario estándar, a partir de las cuales pueden calcularse el gasto pico por unidad de área y el tiempo de retardo de la cuenca, el tiempo base y los anchos del hidrograma unitario al 50 y 75% del gasto pico, esto para el hidrograma unitario requerido para una duración de lluvia en exceso dada (Chow, 1994a).
- Adimensional SCS. Éste se expresa por la relación del gasto q con respecto al gasto pico q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario, T_p . una vez con la información del gasto pico y el tiempo de retardo para la duración en exceso de lluvia, se puede estimar hidrograma unitario a partir del sintético para la cuenca dada (Chow, 1994a).

La calibración permite determinar con suficiente exactitud bajo condiciones específicas cuál es el valor de los errores de los resultados de un modelo o medición con respecto a un patrón de referencia. Es de vital importancia que dichos errores sean lo suficientemente pequeños y que hayan sido determinados con la mayor exactitud posible. Un método de apoyo sobre todo para la calibración en un punto del modelo a construir es el de Sección – Pendiente. Con este método es posible estimar el gasto en sitios no aforados, este método parte de la formula de Manning y se requiere de un tramo lo más recto posible, uniforme en la conformación de la sección, dos secciones específicas para en ellas medir el tirante del agua. Con el promedio de las dos secciones y los dos radios hidráulicos, calculando la pendiente con el desnivel de agua dividido entre la longitud de separación entre secciones, y considerando que el incremento de nivel es la suma de la altura de agua mas altura de velocidad mas la altura de turbulencia, despreciando estas últimas por poca significación, se puede calcular el gasto multiplicando la sección de escurrimiento promedio por la velocidad según Manning. La precisión se obtiene con la seguridad de definición del coeficiente de rugosidad n .

Independientemente de la existencia de diferentes modelos lluvia – escurrimiento, se deben tener en cuenta las limitaciones de cada uno de ellos al aplicarse a la zona e información con que se cuenta.



Así mismo se cuenta actualmente con paquetes de software especializados de los cuales se puede hacer uso y que pueden ser una herramienta ampliamente útil para este tipo de procesos, como por ejemplo el Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-HMS por sus siglas en Inglés), creado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el cual está diseñado para calcular el hidrograma producido por una cuenca dados los datos físicos de ésta así como datos de precipitación. Las fases de trabajo del programa son la separación de la lluvia neta, el cálculo del escurrimiento directo, la suma del escurrimiento directo y el base, finalmente pudiéndose transitar el hidrograma; este software es gratuito. Otro ejemplo es el Watershed Modeling System (WMS) desarrollado por The Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University, el cual cuenta con delimitación automática de cuencas, herramientas SIG, modelación de planicies de inundación y mapeo, modelación estocástica, hidrología en 2D y compatibilidad de datos como dxf, dwg, tiff, jpeg, entre otros. Su adquisición tiene costo.

Otros paquetes de software que pueden ser útiles también en la modelación son:

- ARSP. Modelo de simulación de sistemas hidrológicos complejos constituidos por un elevado número de lagos y embalses interconectados por cauces naturales o canales. Con cargo.
- MOUSE. Sistema integrado de diseño y modelización de sistemas de escorrentía superficial, canales y redes de conducciones que permite acometer estudios de calidad de aguas, transporte de sedimentos y diseño de redes de pluviales y saneamiento. Con cargo.

Se hace la recomendación de utilizar HEC-HMS debido a que de uso gratuito y ampliamente evaluado a nivel internacional. Puede clasificarse como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y continuo, distribuido y agregado y de propósito general, con un fácil manejo y ambiente amigable. Algunas desventajas son que no simula llanuras de inundación por lo que se tendrían que usar otras herramientas para ello; los hidrogramas unitarios pueden ser incluidos para la simulación, sin embargo se deben generar fuera del modelo. Aun ello, se reitera que es un software ampliamente utilizado internacionalmente lo cual le da plusvalía y en México se ha convertido en un estándar en la Conagua, la máxima autoridad en el ámbito del agua.

Es importante resaltar que la calibración es un factor importante en cualquier modelación, pues si se calibra el modelo se tendrá la certeza de que éste responderá de manera similar a los patrones que hicieron posible dicha calibración así como a las muestras que permitan la simulación de escenarios, aunque alguno de los escenarios sea relativamente diferente o extraordinario, como en el caso de los grandes eventos de inundación.



3.4 Análisis con un enfoque hidráulico

3.4.1 Revisión del diseño y estado de las obras hidráulicas

Para este apartado se debe hacer uso de la información recolectada acerca de las obras mencionadas en el punto 3.1.4 así como la información generada del análisis hidrológico sin y con la inclusión del evento de inundación por separado.

Principalmente la revisión de las obras hidráulicas está enfocada a comparar los valores originales de diseño con la información generada del análisis hidrológico para el evento de inundación que se está estudiando, esto es, de acuerdo con los caudales máximos obtenidos de dicho análisis, se deben aplicar esos valores al funcionamiento de las obras y compararlo con el teórico de acuerdo con sus capacidades y diseño. Sin embargo, puede presentarse el caso en que no se cuente con la información o procedimientos seguidos en el diseño de las obras, es entonces que se tendría que revisar con las políticas de operación actuales en sustitución de los valores de diseño. Con base en lo anterior se analiza el estado general de las obras para definir si éste fue un factor fundamental en el desastre ocurrido.

Las obras a revisar son:

- Embalses y presas

El proceso convencional de diseño de un vaso consiste en determinar una avenida de diseño a través de un análisis de frecuencias, donde se acepta un nivel de riesgo mediante la asignación de un periodo de retorno. Con lo anterior, se transita la avenida por el vaso, donde se ven involucradas las características del vaso y características de la obra de excedencias incluidas las políticas de operación. Esta avenida de diseño será el pivote de los análisis, pues se verificará la condición actual del embalse de acuerdo con los datos de diseño para después estudiar los volúmenes transitados normalmente y al final el volumen asociado con el evento particular estudiado.

En general, se pueden mencionar tres enfoques para estimar avenidas de presas (Aldama *et al.*, 2006):

- Enfoque hidrometeorológico: Analizar registros de precipitación y convertirlos en escurrimiento por medio de modelos lluvia – escurrimiento, a través de los cuales se puede obtener el hidrograma completo de la avenida.
 - Precipitación Máxima Probable (PMP): Ésta se refiere a la mayor lamina de precipitación para una duración dada que es físicamente posible,



considerando una área dada de tormenta, en una ubicación geográfica particular y en un tiempo del año específico. Este proceso se basa en el empleo de datos observados para muy pocos eventos extremos que usualmente no han ocurrido en el sitio de interés, por lo que deben utilizarse procedimientos como la transposición de tormentas. Ya se ha comentado sobre este método y las consecuencias que se tendrían al usarlo para los fines que aquí interesan.

- Análisis de frecuencias
 - Enfoque hidrométrico: Realizar un análisis de frecuencias de gastos máximos anuales. Una vez que se estima el gasto pico asociado con un periodo de retorno se procede comúnmente a “mayorar” la avenida, esto es, suponer que la forma de hidrograma es la misma que la de la creciente máxima registrada.
 - Método bivariado: el análisis mediante el enfoque hidrométrico implica hablar solo del periodo de retorno de gasto pico y no del periodo de retorno del hidrograma completo. Mediante el método bivariado se habla de un análisis de frecuencias conjunto, lo cual permite asignar un periodo de retorno al hidrograma completo de una avenida (Ramírez y Aldama, 2000).
- Estaciones de bombeo

Generalmente las estaciones de bombeo son usadas para desalojar las aguas residuales o pluviales de una zona que por sí misma no puede drenarse por gravedad y con ello evitar encharcamientos. Otra de las funciones de las estaciones de bombeo es servir directamente como protección a inundaciones, por ejemplo, en avenidas máximas mantener el nivel de algún canal o dren, transportando el agua por medio de estaciones de bombeo a algún cauce con mayor capacidad.

Los factores que principalmente serán revisados de las estaciones de bombeo, serán su ubicación y su funcionamiento. Primero, la ubicación de la estación de bombeo debe asegurar que ésta no se vea inundada cuando se presente un evento extremo. La estación de bombeo debe tener una altura suficiente para evitar que los equipos sufran una falla mecánica, por obviedad, si lo anterior llegase a suceder el funcionamiento se vería truncado y no podrían aminorarse los niveles de ciertas zonas con problemas de drenaje o para evitar inundaciones. Segundo, se debe revisar los datos de diseño y políticas de operación de la estación de bombeo con el afán de verificar si la capacidad fue suficiente, el manejo adecuado y tiempos de desalojo, así como en caso de falla no mecánica, identificar el elemento fallido del sistema.



Para verificar el funcionamiento de las bombas, generalmente no se cuenta con toda la instrumentación para efectuar una prueba en donde se verifique el comportamiento completo. Sin embargo, basado en la información del fabricante, como la curva de comportamiento, el equipo debe cumplir haber operado bajo determinadas condiciones para así asegurar que el funcionamiento fue adecuado. Existen dos parámetros que se deben determinar, la carga total y el caudal. En vista de que la mayoría de las instalaciones cuentan con medidor de caudal, la tarea restante consiste en la determinación de la carga total. Conociendo esta última, la prueba de verificación del funcionamiento se realiza al localizar la intersección de estas dos variables en la curva del fabricante, la cual debe estar muy próxima al punto de diseño de la bomba.

Se pueden atender las siguientes recomendaciones para llevar a cabo la revisión general del estado de las estaciones de bombeo:

- La entrada a la cámara de toma debe contar con una rejilla que pueda retener las impurezas gruesas, así como un desarenador para retener los sólidos pesados, en función de la tubería de succión y capacidad de la bomba.
- Los conductos de succión deben estar provistos de válvula de pie y accesorios necesarios para acomodar su sección al orificio de la bomba.
- Si se tiene una central enterrada se debe verificar que esta sea impermeable y sus paredes interiores y pisos lisos y lavables.

Para cualquiera de las dos funciones aquí mencionadas para las estaciones de bombeo, la falla resulta un factor importante a tomar en cuenta para evaluar la gravedad de la inundación y sus correspondientes afectaciones.

- Canales y drenes

Hasta el presente apartado no se ha realizado aun la modelación hidráulica de la red de cauces, la cual proporcionará la información suficiente para el análisis cuantitativo de los cauces y drenes. Cabe mencionar que la revisión de los canales y drenes en este apartado no incluye a los cauces naturales o sin modificación. Aquí se analizan solamente los cauces modificados y artificiales realizados para mejorar el sistema hidráulico de la zona. La revisión será cualitativa, principalmente verificando los datos de diseño como el talud, las velocidades mínima y máxima del flujo y los criterios que se utilizaron para estimar el bordo libre así como la zona de inundación respectiva al cauce. La pendiente longitudinal es una de las variables hidráulicas de mayor importancia en la



energía del río y es por ello que los cauces necesitan un espacio de movilidad fluvial donde desborde el agua en crecidas y disipar su energía.

Se deben revisar entonces las características de diseño del cauce, así como la evolución histórica de éste y las características actuales antes de la inundación, para referir si algún factor en la evolución del cauce o dren pudo haber sido decisivo y agudizar con ello dicha eventualidad. Se deben buscar relaciones de degradación o mejoras, así como describir las deficiencias de las estructuras presentes sobre el cauce y su funcionamiento.

Finalmente la revisión cualitativa de los cauces y drenes estará implícita en el análisis de los resultados de la modelación hidráulica.

- Sistemas de abastecimiento de agua potable

Los sistemas de abastecimiento de agua potable pueden llegar a fallar en eventos de inundación y dejar a la población sin este servicio, lo cual representa principalmente problemas de salud pública por la falta de higiene en el agua que se consume. Debido a ello, el estudio de estos sistemas se convierte en un factor de análisis como parte del enfoque forense de inundaciones en su parte hidráulica.

Un sistema de abastecimiento de agua potable se conforma de una fuente de abastecimiento, líneas de conducción y redes de distribución. Para el análisis de este tipo de obras hidráulicas los factores más importantes son la ubicación del sistema, específicamente de la línea de conducción desde de la fuente de abastecimiento así como el tipo y medio de abastecimiento.

Las fuentes de abastecimiento para estos sistemas son dadas por lo menos de estas tres formas:

- Desde una presa o embalse. Para esta fuente de abastecimiento, los problemas debido a una crecida máxima son mínimos, pues las tuberías deben ser diseñadas para soportar grandes cargas hidráulicas. El problema principal que se podría presentar sería debido a una falla estructural en la cortina que pudiera afectar la obra de toma.
- Por bombeo desde un pozo hasta un tanque elevado. Los problemas debido a una inundación se presentarán por fallas electromecánicas en el sistema de bombeo. Las bombas deben ser ubicadas por lo menos 1.5 m sobre el nivel de piso, entonces, cuando el nivel del agua sobrepase dicha elevación, las bombas se



enfrentarán a un corto circuito, con lo cual el abastecimiento de agua potable será suspendido.

- Por bombeo directo desde el pozo hasta la línea de conducción. Aplica la misma situación que en el caso anterior.

Después de revisar la fuente de abastecimiento y verificar si hubo alguna falla, se deben buscar fallas en la línea de conducción, esto es, antes de la red de distribución. Se pueden tener diferentes tipos de instalación de estas líneas de conducción, desde enterradas, a nivel o sobreelvas del piso. En cualquiera de los tipos de instalación anteriores, si la línea de conducción se ubica en la planicie de inundación de un cauce, ésta podría romperse por la fuerza que ejerza el agua sobre ella. Por lo anterior, debe revisarse la topografía de donde se ubica el sistema.

Entonces, el sistema de abastecimiento de agua potable puede fallar debido a inundaciones desde la fuente de abastecimiento hasta la línea de conducción y no más allá. Es por lo expuesto ya que en estos casos el gasto de la creciente y los gastos de diseño cobran un papel secundario.

- Sistemas de drenaje

La función principal de los sistemas de drenaje es conducir las aguas residuales o pluviales captadas en los sitios de asentamientos humanos hasta sitios donde no provoquen daños e inconvenientes a los habitantes (Conagua, 2007a).

Para los sistemas de drenaje ya sea sanitario, pluvial o combinado, el factor más importante para que éste falle es que se vea sobrepasado en su capacidad, por lo que lo que debe tener la mayor atención son las características de diseño de la tubería, esto es gasto de diseño, diámetro y material. De igual forma se debe revisar las velocidades de diseño, las de funcionamiento real y las presentadas durante el evento de inundación, así como la presión en conductos que trabajen bajo ese precepto. En adición con lo anterior, puede ser posible que además de las características hidráulicas revisadas, se vea involucrado otro factor en el funcionamiento del sistema de drenaje, esto es el arrastre de materiales o basura hacia el sistema, lo cual obviamente genera problemas tanto para el desalojo del exceso de agua en calles, como para el tránsito del flujo en el interior de las tuberías. Es por ello que dentro de esta parte toma relevancia el hecho de revisar la información recopilada sobre los sistemas de recolección de basura, cultura de los desechos entre otros factores culturales de la zona que se estudia. Con lo anterior, aunque sea difícil tener evidencias justo antes del evento, será posible inferir una tendencia en el comportamiento general de esas acciones, lo cual será de ayuda para esclarecer si el sistema falló por cuestiones de diseño o por motivos externos.



El método más utilizado para la revisión y diseño de sistemas de drenaje ha sido el Método Racional, ya descrito, sin embargo también se podría utilizar el hidrograma unitario instantáneo en caso de contar con mediciones simultaneas de gastos a la salida de la cuenca urbana y lluvia en algunos puntos dentro de ella, o bien, en caso contrario se podría usar el concepto de hidrograma unitario sintético.

- Infraestructura de protección

Para el diseño de obras de protección contra inundaciones se toma en cuenta como parámetro principal el periodo de retorno al que se asocia la avenida de diseño. Los periodos de retorno se relacionan con las características del área a proteger. Si alguna obra de protección de las enlistadas anteriormente o alguna otra presente en la zona de estudio falló durante la contingencia se llevará a cabo la revisión de su funcionamiento para encontrar la causa de tal fallo.

De acuerdo con Maza (1987), los valores que pueden guiar en la revisión de las obras de protección se muestran en la tabla 3.3. Los factores allí comprendidos son el periodo de retorno y las características del área a ser protegida.

Con base en lo anterior se puede iniciar la inspección, verificando si el periodo de retorno fue el adecuado para el diseño, consecuente a esto, se deben revisar los gastos de diseño, de operación y el manejo real durante la contingencia. En el caso de las estructuras de protección costera, la variable de mayor importancia es la marea y altura de las olas, pues lo que se busca en este tipo de obras es que se evite la incursión de las olas al interior. Para cada tipo de obra hay diversas metodologías, es por ello que se recomienda revisar a Maza (1987).

Características del Área a ser Protegida	T (años)
Parcelas sin posibles pérdidas humanas	5
Riesgos distintivos pero sin riesgo de pérdidas humanas	25
Áreas con agricultura y poca población	50
Zonas industriales y urbanas	500
Áreas densamente pobladas	1,000
Ciudades	>1,000

Tabla 3.3 Periodo de retorno de diseño para obras de protección de acuerdo con las características de la zona a proteger.

Para el caso de México y las obras hidráulicas en general, se recomienda se revisen las especificaciones y recomendaciones que hace la Conagua (1993), en cuanto a los periodos de retorno que se deben manejar de acuerdo con el tipo de obra que se trate . Por ejemplo, alcantarillas



para paso de pequeñas corrientes en caminos primarios que comunican poblados grandes o ciudades, se recomienda un periodo de retorno de diseño de 50 a 100 años, mientras que para un presa derivadora con una zona de riesgo grande, o sea, mas de 10,000 has en riesgo, se recomienda un periodo de retorno de diseño de 500 a 1,000 años.

3.4.2 Manejo y operación (teórico y real) de embalses antes y durante el evento

La política de operación de un embalse representa un conjunto de reglas que definen la forma en que operará un almacenamiento y son representadas de manera gráfica o mediante fórmulas que prescriben el volumen a extraerse en cierto periodo condicionado a la situación que presenta el almacenamiento. Al presentarse una avenida y suponiendo que el vaso se encuentra en su Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO), ella debe ser desalojada de acuerdo con las reglas preestablecidas (Preciado *et al.*, 2007). Los criterios para la operación de toda presa deben ser certeros y rigurosos permitiendo sólo almacenar agua hasta el nivel de la capacidad destinada a las funciones de producción, sin sobrepasar nunca la capacidad destinada para el control de avenidas.

La obra de excedencias es la que corresponde principalmente con las políticas de operación. Las obras comúnmente presentes en embalses son los vertedores de descarga libre y de descarga controlada. Si existen modificaciones en las políticas de operación se está modificando también el periodo de retorno de diseño y con ello la seguridad hidrológica del embalse. Así que al analizar las variaciones en las políticas de operación que se hayan presentado a lo largo de la vida de la obra se podrá conocer el riesgo de falla hidrológica de un vaso.

Entonces, para la revisión del manejo y la operación de los embalses, se deben tomar en cuenta las políticas de operación, esto es, las elevaciones y gastos de descarga respectivo; las políticas de operación históricas así como su manejo actual; finalmente la política de operación y manejo utilizada al tiempo que se produjo la emergencia. Con lo anterior se plantean diferentes escenarios para cada una de las políticas de operación, se lleva a cabo un tránsito para cada una de ellas y de acuerdo con los resultados que se obtengan será posible determinar si el manejo y operación fue adecuado. Cabe mencionar que el nivel inicial máximo antes del evento estudiado debe ser el NAMO, ya que si por algún motivo este nivel inicial sobrepasa al NAMO, ello podría implicar una mala operación del embalse antes de la avenida.



3.4.3 Modelación y simulación hidráulica de la red de cauces

Para simular o reproducir el comportamiento hidrodinámico de una red de cauces es necesario llevar a cabo el proceso de modelación. La modelación es la representación simplificada de un sistema real. Para lograrlo, es necesario conocer la geometría de los cauces y las variables hidrodinámicas del sistema para así comparar los resultados del modelo con lo observado en la realidad, en este caso, lo sucedido durante el evento de inundación.

Para llevar a cabo la modelación es necesario conocer algunas variables geométricas de la red de cauces, como lo son el eje del cauce, características por sección, elevaciones, profundidades; esta información generalmente se obtendría de campo, por lo que los levantamientos topográficos directos serían ideales, sin embargo y como se ha venido recomendando, el uso del SIG facilitará los procesos, por lo que este caso no será la excepción. Al contar con la información topográfica del terreno de por lo menos una escala 1:5,000, se pueden obtener detalles después del análisis del MDE, pero se debe tener en cuenta la topografía del cauce para poder escoger una buena escala y con ello generar secciones, que proporcionen las características ya mencionadas.

A su vez es necesario conocer algunas características hidráulicas tales como tipos y material de la pared del cauce lo cual se puede obtener en investigaciones de campo. A todo lo anterior se debe agregar la información sobre el flujo, la cual fue generada en el análisis hidrológico. No se debe olvidar considerar las obstrucciones presentes en el cauce (P.E. Puentes) y ubicación de estructuras tales como presas, cárcamos de bombeo, etc.

Para la modelación se debe tener claro el tipo del flujo. En canales abiertos el flujo puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras, la siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en el tirante del flujo con respecto al tiempo y el espacio. Flujo permanente y flujo no permanente, donde el tiempo es tomado como criterio.

Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración. El otro tipo de flujo, el no permanente ocurre si la profundidad cambia con el tiempo, para más información sobre el tema Chow (1994b) hace una amplia explicación sobre éste. Para la aplicación que aquí se está estudiando, el flujo no permanente resulta ser el más importante pues será el que mejor describa un evento de inundación.



Para cualquier flujo, el gasto Q en una sección del canal se expresa por $Q = AV$, donde V es la velocidad media y A el área de la sección transversal por donde pasa el flujo.

Entonces al contar con las características del flujo se debe ser capaz de clasificarlo con alguno de los dos tipos antes mencionados, para usar esta información en la modelación.

De igual forma, y como información para la modelación, se debe determinar el régimen de flujo de la corriente. Éste se clasifica en función del número de Froude, relación adimensional entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, en estado crítico, subcrítico donde el flujo tendría una velocidad baja y supercrítico donde el flujo tendría una alta velocidad (Chow, 1994b).

Una de las características importantes del cauce es el coeficiente de rugosidad, el cual es el valor que representa la resistencia al flujo por fricción, comúnmente llamado n de Manning. Chow (1994b) menciona una guía para la determinación correcta del coeficiente de rugosidad de Manning que consiste en cuatro enfoques generales.

- Entender los factores que afectan el valor de n con el fin de adquirir el conocimiento básico del problema y disminuir el rango de incertidumbre.
 - Rugosidad superficial
 - Vegetación
 - Irregularidad del cauce
 - Alineamiento del cauce
 - Sedimentación y socavación
 - Obstrucción
 - Tamaño y forma del cauce
 - Nivel y caudal
 - Cambio estacional
 - Material en suspensión y carga del lecho
- Consultar una tabla de valores comunes para n para canales de diferente tipo.
- Examinar y familiarizarse con la apariencia de algunos canales comunes cuyo coeficiente de rugosidad se conocen.
- Determinar el valor de n mediante un procedimiento analítico basado en las distribuciones de velocidad teóricas en la sección transversal de un canal y en los datos de medición de velocidad o de rugosidad.



Se recomienda el empleo de herramientas como software especializado en el análisis de la red de cauces en caso de inundaciones debido a su versatilidad y ventajas en cuanto a inversión de tiempo y costo. Se pueden incluir herramientas que describan el tránsito del flujo líquido y sólido para otorgar una estimación confiable al fenómeno de erosión y sedimentación en las diversas estructuras que pudieran interactuar con la red.

Para el modelado y simulación de la red de cauces se puede mencionar el programa de cómputo Hydrologic Engineering Centers -River Analysis System (HEC – RAS), este software fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, es de uso gratuito. El modelo numérico incluido en este programa permite realizar análisis unidimensional de flujo permanente para superficie libre, flujo no permanente, transporte de sedimentos y hasta calidad del agua. A su vez se puede hablar del software Surface Water Modeling System (SMS), el cual cuenta con herramientas SIG, circulación costera, modelación de ondas, modelación de ríos, calidad del agua, transporte de sedimentos, entre otras aplicaciones, específicamente para el análisis que nos compete, el modelo hidrodinámico FESWMS, es una interface del SMS. FESWMS es un modelo en dos dimensiones para régimen subcrítico y supercrítico y se basa en la teoría del elemento finito. Este software tiene costo por adquisición de licencia.

Aquí se presenta una lista de otro software útil en la modelación:

- HVEL2D. Modelo bidimensional en elementos finitos para la modelación del flujo en canales con altas velocidades. Interface de SMS.
- RiverCAD. Entorno gráfico avanzado de modelación de sistemas hidrológicos basado en un sistema tipo CAD con conexión al programa HEC-RAS. Adquisición con costo.

La recomendación que se hace es la aplicación del software HEC-RAS, ya que su primer y gran ventaja al igual que para el HEC-HMS es que se trata de un software gratuito, además de ser ampliamente utilizado en nuestro país e internacionalmente para realizar la modelación hidráulica de canales naturales y artificiales. Éste puede incorporar mucha información geométrica y con conocimiento, criterio e ingenio la definición de condiciones de frontera no resulta gran problema. Claramente en el análisis de inundaciones las simulaciones para flujo permanente 1D no tienen en cuenta todos los efectos hidrodinámicos de una onda de creciente, que representa un proceso físico en dos dimensiones. Por este motivo en HEC-RAS se incluyen procedimientos más sofisticados basados en la solución de la ecuación 1D de Saint Venant. Para incluir el efecto de desborde en la dirección perpendicular al flujo se requiere considerar una sección transversal compuesta que incluye un canal principal y una planicie de inundación, y realizar una serie de suposiciones adicionales que se constituyen en la esencia del procedimiento de solución para flujo no permanente incluido en HEC-RAS. El modelo cuenta igualmente con la posibilidad de definir áreas



de almacenamiento. Todo ello en sustitución de la simulación bidimensional proporcionada por FESWMS, la cual resulta con complicaciones importantes. Aunque supone una mejora del cálculo realizado con HEC-RAS solo en cuanto a la dirección del agua desbordada que recorre la llanura de inundación, no se puede incorporar información geométrica detallada por lo que es más importante esto que los inconvenientes que suponen despreciar los efectos bidimensionales.

El modelo permite realizar el cálculo de perfiles de flujo solucionando las ecuaciones de continuidad y de momentum a través de un esquema implícito de diferencias finitas solucionado iterativamente utilizando la técnica de Newton-Raphson. El parámetro de calibración del modelo es el coeficiente de rugosidad n de Manning, para el cual no existen estrategias automáticas de calibración en el modelo, y por ende debe ser calibrado manualmente a partir de la comparación de niveles de agua registrados y simulados cuando se da el caso. Otros parámetros del modelo incluyen los coeficientes de pérdidas por expansiones y contracciones. Una ventaja más de este software es que al igual que en la modelación hidrológica, se puede usar un pre proceso con la extensión *HEC-GeoRAS* para uso en Arc-View. Se puede obtener las características de las secciones transversales y del cauce siempre a través del MDE complementado con información topográfica detallada.

La modelación y simulación se ha de hacer para las condiciones de funcionamiento normal de la red, así como para la eventualidad de la inundación. Los niveles aquí resultantes serán de primordial importancia pues son ellos la variable principal en la generación de los mapas de inundación.

3.4.4 Comportamiento de la red de cauces y de las llanuras de inundación

La modelación hidráulica de la red de cauces proporcionará la información suficiente para la determinación del comportamiento general y del evento extraordinario de dicha red, así como de los límites de la llanura de inundación en funcionamiento normal y manchas de inundación en eventos extraordinarios.

Esta información es importante puesto que una vez que se delimite la llanura de inundación y se determine si en ella existen asentamientos humanos, se debe llevar a cabo una análisis hidráulico de la zona urbana tomando alguno de los criterios ya presentados en esta tesis para con ello establecer cuan afectada resulta la dinámica de la ciudad, para lo cual también podría simularse el funcionamiento hidrodinámico en las calles.

Para la modelación de zonas urbanas se puede hacer uso del software MOUSE, ya mencionado anteriormente o bien el MIKE SWMM, que es un programa para la modelación y diseño de redes urbanas de saneamiento y drenaje de aguas pluviales. Éstos tienen costo por adquisición. SWMM versión EPA con el funcionamiento similar al MIKE, sin embargo, la versión EPA es de uso libre.



Finalmente otro software útil para estos fines es el FLO – 2D, el cual es un modelo hidráulico a probado por FEMA y tiene costo por adquisición. Es un modelo de tránsito de avenidas que simula ríos, abanicos aluviales, zonas urbanas y costeras. Este modelo es una combinación de modelación hidrológica e hidráulica por lo que no es necesario separar lluvia de escurrimiento. Para realizar la simulación será necesario hacer uso de información topográfica de las calles, esto puede ser obtenido de estudios de sistemas de drenaje.

En general, para la evaluación del análisis hidráulico en la zona urbana se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- El tirante del agua
- La velocidad
- La permanencia de la inundación
- La aportación sólida

Con lo anterior es posible elegir el criterio y software a utilizar de acuerdo con las condiciones particulares de cada zona y así determinar la afectación en la dinámica de la ciudad. Por ejemplo, el FLO – 2D, debido a su concepción permite la evaluación de los parámetros antes mencionados.

3.4.5 Procesos de socavación y sedimentación

Los procesos erosivos y de sedimentación provocan daños como lo es la reducción de la productividad del suelo, pérdida y degradación de la tierra, sedimentación de embalses, sedimentación en zanjas de drenaje y canales, así como daños a la infraestructura hidráulica. Los daños de mayor interés para esta investigación son los ocasionados en la infraestructura que se encuentra circundante o dentro del cauce así como la modificación en la capacidad de conducción del mismo. La primera afectación por socavación y la segunda por sedimentación.

Todo aumento de la velocidad o la turbulencia produce socavación. Las avenidas extraordinarias pueden poner en riesgo la infraestructura presente en cauces, por lo que puede ser un factor decisivo para que se agrave una emergencia debida a una avenida extraordinaria, es por ello que la socavación es un factor a tomar en cuenta en el presente análisis. La erosión puede desestabilizar la estructura en su totalidad si la socavación se acerca a la cimentación de la obra hidráulica. De igual forma, un nivel de inundación puede afectar un cauce debido a que podría causar socavación en el fondo de éste, lo cual comprometería las secciones superiores del talud y podría provocar el desplome de las mismas.



Es por lo anterior que en este apartado se debe revisar el diseño estructural de la cimentación de la obra poniendo especial atención a la fecha de construcción y de reparaciones que se hayan hecho en ella, así como niveles de cimentación e históricos de inundación. Lo que se pretende es analizar el comportamiento que han tenido las estructuras y cimientos en busca de evidencias de daños e investigar razones de las reparaciones.

Consecuentemente se requiere determinar la profundidad de socavación relacionada con el evento extraordinario estudiado, para lo cual existen métodos como el de Lischtván - Levediev, para revisar este método se recomienda a Maza (1987). Con lo anterior se tendrán los elementos para analizar el comportamiento de las estructuras y el cauce.

Ahora, la modificación en la capacidad hidráulica de un cauce se puede ver afectada debido a que tanto éste como sus respectivas llanuras de inundación están compuestos por sedimentos no consolidados que se erosionan rápidamente durante inundaciones y crecidas de agua. Si durante una inundación el río acarrea sedimentos algo gruesos, éstos tienden a ser depositados a lo largo del fondo del cauce provocando la formación de un dique natural. Ello puede llevar a que el fondo del cauce aumente y por lo tanto los niveles de agua, representando así un potencial de inundación mucho mayor.

Un caso muy peculiar que puede aumentar el riesgo de inundación es un evento que puede ser tanto natural como inducido, este es el deslizamiento de tierra. En este caso aumenta la cantidad de sedimentos a ser transportados por el río disminuyendo la capacidad hidráulica o en el caso más desfavorable, se obstruiría el cauce. Los sedimentos de estos eventos pueden ser depositados. Para la apreciación del proceso de sedimentación resulta útil la llamada Relación o Balanza de Lane, propuesta por este autor en 1955.

La Relación de Lane involucra cuatro variables, las cuales son el gasto sólido, el gasto líquido, la pendiente y el diámetro característico del material sólido de fondo (Rocha, 1998). Lo más difícil de determinar en esta relación es el gasto sólido, sin embargo se puede hacer uso de métodos como el de Einstein o Meller-Peter-Müller para este fin, de igual forma se puede revisar a Maza (1987) en este rubro. Con la ayuda de la relación de Lane se puede determinar por ejemplo algún cambio en la pendiente o en la geometría de la sección que haya afectado o influido en el evento extraordinario que se estudia debido al proceso de sedimentación.



3.4.6 Influencia de los niveles del mar

Antes de mencionar la influencia de los niveles del mar, es apropiado mencionar algunos conceptos importantes para entender el concepto integralmente. El fenómeno natural de las mareas está identificado por las oscilaciones periódicas del nivel del mar que resultan de la atracción del Sol y de la Luna sobre las partículas líquidas de los océanos. La relación de las mareas con el principio de gravitación universal ha permitido definir las cuantitativamente y sus resultados se reflejan en las tablas de mareas. Los tipos de marea según la altura de la misma son la marea alta o pleamar, que es cuando el agua del mar alcanza su nivel más alto dentro del ciclo de las mareas y el otro tipo es marea baja o bajamar, que representa el nivel más bajo del agua del mar dentro del ciclo de las mareas. Se producen dos pleamares y dos bajamares por día lunar, porque al mismo tiempo que la Luna eleva el agua sobre la Tierra en el lado que mira hacia ella, también separa la tierra del agua en el lado opuesto. El resultado es que el agua se eleva en dos lados diametralmente opuestos del planeta.

No obstante, a pesar de que el Sol y sobre todo la Luna son factores fundamentales en la formación de mareas, se debe saber que otros fenómenos atmosféricos como el viento provocan también variaciones del nivel del mar. Así pues, la sobreelevación del nivel del mar puede actuar como factor para agravar una inundación sucedida en territorio interno cercano relativamente a la costa o bien ser la causante de una inundación costera. Desde cualquiera de los dos enfoques, deben ser estudiados los niveles del mar tanto históricos como asociados con el fenómeno. De acuerdo con USACE (2008c), la sobreelevación del mar puede ser por tres tipos diferentes (además de la marea astronómica):

- Rompiente de oleaje. La acumulación de agua en la línea costera por rompiente de oleaje ocurre cuando se rompe el equilibrio entre el movimiento superficial y el retorno del fondo marino. La masa de agua, al romper la ola, se vuelca sobre la costa. En condiciones habituales se produce un efecto de cascada por la pendiente del fondo y las aguas regresan al mar, pero si vientos muy intensos generaron olas de grandes dimensiones, la velocidad en superficie es mucho mayor y el agua penetra tierra adentro. El proceso continúa hasta que el oleaje se amortigua. Son favorables las costas acantiladas, de pendientes muy abruptas y con presencia de obstáculos que deforman la dinámica de las aguas.
- Arrastre del viento. Para este tipo de sobreelevación del mar son favorables las costas de pendiente muy suave acompañadas por una amplia plataforma de fondo casi plano. La acumulación de agua en la costa se produce cuando la velocidad del movimiento generado por el viento en superficie es tal que se rompe el equilibrio habitual de desagüe por la



corriente de fondo. El avance de la masa de agua se prolonga tierra adentro y solo comienza a amortiguarse cuando disminuye la velocidad del viento.

- Marea de tormenta. Es una deformación de la superficie marina que acompaña a las circulaciones ciclónicas. Es una onda larga generada al paso de la tormenta, que provoca una elevación anormal del nivel del mar sobre la marea astronómica y es causada por una combinación de la convergencia de los fuertes vientos con el efecto del gradiente de la presión atmosférica. Al desplazarse hacia la costa, la altura de la marea de tormenta se incrementa notablemente al sufrir el efecto del fondo marino. A la vez que la marea de tormenta, ocurren sobreelevaciones por la acción de las olas y del arrastre del viento. La resultante final es una sobreelevación de varios metros que puede generar peligrosas inundaciones costeras por penetración del mar.

Los tres tipos de sobreelevación pueden ocurrir de forma combinada, aun ello, predomina uno u otro en dependencia de la configuración costera.

Para el análisis de este factor, se debe contar con información del fenómeno que provocó el aumento de los niveles del mar, los propios niveles del mar medidos antes y durante el evento y la extensión y duración de la inundación costera. Ello dará la pauta para analizar su combinación con otros factores. La inundación costera se puede ver involucrada principalmente en el hecho de obstruir el escurrimiento natural hacia el mar, así como en el desagüe de sistemas de drenaje, además claro, de sus respectivas afectaciones en la zona costera.

3.5 Integración de los análisis hidrológicos e hidráulicos con otros factores

Al llegar a esta etapa de la guía metodológica ya se han realizado todos los análisis pertinentes, tratando de tomar en cuenta la mayoría de los factores posibles y verificando la influencia de ellos en el evento de inundación. Es en este apartado donde se deben integrar todos los análisis anteriores para así realizar un solo análisis conjunto principalmente de todos los factores involucrados en la inundación y a éste sumarle los factores mencionados en la parte de recopilación de la información, esto es, los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo, grado de marginación de la población, manejos de los desechos, entre muchos otros. Sería idílico pensar que se tiene en consideración todos los elementos actuantes. Es por ello que a consideración del analista se debe agregar todo aquel elemento que aquí no se haya mencionado y se crea tenga alguna influencia sobre el caso particular de inundación.



Con lo anterior se pretende identificar cuáles de estos factores fueron los fundamentalmente determinantes para que se presentara la eventualidad o bien ésta se viese agravada. Además es conveniente jerarquizarlos, pues así se tendrá un medio más eficiente para establecer objetivamente las causas, los efectos de la inundación así como proponer acciones que ayuden a minimizar el riesgo de un evento similar en el futuro.

Se debe tener en cuenta que a lo largo de todos los análisis se ha tenido un carácter estático, por lo que el aspecto dinámico de los factores externos actuantes será difícil de evaluar. Es importante recordar que no existen sistemas aislados sino en relación dinámica con otros elementos de un ambiente circundante, por lo que si se logra un adecuado acoplamiento de cada uno de los factores analizados será posible tener un acercamiento a la realidad de lo sucedido minimizando la incertidumbre.

3.5.1 Generación de mapas de inundación teóricos y comparación con los reales

Un mapa de inundaciones es el que demarca la intersección de los niveles del agua con la superficie del terreno correspondiente a caudales de interés. De esta manera se pueden delimitar las áreas que tienen diferentes niveles de riesgo y prohibir o restringir la ocupación o el uso de los terrenos que tienen altos niveles de riesgo.

En la presente guía propuesta se ha hecho hincapié en la utilización de software especializado, es por ello que para la generación de los mapas de inundación se proponen principalmente un procedimiento automático y cuasi-automático, aun ello se hará mención de un procedimiento manual.

El proceso automático se cumple mediante la aplicación del software FLO – 2D, pues como ya se ha mencionado, lleva a cabo en forma acoplada la modelación hidrológica e hidráulica, hasta escalas a nivel de calles, con lo que la generación de mapa de inundación será uno de sus principales resultados. Así pues, la generación de mapas de inundación utilizando de forma acoplada las herramientas de modelación hidrológica e hidráulica recomendadas en conjunto con el software para el SIG, será el procedimiento cuasi-automático. El software recomendado para lo anterior fue, Arc-View para el SIG, HEC-HMS para la modelación hidrológica y HEC-RAS para la modelación hidráulica. Se debe llevar a cabo la integración externa entre ellos para el intercambio de información, cada uno de los modelos opera de forma separada y utiliza como entradas los resultados del modelo previo. Es sabido que los tipos de modelación se realizan de forma separada, con lo que se incrementan los errores debidos a la manipulación y transferencia de la información y se limita la capacidad del modelo acoplado para pronosticar niveles de inundación, pero



ciertamente si cada uno de los modelos son aplicados de forma adecuada los errores serán menores que mediante un procedimiento manual.

Entonces, la generación de los mapas de inundación en específico para el modo cuasi – automático será a través del siguiente procedimiento, incluyendo en éste, procedimientos anteriores que para esta parte de la guía ya habrán sido realizados: con el software Arc-View se genera el MDE y se obtiene el mapa topológico de las cuencas en formato HMS usando GeoHMS, en forma alterna y una vez más con el MDE y topografía a detalle se obtiene el alineamiento de los cauces y características de los hombros y secciones transversales haciendo uso de GeoRAS. Con el modelo en Hec-HMS se obtienen los gastos, siendo estos el insumo para el modelo en HEC-RAS. Una vez hecha la simulación con HEC-RAS se obtienen los niveles de inundación en las secciones transversales, finalmente estos niveles se exportan a GeoRAS en donde se procesa y se combina la información geográfica e hidráulica para generar la delimitación en planta de los mapas de inundación.

El procedimiento manual se realiza con los niveles obtenidos de la modelación hidráulica se obtiene una diferencia de altura de agua y el MDE, esto a través de programas CAD.

Una vez generados los mapas de inundación tanto reales como teóricos, se analizan las diferencias que ellos presentan, tratando de localizar zonas con mayor problemática y relacionándolas con todos los factores ya analizados anteriormente y así establecer una relación entre dichos factores y las zonas de inundación obtenidas. Los mapas de inundación teóricos servirán como elementos para la delimitación de las zonas de riesgo en forma generalizada y el mapa de la inundación estudiada servirá para la delimitación de las afectaciones que se hayan presentado. Lo anterior permitirá establecer objetivamente las causas principales para que el evento se presentara con tal magnitud.

3.5.2 Análisis de la afectación en asentamientos humanos

Las amenazas naturales restringen el uso del territorio. Cada municipio debe tener en cuenta las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas de riesgos naturales, señalando y localizando perfectamente las áreas de amenazas para asentamientos humanos. La administración municipal debe prestar especial atención al aspecto del ordenamiento urbano, ya que los problemas de inundación se vuelven más graves en las zonas urbanas, debido a la insuficiente capacidad de desagües en las redes de drenaje o por la localización de asentamientos e infraestructura en zonas que corresponden a la llanura de inundación. Es por lo anterior que los planes de ordenamiento territorial son importantes para el análisis que aquí se pretende, puesto que ellos determinarán si los asentamientos son regulares o no, además de vislumbrar las afectaciones que se pudieran evitar si éstos son ejecutados correctamente. El estado en coordinación con los municipios tiene bajo su responsabilidad la planificación territorial y determinación sobre usos del suelo, la formulación e



inclusión de estrategias de prevención y mitigación en todas las acciones de planificación urbana, entre otros aspectos. Por lo menos cada trienio para el caso de México, se tendrán disponibles nuevos planes de desarrollo urbano que podrán ser consultados.

El análisis de la afectación en asentamientos humanos incluye la determinación de las pérdidas económicas que en éstos se tienen, como lo es en viviendas, empresas y comercios, infraestructura, áreas de cultivo, vías de comunicación y actividades económicas. Sin embargo, la metodología a seguir en este segmento se ajusta solo a la contabilización de los bienes afectados sin entrar en materia de costos, puesto que la economía no es línea de investigación de esta tesis, sin embargo, cabe mencionar que el siguiente paso que corresponde a la cuantificación de costos de estas afectaciones resulta relativamente fácil pues a cada uno de los rubros se le puede asignar un valor, de acuerdo con lo que las autoridades competentes para cada uno de ellos establezca.

Una vez determinados los niveles que se presentaron en las zonas urbanas de acuerdo con el modelado hidráulico, se puede determinar el porcentaje de daño que se presenta en cuanto a lo siguiente:

A) Daños directos

Se debe clasificar el tipo de vivienda de acuerdo con algún criterio que tome en cuenta los materiales usados en muros y techos, así como el nivel socioeconómico promedio de las familias que habitan la zona. Por ejemplo, en México, las metodologías del CENAPRED (Domínguez *et al.*, 1994) proponen la siguiente clasificación:

Tipos de vivienda	Características
Tipo I	Hogares más humildes
Tipo II	Hogares clase baja, viviendas de autoconstrucción
Tipo III	Hogares clase baja, viviendas de mejores materiales
Tipo IV	Hogares clase media, viviendas equiparables con interés social
Tipo V	Hogares clase media-alta, viviendas tipo residencial

Tabla 3.4 Resumen de tipos de vivienda y sus características.



- Infraestructura general

En cuanto a la infraestructura en general, como lo son las empresas y comercios, unidades de salud y educativos, entre otros, se debe llevar a cabo la estimación del porcentaje de equipamiento afectado en cada uno de ellos, además del porcentaje de daño a la estructura, de acuerdo con los niveles de inundación, esto principalmente puede ser referido de la información recolectada sobre estos rubros así como de investigaciones de campo.

Si se habla de daños en comercios así como en empresas por inundaciones, es difícil establecer una forma práctica de evaluar considerando como criterio los niveles del agua, puesto que por ejemplo, para los primeros, dichos daños varían con respecto a los artículos con los que cuente cada comercio. Usualmente los comercios constituyen una especie de bodega, donde su mayor capital se encuentra en la mercancía que se tiene resguardada en el interior, es por ello que los daños pueden ser tan variables hablando de un mismo nivel de inundación. En cuanto a los segundos, el valor de la empresa puede hacerse a través de la estimación de la equivalencia de su patrimonio, haciendo énfasis en el componente activo, o sea los bienes del propietario de la empresa. Normalmente las empresas hacen uso de seguros los cuales cuentan con cobertura para daños por inundación que coinciden con lo dicho anteriormente, pues incluyen solo los bienes materiales. Así es como de la misma forma que para los comercios, es difícil una guía general para la evaluación de daños en empresas sin embargo si se puede llevar a cabo esto tomando en cuenta del tipo de empresa y los daños materiales que se contabilicen en ella.

En el caso de unidades de salud, las inundaciones afectan por igual tanto a establecimientos grandes como pequeños, desde hospitales hasta centros que brindan atención primaria de salud; pero es precisamente la infraestructura de salud de menor complejidad la que generalmente resulta más afectada. El daño está estrechamente relacionado con las características de construcción (materiales empleados y calidad técnica de la obra) así como con su equipamiento.

Los daños se pueden listar como sigue:

- La edificación de los establecimientos: hospitales, centros de salud, consultorios, centros de apoyo al diagnóstico (laboratorios, bancos de sangre, etc.), clínicas, dispensarios y puestos de cuidados rurales o urbanos del sistema de salud del país, sean públicos, privados, de la seguridad social, de las fuerzas armadas o policiales, etc.
- El abastecimiento de servicios básicos a las edificaciones de salud
- Las oficinas del sector salud y las que brindan el soporte administrativo al sistema
- Los equipos y los suministros de uso del sector salud
- Las reservas de medicamentos y de vacunas



- El mobiliario, material básico y las unidades de transporte.

Más específicamente, en cuanto a las edificaciones se tiene que se pueden presentarse los siguientes efectos por inundación dependiendo del tipo de construcción de que se trate:

Tipo de construcción	Efecto
De concreto armado, con diseño sismorresistente	Posible debilitamiento de la cimentación por asentamientos diferenciados, socavación y erosión. Fisuras en muros y columnas.
De mampostería de ladrillo, albañilería	Debilitamiento de la cimentación por asentamientos diferenciados, socavación y erosión. Fisuras o grietas en muros y columnas por asentamientos diferenciales del terreno, desprendimiento de acabados.

Tabla 3.5 Efectos según tipo de construcción en unidades de salud.

Fuente: OPS, (2006).

Es así como aunque no es fácil establecer el impacto que produce una inundación en el sector salud, se puede contabilizar con lo anterior, las pérdidas generadas por esta causa.

Las unidades educativas, casi en su totalidad, poseen bibliotecas, museos, áreas administrativas y aulas en donde se almacenan mapas, libros, equipos, audiovisuales y materiales educativos al nivel del piso, ello hace que sea aquí donde se presentan las mayores pérdidas.

- Infraestructura civil y vías de comunicación

En los que respecta a las vías de comunicación es muy común que los daños sean por baches, fisuras (piel de cocodrilo), entre otros defectos en la superficie de rodamiento. Pero si se habla de vías de comunicación que están cercanas y principalmente paralelas a los cauces, el daño puede ser mayor, desde socavar parte de los cimientos de las vía hasta la destrucción total en el tramo. Se debe cuantificar los tramos destruidos o afectados para cada uno de los tipos de vías, ya sean carreteras, caminos rurales, vías férreas, puentes vehiculares y peatonales, etc.

En cuanto a la infraestructura civil se debe realizar una cuantificación de ellas para después jerarquizar la importancia de cada una de éstas y en ese orden de importancia llevar a cabo la



investigación en campo. En las investigaciones de campo se debe evaluar las condiciones normales de la obra, los componentes, estado de mantenimiento y operatividad y finalmente los daños.

- Áreas de cultivo

Para la determinación de las áreas de cultivo afectadas, se debe recordar que los daños se tendrán si se tienen más de tres días de inundación o bien una humedad permanente del suelo superior al 25% del peso en tierra, por lo que una vez valorados estos parámetros, se procede a calcular la extensión afectada. Es importante resaltar que las áreas de cultivo dañadas no cuantifican pérdidas por producción de la cosecha sino como problema para siembras futuras, sin embargo las compañías aseguradoras cuantifican como pérdidas básicamente las áreas afectadas y no la producción.

El contenido de humedad del suelo puede variar ampliamente en función del tiempo, mientras que el peso seco es constante a través del tiempo, por lo que para calcular la humedad del suelo (porcentaje de humedad relativa) se podría hacer uso de análisis de laboratorio de mecánica de suelos.

- Actividades económicas
 - Actividad ganadera. Como ya se mencionó en este trabajo, el nivel que puede causar afectaciones en la actividad ganadera va desde 0.2 m hasta 1.2 m, dependiendo del tipo de animal que se tenga en producción, por lo que de acuerdo con dicha clasificación se pueden cuantificar los daños asociados con el nivel de inundación presentado, por supuesto, esto complementado con información recolectada y de campo sobre este tipo de actividades económicas.
 - Acuicultura. Esta actividad requiere de ciertos cuidados para su producción, por ejemplo, el sitio para el cultivo de los peces debe contar con características específicas de temperaturas, corrientes y profundidades dependiendo del cultivo que se trate, también el alimento de los peces debe almacenarse en áreas secas y frías para prevenir su daño, crecimiento de hongos o contaminación. Entonces, desde la perspectiva de inundaciones, los daños que se contabilizarán en esta actividad serán principalmente por cosechas dañadas cuando la intrusión de agua haya llegado hasta los sitios de cultivo, así como en mobiliario e insumos.



B) Daños indirectos

- Flujo de bienes y servicios

El sistema de economía está compuesto principalmente por tres elementos, la familia, las empresas y el estado. Las familias son las propietarias de los factores productivos que ellas mismas entregan a las empresas con lo que reciben a cambio rentas, mientras que las empresas utilizan estos factores productivos para producir los bienes y servicios que las familias demandan; los intercambios entre familias y empresas se producen en los mercados de bienes y servicios. El estado funciona principalmente como regulador del sistema.

Por lo tanto, uno de los principales proveedores para el flujo de bienes y servicios es la actividad laboral (familias), por lo que el ausentismo en esta actividad podría representar el inicio de la cadena de grandes pérdidas económicas.

Los tiempos muertos en la población se pueden obtener una vez que se tienen los niveles de inundación y su extensión, se determinará la cantidad de personas afectadas y de ellas cuantas entran dentro de la clasificación de personas ocupadas y el horario promedio de trabajo, todo esto con información sobre la población. En México, el INEGI cuenta con bases de datos disponibles como lo es el ITER 2005(www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/iter2005), en su versión más reciente, el cual es un archivo que está conformado de un registro por localidad con los datos de identificación geográfica incluyendo longitud, latitud, altitud y 121 indicadores con las características de la población, los hogares y las viviendas.

En cuanto a los servicios, es importante resumir las actividades más sobresalientes de los sectores más activos en la zona del estudio así como con cuáles de ellos se cuenta (energía eléctrica, agua potable y alcantarillado, telefonía, televisión, internet, entre muchos otros), para así llevar a cabo la cuantificación del daño en cada uno de dichos servicios.

C) Daños económicamente intangibles

Las inundaciones pueden causar un número inesperado de muertes, lesiones o incremento de las enfermedades transmisibles en la comunidad afectada así como el incremento en el riesgo de trastornos psicológicos en la población. No son fáciles de establecer los efectos secundarios que se producen por un desastre de esta naturaleza, sin embargo los efectos directos son viables a su cuantificación, de acuerdo con la siguiente clasificación, que generalmente el sector salud y protección civil tendrán muy bien localizados.



- Damnificados
- Heridos
- Pérdidas humanas

Se propone un formato para la evaluación de daños de una zona afectada, como asistencia para la recopilación de la información en campo. Ver *Anexo 1. Ejemplo de Formato general para la cuantificación de afectaciones*. En complemento con éste es recomendable crear un inventario y así trasladar esta información al SIG para comparar las zonas inundadas que proporcionó el mapa de inundación con las ubicadas por investigaciones en campo. Es importante mencionar que la estimación de los daños por inundación es una zona es de alta importancia pues con ellos se puede establecer un plan de medidas de restauración y por supuesto de mitigación. Una aproximación rápida y apegada a la realidad de las pérdidas después del evento, es de gran utilidad para asignar recursos orientados a la prevención, recuperación y reconstrucción de las zonas afectadas.

3.5.3 Manejo de la emergencia

El manejo de la emergencia comprende desde las acciones que anteceden a ella hasta la atención inmediata a la población e infraestructura durante el desastre. En la parte de recopilación previamente establecida, se hace énfasis en agrupar dicha información de acuerdo con las acciones de previsión y alerta así como las acciones de atención a la población durante la emergencia.

Las acciones de previsión y alerta se pueden resumir prácticamente en programas a diferentes niveles y áreas, esto es: programas a nivel social y de instituciones para la difusión y conocimiento de la población ante los riesgos a los que están expuestos; programas principalmente de los gobiernos federal y local, debido a que en ellos recaen las funciones de protección civil estatal y municipal; y entre otros más, los programas para el monitoreo de eventos que pongan en riesgo a la población, conocidos como sistemas de alerta temprana.

Las acciones de atención a la población durante la emergencia podrían convertirse en el eje de todos los procedimientos planteados a realizar ante una emergencia, pues todo lo que se haga debe estar fundamentado en la protección y salvaguarda de la población, más allá de pérdidas económicas. Las acciones son el resultado de la planeación y lo proyectado en los programas, por lo que para la reducción del impacto durante el desastre se debe asegurar una adecuada preparación.

La revisión de este rubro debe estar enfocada a los programas con lo que cuenta la zona estudiada, específicamente dirigido al grado de avance, eficiencia y legitimidad en la ejecución de ellos, pues de la correcta aplicación de estos programas depende el éxito en los objetivos que en cada uno de ellos hayan sido planteados. Si los programas analizados no fueron ejecutados según lo planeado, e



identificando la causa para que ello sucediera, esto puede convertirse en un factor determinante para la magnitud del impacto del desastre.

En México se cuenta con el Sistema Nacional de Protección Civil (SNPC), el cual lleva a cabo los subprogramas de Prevención, Auxilio y Recuperación, que precisamente son las tres partes esenciales para el manejo de emergencias pues considera el antes, durante y después de ella. Las actividades son distribuidas entre las instancias responsables, por lo que el nivel de actuación tanto material como financiero durante la emergencia está jerarquizado de la siguiente forma (DGPC, 2006):

Emergencia => La primera autoridad que toma conocimiento de la situación de emergencia presta ayuda inmediata a la población e informa a las instancias especializadas de protección civil => La autoridad municipal o delegacional de protección civil (primera instancia de actuación especializada) auxilia a la población de acuerdo con su plan de emergencia => Si la autoridad municipal o delegacional de protección civil ve superada su capacidad de respuesta pide apoyo a la instancia estatal o al Gobierno del Distrito Federal, según corresponda => Las instancias estatales o del Gobierno del Distrito Federal apoyan a la instancia municipal o delegacional en el auxilio a la población de acuerdo con sus planes de emergencia => Si la instancia estatal o del Gobierno del Distrito Federal ve superada su capacidad de respuesta pide apoyo a la instancia federal => La instancia federal apoya a las entidades federativas, municipios o delegaciones en el auxilio a la población, de acuerdo con los programas y planes de emergencia establecidos al efecto => El Presidente de la República, de forma directa o por intermedio de la Secretaría de Gobernación podrá emitir un llamado de ayuda internacional, a través de la Secretaría de Relaciones Internacionales o de medios de comunicación => Corresponde al Consejo Nacional de Protección, por conducto de la Secretaría de Relaciones Exteriores, determinar los criterios para el cumplimiento de los acuerdos internacionales en materia de protección civil, así como las modalidades de cooperación.

Así mismo, el SNPC cuenta con dos instrumentos financieros que tienen el enfoque de la prevención, el primero de ellos es el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), donde lo que se busca es financiar estudios y proyectos orientados a la identificación del riesgo, también tiene como obligación realizar acciones de mitigación y reducción del riesgo, así como el fomento de la cultura de la prevención y la protección. El segundo instrumento financiero es el Fideicomiso Preventivo (FIPREDEN), el cual proporciona recursos a las dependencias, entidades federativas para la realización de acciones preventivas o programas, entendiéndose por éstas todas aquellas obras públicas, adquisiciones y servicios que sean necesarias y urgentes.



Finalmente dentro de los tres puntos relacionados con la atención a la emergencia resta para el SNPC la reconstrucción o el después de la emergencia. Para ello cuentan con el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) que es una herramienta financiera compuesta por varios instrumentos y operado por diversas instancias del Gobierno Federal para la atención a los daños causados por un fenómeno natural imprevisible y determinado, cuya magnitud supere sus capacidades de atención y de respuesta. Otro es el Fondo Revolvente que independiente del FONDEN tiene por objeto proporcionar recursos económicos extraordinarios a la Secretaría de Gobernación para que le proporcione a las entidades Federativas suministros de auxilio ante situaciones de emergencia y de desastre generadas por un fenómeno natural. El fin de estos fondos es la atención de manera inmediata de las necesidades urgentes de la población relacionadas con la vida, la salud, alimentación, atención medica, vestido, albergue temporal, así como rescate de personas de las zonas de riesgo.

De igual forma, CENAPRED lleva a cabo su labor de prevención de desastres mediante un Sistema de Alerta Temprana (SAT) con diferentes niveles de alerta. Se comenzaron a instalar redes de medición y sistemas de pronóstico de inundaciones en algunas ciudades del país en 1998. Estos trabajos se realizan conjuntamente con la Comisión Nacional del Agua y con los gobiernos estatales y municipales. Actualmente se encuentran instalados en las ciudades de Acapulco, Guerrero, Tijuana, B. C., Tapachula y Motozintla, Chiapas, Monterrey, N. L., y Villahermosa, Tabasco. En el futuro se piensa instalar nuevos sistemas en el río de La Compañía, Estado de México, en varios ríos del norte de Veracruz, y en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Como parte del sistema de SAT, se tiene el Sistema de Alerta Hidrometeorológica (SAH), el cual está basado en el tiempo que se tiene antes de la ocurrencia de un evento peligroso, como puede ser el desbordamiento de un río o arroyo, cuando apenas está iniciando una tormenta. Dicho tiempo se logra obtener gracias a la instrumentación que los científicos han hecho de diversas formas: satélites ambientales, radares meteorológicos, pluviómetros, etc. Adicionalmente se analiza el comportamiento de los escurrimientos en las cuencas donde se tiene un SAH, con lo que se puede estimar con un buen grado de precisión los posibles escenarios de peligro ante inundaciones que pueden llegar a presentarse y afectar una comunidad. Los diferentes niveles de alerta son (http://www.esalud.gob.mx/wb2/eMex/eMex_Inundaciones.cts):



Figura 3.1 Niveles de alerta para la prevención de desastres de fenómenos hidrometeorológicos.

Tomada de www.essalud.gob.mx.

A nivel mundial existen innumerables organizaciones humanitarias, por lo que además de la ayuda que pudiera llegar de otros gobiernos, también se harían presente estas organizaciones que generalmente acuden sin fines de lucro y solo por el afán de ayudar. Son estas mismas organizaciones las que algunas veces cuentan con más información, tanto geográfica, estadística y social sobre eventos históricos de desastres naturales, más aun que los propios gobiernos que lo sufrieron, aplicable ampliamente en países en vías de desarrollo. Algunas de estas organizaciones son la *Red de Información Humanitaria para América Latina y el Caribe* y *Dartmouth Flood Observatory*.

3.5.4 Análisis de resultados del evento actual y comparación con eventos precedentes de magnitud similar

Para el análisis final de los resultados, se deben organizar cada una de las etapas. La primera etapa del estudio fue basada en cuestiones meramente técnicas, incluyendo ahí la integración de los análisis hidrometeorológicos, hidrológicos, e hidráulicos. Dentro de esta primera etapa se debió haber definido ya el funcionamiento natural de la cuenca, mediante su ubicación y forma, entre otras características, de la misma manera se deben haber identificado las incidencias de los fenómenos meteorológicos, por zonas y temporadas. El análisis probabilístico de frecuencias así como el establecimiento de periodos de retorno asociado con los registros de precipitación y gastos, es una parte fundamental del análisis hidrológico, pues de estos procedimientos resultará la información en la que se soportaron los diseños de obras hidráulicas y con ello la medida del riesgo que se aceptó en cada una de ellas, así como la relación del evento ocurrido con lo anterior determinado. Finalmente, se termina la primera etapa con las modelaciones tanto hidrológicas



como hidráulicas, tomando en cuenta en esta última, la socavación y sedimentación así como la influencia de los niveles del mar en el funcionamiento hidráulico del sistema.

En la segunda etapa se debieron analizar aspectos políticos y sociales, habiendo determinado la magnitud del daño mediante la cuantificación de las afectaciones. Esto basado en la situación actual en la que se encontraba la zona antes del desastre. El nivel de aplicación de los planes de desarrollo, ordenamiento territorial, mitigación de riesgos, entre muchos otros, superpuesto a los niveles y extensión de la inundación que causara pérdidas en cualquiera de sus formas, tanto económicas como invaluable. La segunda etapa finaliza con el análisis del manejo de la emergencia, tratando de determinar si la zona que se estudia estaba preparada o no para enfrentarse a un desastre del tipo que aquí se trata.

Todo lo anterior es una caracterización compleja del sistema, integrando todos los elementos y factores que intervienen en él. Se busca con ello llegar de forma más franca a la identificación de los factores que tuvieron un funcionamiento diferente a lo natural o esperado y con ello jerarquizarlos y ponderar el nivel de falla de cada uno. Así se determinará de manera objetiva los factores de fallo y será posible determinar acciones necesarias para mitigar el impacto de fenómenos posteriores que pudieran presentarse.

Con base en el historial de los eventos de inundación y destrucción que han azotado a la zona de estudio, las memorias en medios de comunicación y testimonios personales tanto de los afectados como observadores y autoridades, se debe integrar un documento que permita el análisis en forma rústica, esto es, un análisis muy genérico. Sin embargo si se tienen análisis completos de eventos anteriores sin duda alguna se debe usar. Con esto, es posible realizar una comparación entre estos eventos y el que se está analizando actualmente con la finalidad de encontrar factores de influencia recurrentes para la presentación de eventos de inundación en la zona de estudio con magnitudes similares o en un rango de asociación. Ello dará la pauta para poder aseverar si las acciones estructurales y no estructurales han sido aplicadas adecuadamente a lo largo de la historia de la zona de estudio o resulta necesario la aplicación de otras acciones no contempladas anteriormente.

3.5.5 Conclusiones y propuestas o sugerencias

Son muy pocos los casos en los cuales es posible solucionar los problemas de inundaciones de forma permanente. Algunas de las razones más importantes que no permiten la solución son el costo de las obras, los conflictos socioeconómicos de las regiones que conllevan intereses en el uso de la tierra y la escasa factibilidad económica de este tipo de proyectos. Por esta razón se utilizan los términos Control de Inundaciones o Mitigación de los Efectos por Inundaciones para indicar que estos proyectos tratan de prevenir daños mayores y ofrecen protección hasta un cierto nivel de riesgo. Es



inevitable que el control y la mitigación de los efectos por inundaciones sean anteceditos por un análisis integral de los eventos que acontecieron en el pasado en una zona, ello dará las pautas para focalizar acciones necesarias y lograr los alcances proyectados.

Es por lo anterior que los SIG y software especializados en la actualidad, son la herramienta ideal para el estudio detallado de este tipo de fenómenos pues permiten obtener resultados objetivos con los cuales es posible planear estrategias de atención. De aquí que en el tema del análisis de los peligros en la prevención de desastres, así como la creación de bases de datos, con información detallada, sirvan para estudios tan complejos como el que se propone en esta tesis, que en determinado momento pueden superponerse y hasta combinarse.

Para reducir los factores que influyen en la magnitud del impacto por inundación hay que articular el nivel local con el nivel regional. Las causas y los efectos relacionados con la vulnerabilidad de una zona van más allá del ámbito local. De la misma manera, las acciones correctivas y prospectivas deben tener una aplicación a nivel de cuencas. La coordinación entre los niveles de gobierno implica acciones de articulación y consistencia de proyectos. Para la implementación del enfoque de mitigación del impacto de desastre por inundación es determinante la coherencia entre los planes municipales, estatales y regionales, la cual permite tener una visión integral del territorio.

Es importante considerar la aplicación de medidas estructurales y no estructurales para los proyectos, resultado del análisis forense de inundaciones. En relación con las medidas estructurales se pueden realizar acciones como el refuerzo de estructuras existentes, reubicación de viviendas, de infraestructura o centros de producción ubicados en zonas de amenaza.

Las medidas no estructurales pueden ser activas o pasivas. Las medidas activas son aquellas que promueven la interacción directa con las personas, como la organización para atención de emergencias, el desarrollo y fortalecimiento institucional, la educación formal y capacitación, las campañas de difusión, la participación comunitaria y la gestión a nivel local. Las medidas pasivas están más relacionadas con la legislación y la planificación: normas de construcción y expedición de códigos de construcción, reglamentos de uso de suelo, estímulos fiscales y promoción de seguros. No requieren de significativos recursos económicos y, por tanto, son muy propicias para consolidar los procesos proyectados para la mitigación de efectos por inundaciones.

Concluyentemente se propone una serie de acciones de acuerdo con el factor influyente en la magnitud del desastre analizado, ésta no es una lista limitativa, además de que cada una de las acciones puede ser combinada con cualquier otra, siempre buscando minimizar los impactos por inundaciones.



Factores fisiográficos naturales

Debido a que se trata de factores netamente naturales, la principal acción es aprender a vivir con ello, esto es:

- Implementar todas las medidas necesarias para que la población tenga el conocimiento suficiente del nivel de riesgo en el que se encuentra e informar cómo actuar en caso de emergencia.
- Proyectar la construcción de obras civiles estratégicamente ubicadas, como presas para el control de avenidas, encauzamientos y actuaciones fluviales, de seguridad y vigilancia.

O bien, generar comunidades autosustentables y programas de reubicación de localidades en riesgo. Las comunidades bien ubicadas y con posibilidades de progreso y mejor estilo de vida será un estímulo para la migración de esas poblaciones en riesgo.

Factores fisiográficos artificiales

- Vigilar el cumplimiento de políticas de operación de las presas.
- Desarrollo de reglas de operación para las presas, además de ser publicadas para obligar a que sean cumplidas estrictamente.
- Evaluación de la seguridad de las presas existentes, priorizando los planes para eliminar las presas inseguras.
- Aplicar estrategias para reducir la velocidad y volumen de los escurrimientos, la restauración de los humedales y los meandros de los ríos, y frenar el escurrimiento urbano con nuevos desarrollos ecológicos en comunión con el ambiente.

Factores hidroclimáticos

- Coordinar con las entidades científico-técnicas que tengan a su cargo la identificación de peligros, análisis de las vulnerabilidades y estimación de riesgos para adoptar las medidas de prevención más efectivas.
- Desarrollar e implementar sistemas de alerta temprana para que las autoridades competentes puedan tomar decisiones y la población pueda ponerse a salvo a tiempo.
- Trabajos de conservación de suelos y cuencas, esto es, reforestación y ordenación y rotación de cultivos.
- Mejorar los procedimientos de emergencia, posiblemente las medidas más importantes en términos de salvar vidas son las mejoras en el pronóstico de las inundaciones, las alertas y los procedimientos de evacuación.



- Proteger los edificios y zonas más vulnerables. Se deben realizar importantes medidas estructurales para la gestión de las inundaciones que incluyen la adecuación de estructuras individuales (por ejemplo, alzándolas sobre pilares o montículos) y comunidades (por ejemplo, construyendo refugios y fuentes de agua protegidas), construcción de sistemas de almacenamiento y derivación para las llanuras inundables (áreas de tierra con poco o nada de desarrollo que puedan usarse para guardar o desviar las grandes inundaciones), y el uso juicioso de bordos y muros bien mantenidos, donde sean la única opción viable, como para las áreas urbanas vulnerables.

Factores socio-políticos

El municipio tiene como competencias y funciones específicas, compartidas con el gobierno estatal y el federal, asociadas con la disminución de riesgos por desastres naturales como inundaciones, las siguientes:

- Fortalecer el espíritu solidario y el trabajo colectivo, orientado hacia el desarrollo de la convivencia social, armoniosa y productiva, a la prevención de desastres y a la seguridad ciudadana.
- Incentivar a la gente a no vivir en las zonas más vulnerables a las inundaciones. El manejo del área de inundación incluye planificar las reglamentaciones para desincentivar el desarrollo nuevo de esta zona, así como incentivos financieros para las personas que viven en las áreas de mayor riesgo, para que se trasladen a tierras más altas.
- Aprobar el Plan de Desarrollo Urbano, el Plan de Desarrollo Rural, el Esquema de Zonificación de Áreas Urbanas, el Plan de Desarrollo de Asentamientos Humanos y demás planes específicos, de acuerdo con el Plan de Acondicionamiento Territorial.
- Ordenar la clausura transitoria o definitiva de edificios, establecimientos o servicios cuando su funcionamiento infrinjan las normas reglamentarias o de seguridad.
- El Estado tiene la facultad de aprobar el Plan de Acondicionamiento Territorial, que identifique las áreas urbanas y de expansión urbana, así como las áreas de protección o de seguridad por riesgos naturales; las áreas agrícolas y las áreas de conservación ambiental.
- Ejecutar el Plan de Capacitación en Defensa Civil para su jurisdicción y promover las acciones educativas en prevención y atención de desastres. Así como ejecutar y promover acciones de simulacro.

Cualquiera que sea el factor para que la inundación sea un hecho, es altamente recomendable considerar la cultura de la contratación de seguros. En realidad la contratación de un seguro no es ni más ni menos que cubrirse por eventualidades o siniestros, es decir, por lo que eventual y



fortuitamente ocurra. El 90% de la gente tiene asegurado su auto, y aun ello no existe un porcentaje tal de gente que tenga asegurada su casa.

Diagrama de flujo de la guía

Finalmente y basado en la metodología propuesta en esta tesis, se hace un diagrama de flujo de las actividades necesarias para completar el análisis forense de inundaciones. El objetivo del diagrama de flujo es representar gráficamente los procesos necesarios, y aunado a ello permitir la sencilla visualizar de toda la metodología. Para ver el documento es necesario remitirse al *Anexo 2. Diagrama de flujo de la guía metodológica para el análisis forense de inundaciones.*



Capítulo 4: Las inundaciones de 2007 en Tabasco, México, desde la perspectiva de la guía metodológica

Los que se enamoran de la práctica sin la teoría son como los pilotos sin timón ni brújula, que nunca podrán saber a dónde van
Leonardo Da Vinci



4. Las inundaciones de 2007 en Tabasco, México, desde la perspectiva de la guía metodológica

4.1 Contexto general del estado de Tabasco

Tabasco está situado en el sureste del país y cuenta con 2'100,000 habitantes de acuerdo con el conteo del año 2005, distribuidos en 24,738 km². Su capital es la ciudad de Villahermosa. El estado se extiende por la llanura costera del Golfo de México, con una porción sobre la sierra del norte de Chiapas. Colinda, al norte, con el Golfo de México y el estado de Campeche, al sur con el estado de Chiapas, al este con el estado de Campeche y la República de Guatemala y al oeste con el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave.

El estado de Tabasco se encuentra en la región hidrológica No. 30, identificada como Grijalva – Usumacinta. Precisamente es aquí donde confluyen los ríos Grijalva y Usumacinta que son de los más caudalosos en México. El río Grijalva está regulado por un sistema de presas que tienen propósitos múltiples, como la generación de energía y control de avenidas debido a la gran capacidad de algunas de ellas. Las presas del sistema del río Grijalva son, de aguas arriba hacia aguas abajo, Belisario Domínguez (La Angostura), Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Netzahualcóyotl (Malpaso) y Albino Corzo (Peñitas). Los caudales provenientes de la presa Peñitas se bifurcan dando origen a los ríos Samaria y Carrizal. De la sierra de Chiapas se forma un sistema de ríos llamados Ríos de la Sierra que confluyen con el río Grijalva prácticamente en la Capital de Tabasco, Villahermosa. Este sistema de ríos, aunado al río Usumacinta, no cuenta con infraestructura de control de crecientes. De los ríos que aportan escurrimientos a la planicie tabasqueña solo el Grijalva está bajo control de crecientes. Aguas abajo de la ciudad de Villahermosa se forma el complejo deltaico tabasqueño que aunado con el sistema fluvial Usumacinta dan lugar a un conjunto de humedales. De acuerdo con la Conagua, la precipitación anual que ocurre en la región se encuentra entre las más altas del mundo (2,750 mm en la zona costera y hasta 4,000 mm en las estribaciones de las sierras).

La densidad de población del estado es de aproximadamente 81 habitantes por kilómetro cuadrado. Villahermosa es la mayor aglomeración urbana, con una población de 614,308 habitantes en el 2005, sin embargo la Chontalpa es la zona con la mayor densidad de población, con localidades importantes como Comalcalco, Cunduacán y Heroica Cárdenas. Los municipios más densamente poblados son Comalcalco y Centro, con más de 200 habitantes por kilómetro cuadrado. El oriente del estado es la región que presenta la menor densidad de población, la mayoría de los asentamientos de esa región se ubican sobre las márgenes del río Usumacinta. Para la visualización de todo lo anterior mencionado es necesario remitirse al *Anexo 4. Mapa del estado de Tabasco*.



De acuerdo con la configuración geográfica e hidráulica, la llanura tabasqueña es por naturaleza susceptible a inundaciones. Por una parte, el Golfo de México, durante los meses de mayo a noviembre, se ve influenciado por la presencia de sistemas meteorológicos, como huracanes y otros sistemas de baja presión, mientras que por otra parte y a partir de septiembre se inicia la incidencia de frentes fríos sobre el sureste. Debido principalmente al crecimiento poblacional y la falta de infraestructura hidráulica que controle los escurrimientos, las inundaciones periódicas se han convertido en amenazas para la seguridad de la población que ahí radica, principalmente para Villahermosa que se fundó sobre tres pequeñas colinas, aunque el 60% de la zona metropolitana se encuentra en partes bajas. Por ejemplo, se puede mencionar las inundaciones más recientes sufridas en la zona de acuerdo con los registros de *Dartmouth Flood Observatory*, a través de su página de internet www.dartmouth.edu/~floods: en el año 1987, del 1 de octubre al 8 de octubre, debido a lluvias torrenciales; en el año 1989, del 9 de septiembre al 24 de septiembre, a causa de una tormenta tropical; en el año 1995, del 30 de septiembre al 2 de octubre, por el Huracán Opal y del 12 de octubre al 19 de octubre, debido al Huracán Roxanne; en el año 1999, durante los días 12 de octubre al 29 de octubre, a causa de lluvias torrenciales, presentándose los efectos principalmente en los ríos Grijalva y Carrizal; en el año 2000 en la ciudad de Villahermosa, del 10 de octubre al 17 de octubre; en el año 2003, los días 5 de octubre al 12 de octubre en el río Usumacinta, debido especialmente a la tormenta tropical Larry que trajo consigo fuertes lluvias; y obviamente la inundación del año 2007, en los meses de octubre y noviembre, la cual es tema principal de este capítulo. Hasta antes de las inundación de 2007 se consideraba a la inundación de 1999 la que más afectó al estado de Tabasco.

4.2 Crónica del evento de inundación entre los meses de octubre y noviembre de 2007

A continuación se presenta una crónica de lo sucedido en el estado de Tabasco y principalmente en la ciudad de Villahermosa, a finales del mes de octubre y principios de noviembre del año 2007, basada principalmente en la documentación hecha por medios de comunicación escritos así como relatos vivenciales de personas afectadas (Martínez, 2007), complementado con la propia información generada por el estado de Tabasco, a través de su página de internet www.tabasco.gob.mx y los registros proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), entidad a cargo de la operación de las presas del Sistema Hidroeléctrico del río Grijalva y por la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Adicional a lo anterior se tomó como referencia los pronósticos y boletines meteorológicos generados por el CENAPRED a través de su Sistema de Alerta Temprana (SIAT), disponibles en la página de internet http://geografica.cenapred.unam.mx/Boletin_SIG/Consultas.



Los primeros siete días del mes de octubre sólo se pronosticaban para el Estado de Tabasco, lluvias que de acuerdo con los boletines del SIAT, eran consideradas como moderadas a fuertes, con probabilidad de que ocurrieran encharcamientos además de pequeñas inundaciones. A partir del octavo día de octubre y hasta el día 12, las probabilidades de lluvia cambiaron a muy fuertes y en ocasiones intensas, ligado a la interacción de un sistema de baja presión con el frente frío número 2. Debido a ello había posibilidades de desbordamientos en ríos, inundaciones, corrientes de lodo y deslaves. Estos días con incesantes lluvias habían provocado que para el 12 de octubre se tuvieran miles de personas damnificadas de algunos municipios de Tabasco, además de Veracruz, Quintana Roo y Chiapas. También se había materializado las crecidas y desbordamientos en varios ríos y arroyos. De acuerdo con la Conagua, y debido a las intensas lluvias, se mantenía una vigilancia “especial” en los ríos de la Sierra de Tabasco, y se informó que el río Pichucalco estaba ya 26 centímetros arriba de su escala crítica. Estas constantes lluvias había favorecido el incremento en los afluentes de la entidad, por lo que se pretendía prevención especial para los próximos días en los ríos Teapa y Puyacatengo en su confluencia con el río de La sierra a la altura del camino Torno Largo – Villahermosa y el Pichucalco.

Para los días 14 al 18 se seguían pronosticando lluvias fuertes a muy fuertes en Tabasco, pero esta vez se sumaban vientos fuertes. Las inundaciones en zonas bajas eran inminentes. Existía la probabilidad de corrientes súbitas en ríos y arroyos.

Para el día 19 las lluvias habían causado encharcamientos en las zonas bajas de algunas comunidades serranas de Tabasco, donde se incrementó el nivel de los ríos que amenazaban con desbordarse, por lo que se mantenían bajo vigilancia, debido a que se preveía que continuarían las precipitaciones en el Estado. La Conagua había indicado que los principales ríos que atraviesan Tabasco, como el Usumacinta, Mezcalapa, Samaria y Carrizal, conservaban su capacidad de regulación, pero se había recomendado especial vigilancia a los afluentes que cruzan los municipios de Teapa, Tacotalpa, Jalapa y Macuspana, debido a los importantes núcleos poblacionales que se asientan en sus riberas. Por primera vez en el mes de octubre (19 al 23 de octubre), se mencionaba en los boletines que había probabilidad del aumento en los niveles de las presas.

Miércoles 24 y Jueves 25 de octubre de 2007

Precisamente el día 24 de octubre, a unos días de que sucediera la inundación, el gobernador de Tabasco, Andrés Granier, demandaba ante legisladores federales, mayores inversiones en materia hidráulica, esto en el foro “Proceso de integración de presupuesto 2008”, convocado por la Comisión de Recursos Hidráulicos de la Cámara de Diputados federal. Mientras tanto sucedían lluvias a causa del Frente Frio No. 4.



Sábado 27 de octubre de 2007

Andrés Granier daba un comunicado en el que declaraba estado de alerta en Tabasco, pues la Conagua confirmó la entrada a Tabasco del Frente Frio No. 5 en los días próximos. Esto traería consigo nuevamente lluvias intensas, oleajes y vientos de 8 km/hr. La contingencia meteorológica se preveía iniciara la noche del sábado y se intensificara el domingo. El Gobernador, pidió a la población de la costa, márgenes de los ríos y zonas bajas, que estuvieran alerta para evacuar en caso de ser necesario.

Domingo 28 de octubre de 2007

Se presentó la Depresión Tropical No. 16 del Océano Atlántico y la masa de aire frío ya estaba provocando lluvias fuertes en Tabasco y Chiapas. Según lo comunicaba la Conagua, se habían registrado lluvias de hasta 136 mm en la sierra de Tabasco, lo que podría sobreelevar aun más los niveles de los ríos Viejo Mezcalapa, La Sierra, Grijalva y San Pedro. Éstos ya se encontraban en su escala crítica, aunque los ríos Teapa, Tacotalpa, Pichucalco, Tulijá, Puxcatán, Chilapa, Chilapilla y Usumacinta se encontraban cercanos a ella. Debido al remanso en la confluencia del río Grijalva y Carrizal, por la diferencia en las elevaciones de la descarga, la población ubicada irregularmente en la margen de dichos ríos se vería afectada, en el área urbana y conurbada de la ciudad de Villahermosa. Aun más, el efecto de la marea alta ya se hacía sentir en la desembocadura del río Grijalva al Golfo de México, lo que localmente se conoce como “tapón hidráulico”, debido al remanso que lo anterior causa. La presa Peñitas se encontraba a una elevación de 88.16 m, mientras que el NAMO se establece en 87.4 m, y se descargaban ya 500 m³/s. Aun ello, el Gobernador de Tabasco dijo por TVT, la televisora del gobierno del Estado, “No hay de que alarmarse” y a su vez seguía solicitando a la población a atender las indicaciones de Protección Civil y evacuar sus casas en caso de ser necesario para trasladarse a refugios temporales. Se contaba ya con albergues listos para atender a 135 mil personas. Mientras la prensa documentaba el incidente, el relato fue que las personas ya con problemas de inundación se negaban a abandonar sus viviendas por el temor al robo de sus pertenencias. A través de los recorridos que realizaba Protección Civil, se identificaron anegaciones de entre 20 y 40 cm en algunas comunidades centlecas.

Lunes 29 de octubre de 2007

La Tormenta Tropical “Noel” del Océano Atlántico se ubicaba ya a 130 km de Cuba. Se mantenía la etapa de alerta publicada por el SIAT y se pronosticaba Norte con olas de 2 a 3 m en costas y zonas marítimas del Golfo de México. La presa Peñitas hasta las ocho de la mañana seguía desfogando sólo 480 m³/s en promedio. La CFE desfogaría mayores caudales pues dicha presa estaba recibiendo más agua de la que podía controlar. La Conagua pronosticaba que el nivel del río Grijalva se



incrementaría considerablemente en el transcurso de la noche del lunes y las primeras horas del martes, además informó que las condiciones anunciadas de lluvias fuertes se mantendrían durante el martes, toda vez que se combinaran con ingresos de humedad debido a “Noel”. El aumento en los niveles del río Mezcalapa comenzó este día, e iniciaron las medidas de prevención y evacuación de habitantes de zonas bajas. La presa Peñitas comenzó a desfogar por turbinas y vertedores a partir de las diez de la mañana más de 1,500 m³/s y hasta 2,055 m³/s cerca de la media noche, aunque el embalse estaba recibiendo hasta 5,000 m³/s. Los ríos de la Sierra, Mezcalapa, Platanar, Cumuapa y Paredón traían gastos arriba de 300 m³/s, lo cual se sumaba a lo que estaba desfogando la presa Peñitas. En cuestión de horas se inundaron grandes extensiones de territorio. Ciudadanos de todos los sectores se sumaban a los trabajos emprendidos para reforzar los muros de contención de los malecones Carlos A. Madrazo y Leandro Roviroso Wade, con la instalación de costales con arena. La Secretaria de Educación había suspendido ya las actividades en la educación básica, media superior y superior. El Gobernador señalaba que el “tapón hidráulico” en la descarga del río Grijalva debido a la marea alta impedía el desfogue de las corrientes fluviales y generaba condiciones para que los ríos mantuvieran escalas elevadas. Debido al temor de la población a dejar sus casas y con ellas sus pertenencias, el Gobernador aseguraba que el Ejército Mexicano y las Fuerzas de Seguridad Estatales y Federales realizarían rondines permanentes para vigilar zonas evacuadas. De acuerdo con Protección Civil, ya se tenían 100 mil afectados.

Martes 30 de octubre de 2007

La Tormenta Tropical “Noel” se ubicaba a 60 km de Cuba, la masa de aire frío seguía manteniendo a Tabasco en estado de alerta, se pronosticaban más lluvias fuertes. La población de Villahermosa aun dudaba que la inundación llegara hasta el centro de la ciudad. Aun ello, hasta este día se tenían inundadas ya 308 localidades de 14 municipios, lo que representaba casi 80 mil personas afectadas. Los ríos Samaria, Carrizal, La Sierra y Grijalva se encontraban arriba de su escala crítica. De éstos, el río Samaria era el más crítico pues estaba 1.84 m arriba de dicha escala. Por debajo de la escala crítica estaban el río Usumacianta, Puxcatán, Oxolotán, Tacotalpa y Teapa. Se seguían desfogando arriba de 2,000 m³/s de la presa Peñitas. Las afectaciones seguían en ascenso.

Miércoles 31 de octubre de 2007

La masa de aire frío se debilitaba, mientras el Frente Frio No. 4 seguía estacionado en el Golfo de México, se pronosticaban lluvias muy fuertes en la zona, además “Noel” se intensificó dentro de su categoría. Se consideraba que el 70% del estado se encontraba ya bajo el agua, manteniendo a más de 300 mil personas afectadas. Los ríos Carrizal y Grijalva rompieron los diques y comenzaron a inundar varias zonas de Villahermosa con lo que amplios sectores de la población fueron evacuados. El agua se filtraba por debajo de la carretera del río Carrizal. Incluso refugios habilitados



fueron alcanzados por la inundación que dejó a miles de personas aisladas en los segundos pisos o azoteas de sus viviendas, teniendo que ser rescatados por lanchas o helicópteros. También había gente que aun se negaba a dejar sus casas por miedo a la rapiña. El Gobernador señalaba que el territorio estaba totalmente devastado, con pérdidas al 100% en la producción agrícola de plátano, cacao y pimienta. Así mismo, Granier culpó a su antecesor en la administración, porque la obra de control “El Macayo”, que debió concluirse en mayo del año del desastre, para contener el agua del ríos Carrizal, no se terminó, a pesar de que evitaría afectaciones a 700 mil personas en Villahermosa. Los ríos Puxcatán y Grijalva seguían creciendo, este último en el nivel más alto con 1.74 m por encima de su escala crítica. Los ríos Samaria, Carrizal, Usumacinta y Teapa descendieron. La presa Peñitas estaba desfogando aun 2,000 m³/s aproximadamente. Las buenas noticias eran dentro del sector salud, pues no se había registrado aun ningún caso de cólera o de paludismo.

Jueves 1 de noviembre de 2007

Continuaba la presencia de “Noel”, al igual que la masa de aire frio pero ya débil, aunque se pronosticaban aun lluvias fuertes además de que estaba entrando el Frente Frio No. 5. Villahermosa estaba inundada al 80%. Las actividades económicas y escolares así como servicios hospitalarios, de electricidad y agua potable se vieron completamente suspendidos. La mayoría de los refugios se veían rebasados por los estragos de la inundación. Se contabilizaban ya un millón de damnificados en todo el estado. Se desencadenó un ambiente de incertidumbre entre los damnificados y la desesperación más que por el agua, era por la escasez de alimentos y la falta de agua para beber. La ciudad se encontraba aislada del resto del país pues las aguas cortaron en diversos puntos a la carretera Federal 180 que comunicaba al occidente con el estado de Veracruz y el resto del país. Únicamente el aeropuerto Internacional Carlos Roviroso Pérez permanecía como principal medio de comunicación de la ciudad. Los últimos diques formados por sacos con arena que separaban el malecón Carlos A. Madrazo del Río Grijalva colapsaron. Estos sacos de arena protegían el Centro Histórico de Villahermosa. Hasta el amanecer de este jueves, los niveles de los ríos de la Sierra y Grijalva continuaban ascendiendo y solo el río Carrizal mantenía su mismo nivel. Granier descartaba que el cierre de la presa Peñitas fuera la solución al problema, toda vez que de tomar esa medida podría provocar la falla de la presa y como consecuencia, Tabasco prácticamente desaparecería.

Viernes 2 de noviembre de 2007

El Frente Frio No. 5 se mantenía, aunque las lluvias empezaban a disminuir siendo catalogadas solo como ocasionalmente fuertes al mismo tiempo que se pronosticaba el ingreso del Frente Frio No. 6. El agua comenzó a bajar por lo que el paso hacia Villahermosa ya era posible. Se reportó en el río Carrizal una reducción en el caudal, mientras que en el río Grijalva seguía el aumento del nivel



teniendo 1.91 m sobre su escala crítica. De acuerdo con la CFE, las presas no presentaban problemas y continuaban operando bajo niveles de seguridad. Andrés Manuel López Obrador recomendaba revisar las bitácoras del manejo del agua en las presas y así descubrir por qué se permitió la acumulación de agua y su posterior liberación, esto con el afán de observar qué relación tenía esto con los compromisos que se habían hecho con empresas privadas para la generación de energía. El Gobernador se reunió con el Presidente de México pidiendo una mejor justicia social para Tabasco, pues merecía más obras hidráulicas, mientras que el Presidente se comprometió a realizar acciones para evitar estragos como éste en un futuro, “cueste lo que cueste”. Se pedía a la ciudadanía que ante el desbordamiento del muro de costales con arena colocados en la avenida Adolfo Ruiz Cortines era necesaria la evacuación.

Sábado 3 de noviembre de 2007

Se mantenía el Frente Frio No. 5, y se pronosticaban una vez más lluvias fuertes. Parte de la población permanecía atrapada en los techos de sus casas, aproximadamente 290,000 personas. Una turba irrumpe los comercios de Villahermosa, saquean, rompen y roban. La Secretaría de Seguridad Pública presentó a 44 personas capturadas en flagrancias a establecimientos comerciales y casas habitación. Se agotan los víveres y acaparadores suben los precios de productos. Hay connatos de violencia y la inseguridad rebasa a las autoridades. La Conagua informó que los caudales de los ríos en la zona de Villahermosa iban descendiendo paulatinamente en virtud de que las lluvias habían disminuido. La CFE comunicó que debido a estas condiciones meteorológicas se mantenía favorable la situación en la cuenca de la presa Peñitas, y con ello se había determinado reducir la extracción de agua de la presa de 1,500 a 800 m³/s.

Domingo 4 de noviembre de 2007

Se mantenía el Frente Frio No. 5 aunque las lluvias disminuyeron de este día en lo consecutivo. Se presentaba una nueva reducción de la extracción de la presa Peñitas por estar ésta y las restantes en niveles de seguridad. El río Grijalva se encontraba a 1.97 m arriba de su escala crítica y los ríos Samaria y Carrizal se situaban a 9.7 y 15.93 m cuando su escala crítica era 8.77 y 14.9 m. Torrentes de gente desesperada aguardaba en fila su turno para que les fuera regalada una despensa en la Quinta Grijalva.

Lunes 5 de noviembre de 2007

Algunas personas se reinstalaban en sus casas y los niveles de los ríos comenzaban a bajar. Ante la magnitud del desastre causado por la inundación, los recursos no eran suficientes, sin embargo se reconoció que la Cruz Roja Mexicana y Organizaciones No Gubernamentales, entre otros organismos



entregaban puntualmente ayuda humanitaria a Tabasco. A tempranas horas de este lunes se registró un desprendimiento de tierra en San Juan Grijalva, Chiapas, entre las presas Malpaso y Peñitas, que formó un cerro de 200 m de altura aproximadamente, sin embargo esto no afectaría a la presa Peñitas ni representó peligro alguno para las comunidades de Tabasco.

El día 6 de noviembre daba comienzo el bombeo del agua estancada de algunas partes de Villahermosa y finalmente el 8 de noviembre cesaban de turbinar en la presa Peñitas. El regreso de niveles por debajo de sus escalas críticas de los ríos Carrizal y Samaria era ya una realidad.

4.3 Probables causas o factores de influencia en la inundación

Varios meses después de la catástrofe vivida en Tabasco en 2007, las causas del impacto que provocaron las inundaciones durante octubre y noviembre del año citado, no habían sido totalmente aceptadas principalmente por la sociedad y los medios de comunicación. Es por éstos mismos que se adjudica la responsabilidad del desastre mayormente a las siguientes causas:

- Fenómenos Meteorológicos con la consecuencia de lluvias extraordinarias debido a:
 - Presencia de los Frentes Fríos No. 4 y 5
 - Depresión Tropical no. 16 que después se desarrolló en el Huracán Noel
- Marea astronómica y marea de tormenta
- Construcción de obras hidráulicas ineficientemente
- Mal manejo y operación de la presas hidroeléctricas presentes en la zona
- Deforestación de la selva tabasqueña y chiapaneca
- Mala planeación y uso indebido de recursos para obras contra inundaciones
- Falta de prevención de desastres
 - Sistemas de alerta temprana
 - Evaluación de riesgo
 - Planes de desalojo
 - Educación a población vulnerable
 - Planeación de usos de tierra



Oficialmente se aceptó lo siguiente como principales factores (Informe al Senado de la República por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua):

- Precipitaciones y escurrimientos extraordinarios y condiciones antecedentes en las cuencas
- Trenes o sucesión de avenidas (eventos de escurrimiento alto)
- Simultaneidad de eventos generados en otras cuencas
- Condiciones desfavorables de mareas

4.4 Actores y acciones

Es de gran importancia detectar las acciones realizadas en torno del tema de los desastres por inundación entre los diversos actores de la zona en desastre, el sector gubernamental, de las organizaciones no-gubernamentales, las instituciones financieras internacionales, las comunidades académicas y científicas, el sector privado, los medios de comunicación y el público en general. La importancia radica en la información que se puede obtener de estas acciones, para con ello identificar qué de todas ellas pueden integrar lo que en este trabajo se plantea como Guía metodológica para el análisis forense de inundaciones.

4.4.1 Acciones pre-desastre

- Diversas inversiones en materia de infraestructura hidráulica, por ejemplo entre 1996 y 2001 se invirtieron más de 1,000 millones de pesos (Fuente: Informe de Gobierno de Vicente Fox, 2001).
- Programa Integral de Control de Inundaciones (PICI). Este programa pretendía confinar los principales cauces de los ríos controlados y no controlados que atraviesan la llanura tabasqueña, con el propósito de evitar que el desbordamiento de los cursos de agua inunden las áreas urbanas y las zonas de cultivo en el Estado (Fuente: <http://comunicacion.senado.gob.mx>). Los propósitos del PICI eran:
 - Contar con un marco conceptual para la solución de la problemática hidráulica en Tabasco.
 - Disponer de un esquema integral de las obras para la protección contra inundaciones.
 - Consolidar el marco regulador para las vías de comunicación y otras obras de infraestructura, para que no interfieran en el drenaje natural.
 - Aprovechar áreas protegidas para el desarrollo agrícola y ganadero.
 - Evitar la ubicación descontrolada y determinar lugares seguros para nuevos asentamientos humanos.



- Proporcionar elementos para difundir la problemática hidráulica y las acciones para su solución.

- La Unidad de Protección Civil de Tabasco promueve la capacitación para mantener preparada y organizada a la población y mejorar su capacidad de respuesta ante riesgos a los que está expuesta. Por lo que realiza la capacitación y adiestramiento en las acciones de prevención, auxilio y recuperación ante la eventualidad de un desastre. Se han elaborado programas de capacitación dirigidos a los integrantes de las Unidades Municipales e Internas de Protección Civil, entre los cursos se encuentran los siguientes (Fuente: www.proteccioncivil.gob.mx):
 - Prevención y Control de Incendios
 - Primeros Auxilios
 - Simulacro de Evacuación
 - Brigadas de Protección Civil
 - Avisos y Señales de Protección Civil
 - Sistema Nacional de Protección Civil
 - Tipos de Riesgos que afectan a la población

- CENAPRED. Se instaló en Villahermosa, Tab. una red de medición y sistemas de pronóstico de inundaciones, conocido como Sistema de Alerta Hidrometeorológica (SAH). Este sistema está basado en el tiempo que se tiene antes de la ocurrencia de un evento peligroso como puede ser el desbordamiento de un río, cuando apenas está iniciando una tormenta. Se analiza el comportamiento de los escurrimientos en las cuencas donde se tiene un SAH, con lo que se puede estimar con un buen grado de precisión los posibles escenarios de peligro ante inundaciones que pueden llegar a presentarse y afectar una comunidad. Se estiman las intensidades de lluvia y escurrimientos con 20 a 90 minutos de anticipación (http://www.esalud.gob.mx/wb2/eMex/eMex_Inundaciones.cts).

4.4.2 Acciones durante el desastre

Gobierno Federal y Estatal (Fuente: Informe de Gobierno de Felipe Calderón, 2008)

- La Secretaría de Gobernación (Segob) realizó la gestión ante la Agencia Aeroespacial Alemana para recibir imágenes satelitales de radar de alta resolución en los primeros días del desastre en Tabasco, información que se difundió a todas las instituciones interesadas.



- La Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena) a través del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos, promovió la participación de 9,168 elementos militares que realizaron labores de evacuación de 32,568 personas, trabajos de construcción de 33 albergues, en los que atendieron a 26,260 personas con más de 2 millones de raciones de comida caliente; se proporcionaron 21,247 consultas médicas y se distribuyeron 2,692 medicamentos, alrededor de 1.3 millones de litros de agua potable, 411,358 kilogramos de víveres, 4,283 colchonetas, 7,063 cobertores y 7,063 láminas de cartón. Además, se removieron 44,406 metros cúbicos de escombros, se realizaron 63,889 trabajos de desazolve y se llenaron y colocaron 164,911 sacos terreros.
- La Secretaría de Marina (Semar) proporcionó apoyo a 162 comunidades del estado de Tabasco, coordinó la evacuación de 166,864 personas, transportó a 69,864 personas y a siete heridos, se distribuyeron 248,597 kilogramos de despensas, casi 1.2 millones de kilogramos de víveres, 1.6 millones de litros de agua potable, 8,026 piezas de medicamentos, 5.5 millones de kilogramos de ropa diversa, 5,282 juegos de ropa de cama y 5.5 millones de kilogramos de carga diversa; también se brindó atención médica a 13,500 personas, se aplicaron 27,200 vacunas, se elaboraron 112,755 raciones alimenticias, se removieron 1,514.3 toneladas de escombros, se prepararon y distribuyeron 3,420 sacos terreros, se recorrieron 146,840 kilómetros de seguridad y vigilancia, y se consignaron 22 personas a las autoridades correspondientes. En estas acciones se efectuaron 1,359 operaciones con la participación de 276 unidades operativas y 4,007 elementos. Con motivo del desgajamiento de un cerro en el poblado de San Juan del Grijalva en el estado de Chiapas, la Armada de México brindó apoyo a una comunidad, con la evacuación y transporte de 437 personas, y se rescataron 12 cadáveres. En estas acciones se efectuaron 47 operaciones con la participación de siete unidades operativas y 316 elementos.
- La Secretaría de Salud (SS) otorgó atención médica universal y gratuita las 24 horas del día, así como el abasto de medicamentos; se activó las Caravanas de la Salud y se dio cobertura médica a los refugios temporales; se realizaron acciones de vigilancia epidemiológica en unidades de salud y en la población a través de visitas casa por casa. Se proporcionó atención psicológica en refugios temporales y al resto de la población por medio de terapias grupales; se tomaron y procesaron muestras de casos sospechosos cuyo padecimiento se encuentra sujeto a vigilancia epidemiológica en casos de desastres; se realizaron acciones de promoción, control del vector, así como de protección contra riesgos sanitarios y se vacunó a la población.



- La Secretaría de Seguridad Pública (SSP) en apoyo a las labores de rescate en Tabasco envió un contingente de 1,300 elementos de las Fuerzas Federales de Apoyo y 104 elementos de la División de Proximidad Social; 50 vehículos para el traslado de personas y víveres; y 30 unidades de transporte, coordinó la operación de 30 helicópteros, puestos a su disposición por dependencias públicas y privadas.
- En el marco de las reuniones de coordinación entre las distintas instancias del Gobierno Federal, la Policía Federal llevó a cabo acciones de protección civil y seguridad pública, como la puesta en marcha de un puente aéreo para el traslado de mercancías y entrega de víveres en las zonas afectadas; la evacuación de personas y enfermos de hospitales dañados hacia albergues y nosocomios; se garantizó la seguridad a instalaciones estratégicas, como el Centro de Readaptación Social Estatal, el aeropuerto e infraestructura de PEMEX. Llevó a cabo patrullajes para evitar actos de pillaje y garantizar la apertura de los centros comerciales donde se expenden productos básicos. Estas acciones se desarrollaron en puntos críticos de Tabasco, entre otros, destacan las colonias Las Gaviotas, Hidalgo, Zona Centro, Miguel Hidalgo, Ixtlacomitán, Casa Blanca 1a. y 2a. sección, Torno Largo y Malecón; en las rancherías Ixtlacomitán 1a., 2a. y 3a. sección y en la rivera del río Grijalva.
- Además, con la instalación de dos consultorios móviles, personal médico al servicio de la SSP proporcionó consultas médicas, aplicó vacunas contra el tétanos, influenza y hepatitis A; en tanto que cinco brigadas médicas acuáticas dieron consultas y ofrecieron vacunas a personas de zonas inundadas de la ciudad de Villahermosa y elementos femeninos de las Fuerzas Federales brindaron asistencia y seguridad a un asilo de ancianos.
- En coordinación con la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), personal de la SSP brindó atención y apoyo emocional a damnificados con crisis post-trauma en los albergues con mayor número de damnificados en Villahermosa y en sus alrededores, además de que brigadas de psicólogos, abogados y trabajadores sociales prestaron servicios en refugios.
- La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) realizó el diagnóstico de la infraestructura hidráulica dañada de localidades de los municipios del Centro, Balancán y Macuspana, e implementó un operativo de atención a las zonas inundadas, con la ejecución de obras emergentes y de rehabilitación, con cargo al FONDEN y seguros institucionales; asimismo, se llevó a cabo el desalojo de habitantes en 53 colonias urbanas.



Comisión Nacional del Agua

- A través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se mantuvo el flujo de información acerca de la situación meteorológica en el Estado y pronósticos para los días subsecuentes. Se entregaron boletines diarios por parte de la Dirección Local de Conagua en Tabasco a las autoridades de Protección Civil por medios electrónicos (Fuente: Conagua Comunicado de prensa No. 233-07).
- Mediante los Boletines de Difusión Externa se hizo del conocimiento público los niveles de los cauces así como los niveles en las presas.
- A partir del 30 de octubre se puso en marcha un operativo de emergencia para enfrentar los efectos del desbordamiento de los ríos mediante plantas de bombeo, potabilizadoras y generadoras, camiones para desazolve y limpieza de drenaje, entre otros equipos. Se abasteció de agua potable a la población afectada, incluidos hospitales y albergues, así mismo, se distribuyó agua en pipas. (Fuente: Informe de Conagua sobre los Fenómenos Hidrometeorológicos ocurridos en el estado de Tabasco, 4 de diciembre de 2007).

Comisión Federal de Electricidad

- La CFE en coordinación con la Conagua modificó las políticas de operación del sistema de embalses del río Grijalva con el fin de coadyuvar en la disminución de los niveles generados por la inundación.
- En las zonas afectadas suspendió el servicio de luz para evitar accidentes con la población en situación de riesgo (Fuente: www.tabasco.gob.mx).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Fuente: Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. Acciones para apoyar la emergencia derivada de las inundaciones ocasionadas por el desbordamiento de ríos en Tabasco y Chiapas. Informe al 10 de noviembre de 2007)

- La Fundación Gonzalo Río Arronte resuelve comprar 10 plantas potabilizadoras portátiles y 20 bombas “charqueras”, las cuales serían donadas posteriormente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Para esta emergencia, el IMTA se comprometió a coordinar y supervisar la recepción y la operación del citado equipo y a conservarlo, resguardarlo y mantenerlo en condiciones apropiadas para otras emergencias en que de manera conjunta se decida actuar.



- Personal del IMTA (dos técnicos) viajó para coordinarse con la Conagua, recibir los equipos y materiales, poner a funcionar las plantas e informar de los avances y la situación prevaleciente con la frecuencia que les fuese posible.

Protección Civil (Fuente: Informe de Gobierno de Felipe Calderón, 2008)

- La Secretaría de Gobernación desplegó misiones de coordinación de la emergencia que fungieron como enlaces entre las diversas instancias del Sistema Nacional de Protección Civil, brindaron asesoría en la instalación y operación del Centro de Operaciones del estado de Tabasco, monitorearon y transmitieron información relacionada con las primeras afectaciones, coordinaron y ejecutaron tareas de evaluación de daños y análisis de necesidades, participaron en vuelos de reconocimiento y evaluación, y generaron reportes de situación de daños.
- El 29 de octubre de 2007 se emitió declaratoria de emergencia detonando la ayuda proveniente del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), y personal de la Dirección General del FONDEN se trasladó a la ciudad de Villahermosa para entrar en contacto con las autoridades del estado de Tabasco para apoyar y asesorar en los procesos de acceso a los recursos del Fondo Revolvente del FONDEN.
- Las autoridades estatales realizaron su primera solicitud de recursos el 29 de octubre la cual fue atendida y autorizada ese mismo día. Al 17 de junio de 2008 se han autorizado 31 solicitudes de insumos con un costo aproximado de 510.7 millones de pesos, con cargo al Fondo Revolvente del FONDEN para atender las necesidades alimenticias, de abrigo y de salud de la población afectada en Tabasco.
- Derivado de los acuerdos emanados por la emergencia presentada en el estado de Tabasco, los días 30, 31 de julio y 1º de agosto de 2008, se llevó a cabo el Taller sobre el Sistema Nacional de Protección Civil para Funcionarios Estatales y Municipales de Tabasco, en la ciudad de Villahermosa, con una participación de 300 personas.
- Con motivo de la ocurrencia del deslizamiento de ladera en San Juan Grijalva, Chiapas, y la consecuente obstrucción del río Grijalva, se participó en la estimación de escenarios de inundación en Villahermosa, Tabasco, tomando en cuenta la represa natural formada en el río Grijalva y posibles cambios en la operación de la presa Peñitas. Asimismo, se elaboró, conjuntamente con otras instituciones, un plan de evacuación para los escenarios que implicaran nuevas inundaciones debido a la apertura de compuertas de la presa Peñitas.



Red humanitaria (Fuente: Secretaría de Relaciones Exteriores, a través de su página de internet www.sre.gob.mx)

- Gobierno de Japón. Ayuda de emergencia por un monto aproximado de 1.4 millones de pesos consistente en carpas, cobijas, láminas de plástico, purificadores de agua, tanques de agua y bidones portátiles, entre otros.
- Gobierno de España. La ayuda otorgada consistió en dos plantas potabilizadoras, cuatro módulos complementarios para planta potabilizadora, tres Jerry Cans de diez litros cada uno y dos tiendas de campaña 4x4 familiares. La ayuda fue recibida por el Embajador de España en México, Carmelo Angulo y el Coordinador General de la Cooperación Española, Sr. Carlos Cano.
- Gobierno de Panamá. Tres cargamentos distintos de ayuda humanitaria consistentes en ropa y calzado nuevos.
- Gobierno de Estados Unidos. Ofreció 120, 000 dólares adicionales en apoyo material a los esfuerzos de asistencia (2,000 catres y 95 bombas de agua). La empresa norteamericana "Asia Latinoamericana" donó cuatro plantas potabilizadoras, las cuales llegaron al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México procedentes de Charleston, Carolina del Norte. Con el apoyo de clubes y organizaciones sociales, empresas de comunicación y la comunidad del Valle de Texas, salió de McAllen el primer embarque con destino al estado de Tabasco con más de 25 toneladas de ayuda en artículos de aseo personal, agua embotellada, alimentos enlatados y pañales desechables.
- Gobierno de California. Ocho botes inflables (Zodiac) y equipo diverso para labores de rescate. Toda esta ayuda fue transportada a Tabasco por medio de un avión de la Marina.
- Gobierno de Suiza. Confirmó su aportación de 100,000 francos suizos, misma que hizo efectiva por conducto de la Cruz Roja Suiza a la Cruz Roja Mexicana.
- Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (PMA), con raciones para alimentar a 70,000 personas durante cinco días.
- Organización no gubernamental Search & Rescue Assistance in Disasters (SARAID). Trabajos coordinados con la Secretaría de Marina para atención a la entidad.
- Gobierno británico. Donativo de 250,000 Libras esterlinas a la Federación Internacional de la Cruz Roja, para ayuda de los damnificados.



- Organización Eurochocolat, que agrupa a productores y comercializadores de cacao, que trabaja estrechamente con sus similares de Tabasco y Chiapas, dispuso hacer un donativo.
- Cruz Roja China. Entrega a la Cruz Roja Mexicana de un donativo de 30,000 dólares.
- Brigadistas cubanos bajo la coordinación del CENAVECE. La brigada médica cubana “Henry Reeves” especializada en emergencias epidemiológicas colaboró con la contingencia.
- El Sistema de Naciones Unidas puso en marcha el procedimiento para que la Oficina de Naciones Unidas para la Evaluación y Coordinación en casos de Desastres (UNDAC) y la Oficina para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA) enviara expertos sobre el terreno, a fin de apoyar el procedimiento de coordinación de la asistencia internacional.
- Corporación Andina de Fomento (CAF). Donación de 100,000 dólares.
- Entre muchas otras organizaciones humanitarias y gobiernos extranjeros que apoyaron a Tabasco durante el desastre.

4.4.3 Acciones post-desastre

Gobierno Federal y Estatal

- El Gobierno del estado de Tabasco convocó a implementar programas y elaborar estudios para la definición de acciones de mitigación y de adaptación. En este sentido, instaló el Comité Interinstitucional de Cambio Climático del Estado de Tabasco. Éste tiene como objetivo principal impulsar, promover, planificar y evaluar políticas y acciones de prevención, mitigación y adaptación ante el cambio climático. Las funciones sustantivas de este comité es impulsar la elaboración del Programa Estatal de Cambio Climático y formular políticas públicas. El comité está formado por representantes del sector público en sus tres órdenes (federal, estatal y municipal), el sector académico y de investigación así como estratos social, productivo y empresarial (Fuente: <http://sernapam.tabasco.gob.mx>).
- El Gobierno del estado de Tabasco firmó convenio con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y con la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) así como con la Academia Mexicana de Ciencias, mediante el que se creará en esa entidad del sureste mexicano el Centro de Investigaciones en Energía, Agua y Cambio Climático (Fuente: La Jornada viernes 6 de febrero de 2009).



- A través de Sedesol (Fuente: Informe de Gobierno de Felipe Calderón, 2008):
 - En atención a la emergencia, el Gobierno Federal, a través del Programa Hábitat, financió 1,150 millones de pesos para el apoyo a 115 mil familias damnificadas, con la entrega de certificados de subsidio para la reposición de enseres domésticos hasta por 10,000 pesos. Asimismo, se apoyó en la atención a la emergencia, con la dotación de víveres, insumos y artículos a la población afectada.
 - En coordinación con el Gobierno del Estado de Tabasco se realizó el levantamiento del Censo de Verificación de Daños en las Viviendas, visitando y aplicando una cédula de información socioeconómica y de daños en 155,113 viviendas. El censo permitió identificar el número de viviendas dañadas por la inundación (89,671 en total) así como el tipo de daño respectivo (mínimo, menor, parcial y total), lo que permitiría otorgar los apoyos federales correspondientes vía FONDEN.
 - Como parte del Programa de Guarderías y Estancias Infantiles para Apoyar a Madres Trabajadoras, se realizó un diagnóstico de las condiciones de las estancias en Tabasco, detectándose 38 con alguna afectación, por lo cual se otorgaron recursos adicionales por más de un millón de pesos para su equipamiento y rehabilitación de los espacios físicos, mismos que ya se encuentran nuevamente operando con una capacidad de atención de 1,098 lugares.
 - En el marco del Programa de Empleo Temporal Inmediato se realizaron acciones de reconstrucción, saneamiento e higiene en las zonas en emergencia para reparar los daños ocasionados por desastres ante fenómenos naturales y beneficiar a la población económicamente afectada. Durante 2007, se autorizaron un total de 78.5 millones de pesos, de los que 47.2 millones se aplicaron en la generación de 96,813 empleos y 1'003,504 jornales y 31.3 millones de pesos, se destinaron a la compra de materiales de construcción, lo que permitió atender a 69,346 damnificados, principalmente en acciones de limpieza y desazolve de calles, descacharrización, limpieza y mantenimiento de albergues. En este sentido, al primer trimestre de 2008 se ejercieron 1.1 millones de pesos en el estado de Tabasco, beneficiando a 607 personas con 23,290 jornales.



Comisión Nacional del Agua

- Informe sobre los eventos hidrometeorológicos que afectaron a los estados de Tabasco y Chiapas y acciones realizadas por la Conagua (Fuente: Informe sobre los eventos hidrometeorológicos que afectaron a los estados de Tabasco y Chiapas y acciones realizadas por la Conagua, 16 de noviembre de 2007).

Este informe involucró los siguientes análisis:

- Situación meteorológica
 - Sistema de presas del río Grijalva
 - Evolución de los ríos en la planicie tabasqueña
 - Acciones de atención inmediata a la población
-
- Trabajo interinstitucional Conagua – Instituto de Ingeniería UNAM en coordinación con el Gobierno del Estado. Realizarán el Plan Hídrico Integral de Tabasco, el cual es la columna vertebral que establece las obras y acciones de protección contra las inundaciones (Fuente: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/PlanHidricoIntegralTabasco.pdf>).

Comisión Federal de Electricidad

- 1,100 trabajadores electricistas trabajaron ininterrumpidamente en las labores de atención a la población afectada y en el restablecimiento del servicio eléctrico, así como 400 vehículos y tres helicópteros.

- A finales de 2007 se llevó a cabo la construcción del canal ante el deslizamiento del río Grijalva, con lo cual se realizó la remoción en 38 días, de 1'200,000 metros cúbicos de materiales, equivalentes al 12% del volumen que se removió en la presa El Cajón durante cinco años. A principios de 2008 se amplió el canal para garantizar la conducción adecuada del caudal del sistema hidroeléctrico del río Grijalva, así como reducir el nivel de los embalses en las presas aguas arriba del tapón. Durante esta etapa se removió un volumen total de 1'909,653 metros cúbicos de materiales. El 11 de marzo de 2008 se restableció la generación del Sistema Grijalva. La construcción inmediata del canal permitió restablecer parcialmente el flujo del río, la operación de las presas aguas arriba y evitar la erosión de la masa deslizada. El 11 de junio de 2008, la CFE reportó que las presas del Grijalva (Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas) se encontraban dentro de los niveles de almacenamiento fijados por el Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas para



recibir la próxima temporada de lluvias, asimismo, se reportó que el canal funcionaba de manera normal (Fuente: Informe de Gobierno de Felipe Calderón, 2008).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

- Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, Diagnostico preliminar (Fuente: <http://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g12-04-2008/informe-tabasco.pdf>).

Para este informe se realizaron los siguientes análisis:

- Descripción del evento hidrometeorológico
- Precipitaciones y escurrimientos antecedentes
- Tren de Avenidas
- Simultaneidad de eventos extremos
- Marea de Tormenta
- Sistema de previsión y alerta
- Operación de las presas Malpaso y Peñitas
- Zonas urbanas y vulnerabilidad
- Programa Integral de Control de Inundaciones
- Vulnerabilidad y gestión integrada de crecientes
- Resumen de las causas

Esta investigación formó parte de trabajos solicitados por diversas instancias gubernamentales con el fin de indagar y aclarar los factores causantes de la inundación en Tabasco mediante una averiguación seria y a fondo. El grupo de trabajo estuvo integrado además del IMTA por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Instituto Politécnico Nacional (IPN), el Colegio de Posgraduados de Chapingo y por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).

Protección Civil

- Se hicieron observaciones y emitieron recomendaciones para el Programa Maestro de Prevención y Protección Civil Tabasco, con el propósito de que este instrumento se considere modelo a seguir en el marco del Sistema Nacional de Protección Civil y lograr la homologación de criterios de elaboración de estos programas en las Unidades Estatales de Protección Civil.
- Durante el año 2008 Tabasco recibió aportaciones de la federación, vía el FONDEN, por más de 3,500 millones de pesos, para mitigar los impactos de las inundaciones de finales del año 2007. Recursos que terminará de aplicar hasta el año 2010. Adicional a ésto se creó el Fondo



Estado de Tabasco con un aportación de 4,239.7 millones de pesos provenientes del FONDEN (Fuente: Asociación Ecológica Santo Tomas, a través de la página de internet <http://aestomas.org>).

Otros

- El Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) publicó el artículo “Inundaciones en la planicie costera de los estados de Tabasco y Chiapas en octubre y noviembre de 2007” en el cual abordan los siguientes temas (Fuente: www.cicm.org.mx):
 - Obras de control de inundaciones en las cuencas de los ríos que descargan en la planicie costera de Tabasco.
 - Lluvias en las cuencas de los ríos Grijalva, Usumacinta, La Sierra y otros y mareas en el Golfo de México.
 - Operación del sistema de presas del río Grijalva y cauces de alivio.

- El Colegio de México realizó conferencias con el tema “Factores y Actores de la Inundación en Tabasco: Lecciones de un Desastre y Políticas de Prevención” en donde se presentaron las siguientes instituciones como ponentes (Fuente: www.colmex.mx):
 - Conagua. Características naturales de la cuenca Grijalva
 - Conagua. Organización territorial de la cuenca (regional y urbana)
 - UNAM. Morfodinámica de la línea de la costa de Tabasco
 - UNAM. Algunas consideraciones geólo-geomorfológicas con relación a las inundaciones
 - CENAPRED. Historia hidrológica de la cuenca
 - Gobierno del estado de Tabasco y Conagua. Estructura de gestión hídrica en Tabasco y Chiapas

Cabe mencionar que de estas ponencias no se generaron documentos impresos o electrónicos que se distribuyeran entre los participantes y mucho menos al público en general.

- La UJAT, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y CENAPRED llevaron a cabo el trabajo “Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental de las Inundaciones en Tabasco en el año 2007” (Fuente: www.cepal.org.ar/mexico).



- La Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Marítima y Costera A.C. (AMIP) publicó a través de su revista conocida como Revista Noticias AMIP en diciembre de 2008 el artículo “Transformación de la Cuenca del Río Grijalva” con registro en la revista de Año 4 No. 16.
- Discovery Channel realizó una producción titulada “Tabasco bajo el agua”, un documental que trató de mostrar todo lo ocurrido en las inundaciones y lo que sucedió a un año del segundo peor desastre natural en toda la historia de México, todo ello a través de entrevistas a personajes con historias interesantes, y tratando de buscar variedad, según lo explica la productora Michella Giorelli. El documental fue transmitido el 26 de octubre de 2008 (www.tabascohoy.com).

Así como estas investigaciones, se han realizado aun más con el paso del tiempo, por lo que la lista de acciones se tornaría muy extensa. Las acciones enlistadas fueron elegidas por tener en su mayoría un enfoque técnico para después ser analizadas desde la perspectiva de la guía metodológica.

4.5 Análisis de acciones desde la perspectiva de la guía metodológica

A pesar de que en el apartado anterior se tomaron en cuenta la mayoría de las acciones realizadas sin importar si fueron acciones de investigación y análisis, de reacción durante el desastre, de presentación ante público, entre otras, es en este apartado, donde desde la perspectiva de la guía metodológica que se planteó, se ha tratado de ubicar solamente las investigaciones concretas derivadas del evento de inundación dentro de los procesos necesarios para integrar de la forma más completa posible un análisis forense de la inundación de Tabasco. Ver *Anexo 3. Diagrama de flujo. Acciones derivadas del evento de inundación en Tabasco 2007.*

La mayoría de esas investigaciones tienen un objetivo muy particular y no una visión integral del análisis de la inundación sucedida en Tabasco en 2007. Se pudo identificar únicamente tres documentos que podrían acercarse sensiblemente al enfoque forense que en esta tesis se ha venido tratando. Estos documentos son:

- Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM). Inundaciones en la planicie costera de los estados de Tabasco y Chiapas en octubre y noviembre de 2007 (CICM, 2007).
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). Informe sobre los eventos hidrometeorológicos que afectaron a los estados de Tabasco y Chiapas y acciones realizadas por la Conagua (Conagua, 2007b).



- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, Diagnostico preliminar (IMTA, 2008).

Es con las investigaciones anteriores y las acciones de carácter más singular que se integrará un análisis forense de inundaciones. Se determinará qué análisis estuvieron dentro de los procesos planteados en la guía metodológica a través del diagrama de flujo, de igual forma se tratará en la medida de lo posible de complementar lo anterior con información generada para este trabajo. Básicamente el diagrama de flujo propuesto para la guía metodológica se puede seguir a través de las cuatro disciplinas principales tomadas en cuenta, esto es, geografía, hidrometeorología, hidráulica, y finalmente política y sociedad. Es por ello que resulta indistinto iniciar con cualquiera de los procesos una vez generado el SIG, esto hasta el momento en que las disciplinas se unen para realizar un proceso subsecuente. Para el caso que aquí se analiza se tomará el siguiente orden de procesos, no siendo éste el único posible.

Recopilación de información

- Entonces, la recopilación de información debió haberse realizado a través de las siguientes instituciones, aunque en la mayoría de las investigaciones no se reporta la fuente de ésta:
 - Información geográfica. Principalmente a través del INEGI quien cuenta con toda la cartografía necesaria ya sea en formato raster o vector. También de las acciones enlistadas, se mencionó que la Segob realizó la gestión ante la Agencia Aeroespacial Alemana para recibir imágenes satelitales de radar de alta resolución en los primeros días del desastre en Tabasco, lo cual es información importante para el análisis forense de la inundación.
 - Información hidrometeorológica. La principal fuente de información de este tipo fue la Conagua a través del SMN, quien distribuyó los boletines y pronósticos de los fenómenos meteorológicos ocurridos antes y durante el desastre. Aunque también CFE distribuyó este tipo de información a través de boletines y comunicados de prensa.
 - Información hidráulica. Esta información pudo haber sido proporcionada principalmente por la Conagua y la CFE, la primera sobre todo en cuanto a información fluvial y la segunda con información de infraestructura, principalmente del sistema de embalses en el río Grijalva.



- Información Político – Social. Todo lo relacionado con los planes nacionales está disponible en las páginas de internet del gobierno federal incluyendo los planes de emergencia de Protección Civil y los planes estatales es posible obtenerlos a través de la página de internet del estado de Tabasco. Cabe mencionar que toda esta información es sobre los planes que en la actualidad rigen, sin embargo, los planes y programas anteriores es difícil encontrarlos y conseguirlos, sobre todo si se trata de informes de avances parciales y totales, pues requieren procesos más complicados en cuanto a solicitudes de información a cada dependencia se refiere. También la información sobre atención a la emergencia está disponible en páginas de internet del gobierno así como en organizaciones de ayuda humanitaria. En ellos se incluye la información levantada en campo por estas mismas organizaciones, que van desde testimonios, vivencias y todo lo que los habitantes pudieran proporcionar. Así mismo, la información con la que disponen los medios de comunicación, pues ello proporciona datos de sucesos en forma cronológica.

Sistema de Información Geográfica

- Con lo anterior debería ser posible concentrar toda la información recopilada en un SIG. A pesar de que en ninguna de las investigaciones se reporta que se haya generado tal cual un SIG integrando todo este tipo de información, seguramente en más de una de ellas se debió aplicar. Sin embargo aquí se presenta un SIG implementado por el autor, en donde la extensión tomada en cuenta se refiere a la cuenca del río Grijalva, específicamente a la cuenca media y baja de dicho río, por lo que contiene principalmente parte del estado de Tabasco (41%) y parte del territorio de Chiapas (38%) y en menor proporción contiene a Oaxaca (1%) y Veracruz (0.1%). Ver anexo 6. *Mapa base*.

Caracterización hidrogeomorfológica de cuencas

- A partir del SIG, es posible continuar con los procedimientos. Desde la información geográfica es posible realizar la caracterización de la cuenca de estudio para lo cual es necesario generar un MDE además de integrar las características hidrológicas de la zona (ver los anexos 5. *Modelo Digital de Elevaciones* y 7. *Mapa hidrológico*). Por ejemplo, algunos de los parámetros que caracterizan hidrogeomorfológicamente la cuenca, en forma muy genérica, son: extensión de la cuenca de 38,913.5 km², con una longitud de 243.82 km, tiene una elevación máxima de 3000 msnm y una elevación mínima de 0 msnm, cuenta con una pendiente de 1.23%. Respecto al cauce principal, el río Grijalva, éste tiene una longitud de



457.47 km, con una pendiente media de 0.1%. La cuenca que se muestra en el anexo 7 cuenta con 58 estaciones hidrométricas y 152 estaciones climatológicas.

De igual forma se muestra el cambio de uso de suelo y vegetación en tiempos recientes, esto es, del año 1999 al 2005 para lo cual es necesario remitirse al anexo 8. *Mapa de uso de suelo y vegetación*. De acuerdo con el mapa de uso de suelo y vegetación se puede apreciar que para el año 1999 existía una extensión de 17,606.8 km² de selva en la cuenca del río Grijalva mientras que para el año 2005 ésta disminuyó a 11,796.2 km². Gran parte de este cambio se dio en la sierra norte de Chiapas, siendo sustituida por terrenos de pastizal inducido, agrícolas y pecuarios.

Todo lo anterior es viable complementarlo con los resultados obtenidos por el artículo "Transformación de la cuenca del río Grijalva" de Navarro y Toledo (2008) en donde se tratan los cambios en uso de suelo y vegetación que ha sufrido la cuenca a lo largo de su historia. Entonces, de acuerdo con Navarro y Toledo (2008), a partir de los gobiernos de Ávila Camacho (1940 a 1946) y Miguel Alemán (1946 a 1952), se puso en práctica un modelo de modernización de la economía nacional, transfiriendo recursos del campo a los incipientes complejos urbano-industriales. Al no contar Tabasco con una industrialización ni siquiera incipiente, se le hizo partícipe de un proyecto de modernización nacional, que resultó con un alto costo ambiental al pretender explotar las supuestas fertilidades de las tierras del trópico húmedo. Es por ello que de 1940 a 1950 se intensificó el proceso de deforestación de la selva. La selva cedió su lugar al pastizal inducido, que sería aprovechado posteriormente por los ganaderos. Después de esto, y a partir de los años sesenta la deforestación continuó su paso debido a los planes de desarrollo enfocados principalmente a dar continuidad a la modernización y urbanización, todo esto con la construcción de obras para el control de inundaciones, generación eléctrica, distribución de agua para riego, carreteras y caminos, etcétera.

Descripción de fenómenos hidrometeorológicos y Distribuciones espacio - temporales

- Dentro de la parte que se refiere a la descripción de los fenómenos hidrometeorológicos hubo tres instituciones, ya citadas en la parte superior de este apartado, que abordan dicho tema. El primero de ellos es el Colegio de Ingenieros Civiles de México, que a pesar de tomar en cuenta el tema en su informe, no se hace o no se reporta en dicho informe un análisis exhaustivo de los fenómenos hidrometeorológicos que pudieron causar las lluvias extraordinarias sucedidas en la zona. Solamente se menciona que se presentaron frentes fríos en el mes de octubre y noviembre de 2007, sin decir a cuáles frentes fríos se refieren, ni en qué días exactamente tuvieron incidencia en la cuenca, además de omitir si éstos se



combinaron con otros fenómenos hidrometeorológicos. El tema dentro de este artículo se podría tomar más como un comentario que como resultados objetivos de un análisis de los fenómenos hidrometeorológicos sucedidos. Sin embargo, por parte de la Conagua y el IMTA se realizaron análisis muy completos.

Por parte de la Conagua se identificó que el mes de octubre se caracterizó por la ocurrencia de tres eventos importantes en cuanto a precipitación, siendo estos:

- El Frente Frio No. 2, que se combinó con la circulación de una baja presión sobre Guatemala los días del 10 y 11 de octubre.
- La entrada del Frente Frio No. 4 los días 22 al 24 de octubre hacia Tabasco y Chiapas.
- Los días 28 al 30 de octubre, una masa de aire frío intensa se desplazó hacia el sur afectando el sureste del Golfo de México y el sureste del país en asociación con el frente estacionario No. 4 y la tormenta tropical "Noel" en el mar Caribe.

Esto llevó a que se presentaran precipitaciones intensas en Tabasco y Chiapas, con la distribución espacial, generada por el SMN, que se muestra en el anexo 11. *Precipitación en Tabasco y Chiapas los días 28 al 30 de octubre.*

Mientras que el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en su informe llega a conclusiones similares sobre los fenómenos hidrometeorológicos a las de la Conagua, aunque aquí presentan las precipitaciones antecedentes al evento extraordinario del 28 de octubre. La distribución espacial de dichas precipitaciones se puede observar a través del anexo 10. *Precipitaciones antecedentes al evento del 28 de octubre de 2007.* Aun ello, el IMTA además de tomar en cuenta la información del SMN también se apoyó en imágenes de satélite tomadas de *Unisys Weather Satellite* (anexo 9. *Imágenes de satélite para los días 18 al 31 de octubre*) y simulaciones de precipitación generadas por ellos mismos.

Aparte de las distribuciones espaciales generadas por el SMN y tomadas por la Conagua e IMTA para el análisis y generación de sus reportes, el IMTA generó una distribución espacial de la precipitación del 28 de octubre al 3 de noviembre confinando principalmente en ella la influencia que se tuvo debido al Frente Frío No. 4, esto únicamente para la cuenca de la presa Peñitas. Ver anexo 12. *Distribución de la precipitación del día 28 octubre al 3 de noviembre de 2007 para la cuenca de la presa Peñitas.* Esta distribución es útil en el sentido de complementar la información del proceso anterior, en forma más puntual.



Análisis probabilístico de frecuencias

- A partir de lo anterior se encuentra una ausencia de procesos, de acuerdo con lo que se plantea en la guía metodológica, lo cual no quiere decir que no hayan sido realizados, sin embargo en los informes es poco o nulo lo que se menciona al respecto. El IMTA realizó un análisis probabilístico de frecuencias para lluvias, con lo que se obtuvo que las precipitaciones máximas presentadas tienen periodos de retorno menores que 50 años (Tabla 4.1).

Precipitación (mm)			
Estación/Duración	24 horas	48 horas	72 horas
Peñitas	219.8	402	429
Sayula	255	459	513
Ocotepec	416.5	698	810
Periodo de Retorno , T (años)			
Estación/Duración	24 horas	48 horas	72 horas
Peñitas	8	46	17
Sayula	5	46	23
Ocotepec	13	17	18

Tabla 4.1 Precipitaciones asociadas con un periodo de retorno.

Revisión de obras hidráulicas y de protección

- A continuación procedería la revisión de las obras hidráulicas y de protección de la zona. En este caso las obras que son tomadas como prioritarias para los análisis son el sistema de embalses del río Grijalva, enfocándose principalmente en la presa Peñitas por ser la más cercana geográficamente a Tabasco y que podría haber tenido mayor influencia en las inundaciones sucedidas. El IMTA realizó un análisis exhaustivo de la operación que tuvo la presa Peñitas con lo que llegaron a las siguientes conclusiones. Debido a las lluvias que se presentaron en Tabasco los primeros días de octubre (del 2 al 17 de octubre), la presa Peñitas registró caudales de ingreso cercanos o superiores a 2,000 m³/s (Figura 4.1).

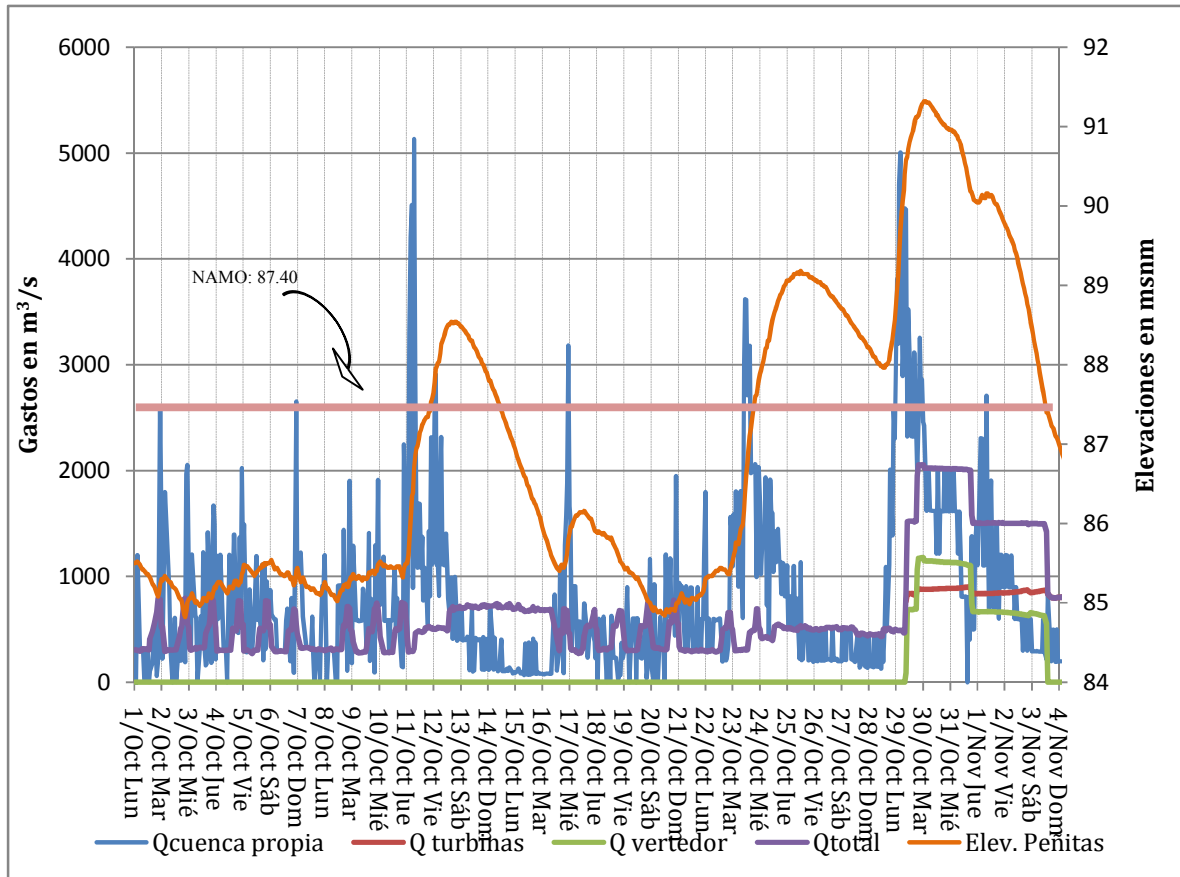


Figura 4.1 Funcionamiento de la presa Peñitas del 1 de octubre al 4 de noviembre de 2007.

Tomada de IMTA (2008).

Específicamente los días 11 y 12 de octubre ingresó una creciente con caudal superior a los $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$, la cual fue desalojada siguiendo los procedimientos convencionales de operación (Figura 4.2). Sin embargo, los días 23 a 26 de octubre, se presentó una segunda creciente con un gasto pico de más de $3,500 \text{ m}^3/\text{s}$ que elevó el nivel de la presa cerca de la cota 89 msnm, nivel por arriba del NAMO (87.40 msnm), que estaba siendo desalojada únicamente a través de las turbinas, decisión tomada por el Comité de Operación de Presas Regional a cargo de la Conagua, la CFE y el gobierno de Tabasco. El vertedor de excedencias no fue operado en ese momento a fin de no aportar mayores caudales a los ríos Samaria y Carrizal. Con esta política se logró disminuir el nivel de la presa un metro quedando en 88 msnm, unos cuantos centímetros por arriba del NAMO. El 29 de octubre se presentó una creciente aun mayor, de alrededor de $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que fue necesario operar, además de las turbinas, el vertedor de excedencia, descargando hasta $2,055 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante los días subsiguientes y hasta el 1 de noviembre continuaron ocurriendo crecientes sucesivas de

entrada al vaso de entre 2,000 y 3,000 m³/s, lo que obligó a continuar descargando gastos importantes.

Cabe mencionar que los gastos de ingreso a la presa Peñitas fueron calculados por personal de la CFE utilizando técnicas convencionales de tránsito inverso (antitránsito), las cuales presentan oscilaciones espurias (Aldama y Aguilar, 1996). La aplicación de procedimientos modificados de antitránsito conduce a que el gasto máximo de la avenida de entrada del 29 de octubre alcanza solamente 4,000 m³/s (Aguilar, 2009).

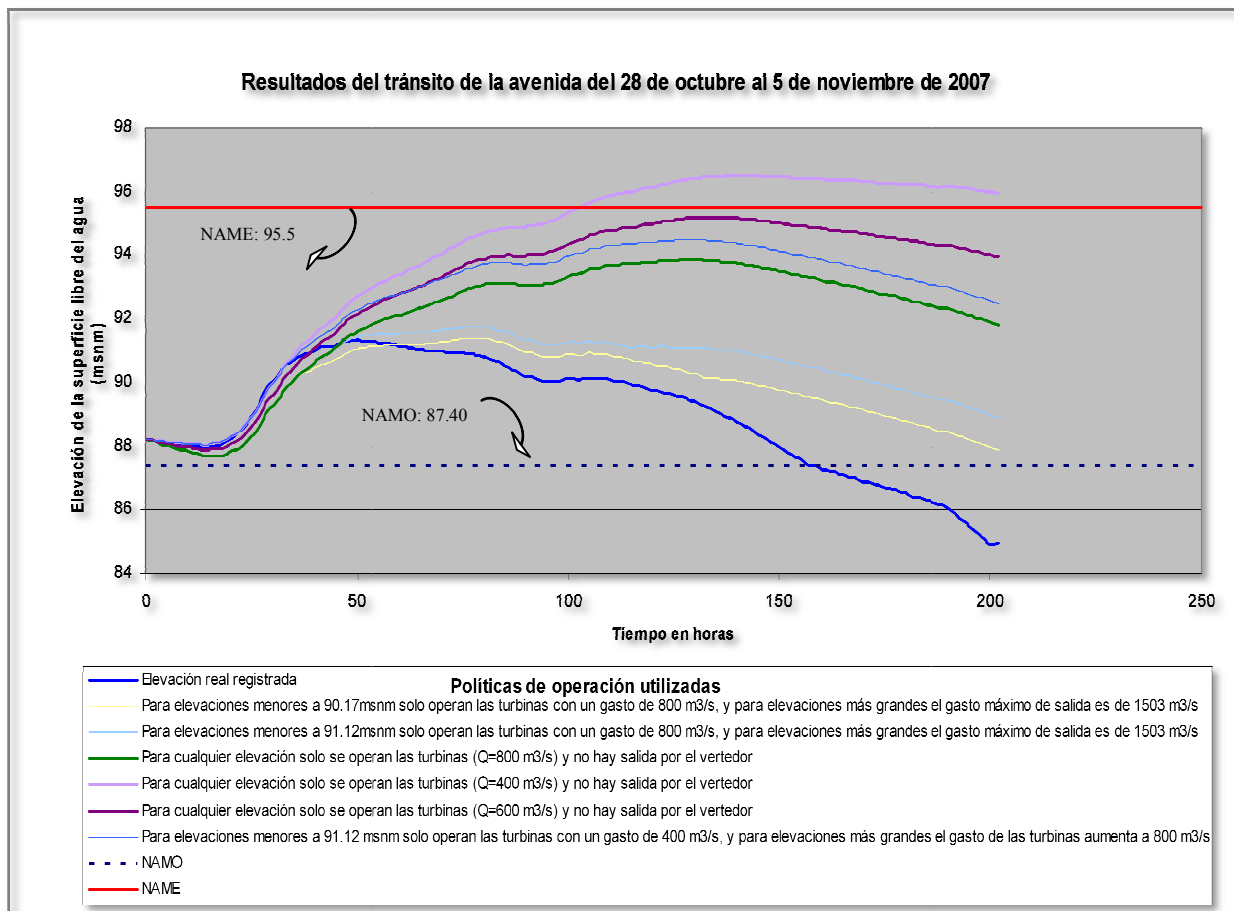


Figura 4.2 Tránsito de avenidas en la presa Peñitas para diferentes condiciones de operación.

Tomada de IMTA (2008).

Por parte de la Conagua no se reporta un análisis como el anterior, solo describen en forma grafica general el sistema de presas del río Grijalva y se mencionan sus niveles de operación. Finalmente el CICM también aborda el tema, que aunque va mas allá de las características del sistema de embalses, no logra tener la profundidad que se tiene en el informe del IMTA.



El CICM solo concluye que las tres presas del río Grijalva controlaron en un 100% las avenidas que recibieron, sin descargar caudales hacia la presa Peñitas. Además se estimó en forma preliminar el volumen llovido en la región al multiplicar la superficie inundada de más de 20,000 km² por la altura de lluvia de 1 m, lo que condujo a un volumen de 20,000 Mm³. El volumen extraído de la presa Peñitas en los días que ocurrió el desastre fue de 600 Mm³, el que se comparó con el volumen total obteniendo que la aportación de la presa Peñitas fue de sólo de 3%, lo cual a nivel de lo que se pretende determinar con este tipo de análisis resulta demasiado simplista.

Modelación y simulación de la red de cauces, llanuras de inundación y zonas urbanas

- Una vez habiendo revisado las obras hidráulicas y de protección existentes en el sistema que se estudió, se está en posición de realizar una modelación y simulación del comportamiento de la red de cauces, tomando en cuenta por supuesto, los factores que intervienen en este comportamiento, como lo es la erosión, socavación, niveles de descarga y todos aquellos que se involucren en el proceso.

Fue el IMTA y el CICM quienes abordaron el tema del análisis de las mareas para involucrar su influencia en el funcionamiento de los cauces. El IMTA con base en la información que les proporcionó la Semar y apoyados en el análisis de los fenómenos hidrometeorológicos, determinaron que los vientos que se generaron por el Frente Frio No. 4 ocasionaron una marea de tormenta (sobreelevación del nivel del mar), lo que contribuyó a disminuir la capacidad de descarga del río Grijalva. La marea de tormenta sumada a la astronómica alcanzó casi un metro sobre el nivel del mar.

Además, el mismo IMTA realizó una simulación del oleaje para el día 23 de octubre el cual se puede apreciar en el anexo 13. *Altura significativa del oleaje debido al Frente Frio No. 4*, sin embargo para ver la evolución de las alturas del mar se muestra la figura 4.3. Esta situación provocó un efecto de remanso del flujo hacia aguas arriba de la desembocadura del río Grijalva hacia el Golfo de México. Se conjuntó estos resultados con los generados por el IMP para el mismo informe, con lo que se determinó que a pesar del efecto de remanso provocado por los efectos de la marea, durante los días de la inundación, ello no tuvo influencia mas allá de 25 km aguas arriba de la desembocadura. La Conagua por su parte no abordó el tema y el CICM siguiendo la presentación de su informe, no abunda mucho en el tema, sin embargo llega a la misma conclusión dictada por el IMTA.

Por otra parte, la Conagua toca el tema de la evolución de los niveles en los ríos de la planicie tabasqueña, sin embargo no abunda mucho en el tema, y solo presenta las graficas de dicha

evolución, que se muestran en la figura 4.4, sin detallar resultados concluyentes sobre ello. Por su parte el IMTA, de acuerdo con los registros de las estaciones hidrométricas presentes en la zona, generó los hidrogramas que se produjeron en algunos de los puntos de control (Figura 4.5). Con ello y los procesos anteriores concluyen que debido a las precipitaciones anteriores al evento extraordinario del 27 al 29 de octubre ya se habían generado condiciones de alerta, pues los niveles en los ríos provenientes de la sierra alcanzaron sus cotas críticas en los días 24 y 25 de octubre. Esto se puede verificar con lo observado en la figura 4.4. Adicionalmente, con esas lluvias antecedentes, los suelos de la cuenca se encontraban con altos contenidos de humedad, lo que ocasionó que una gran proporción de las precipitaciones posteriores ya no se infiltrara y se convirtiera en escurrimientos.

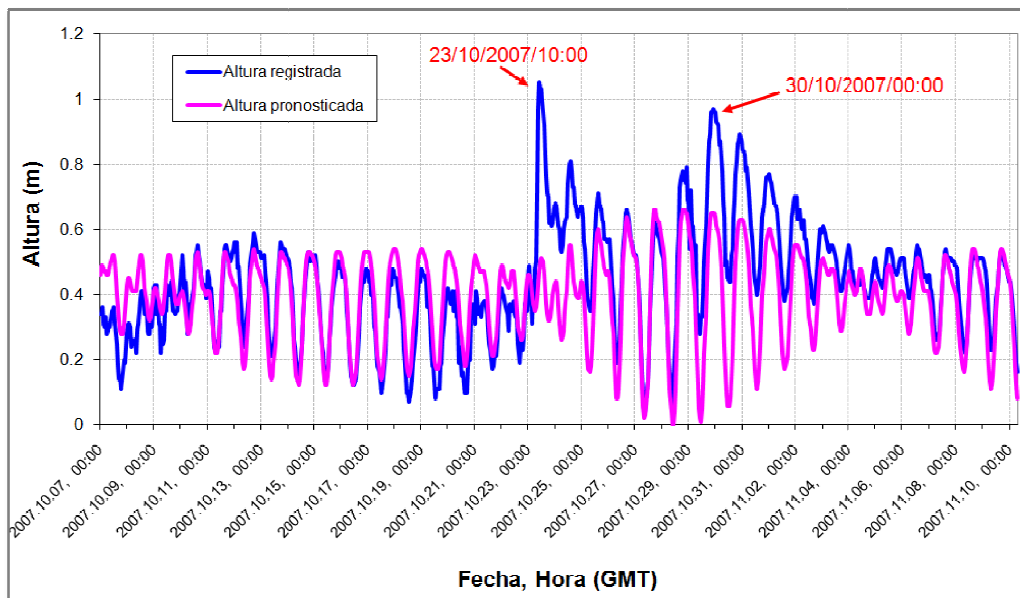


Figura 4.3 Mediciones del nivel del mar en la estación de Frontera, Tabasco.

Nivel de referencia Bajamar Media (cero centímetros) en horario GMT. Tomada de IMTA (2008).

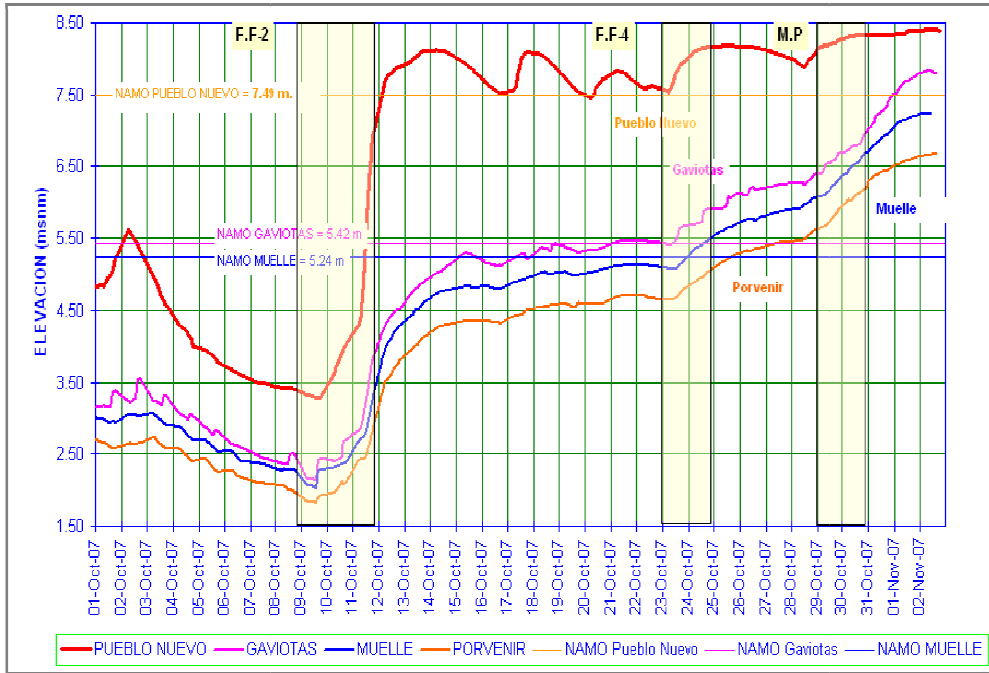


Figura 4.4 a) Evolución de los cauces de la planicie tabasqueña.
Tomada de Conagua (2007b).

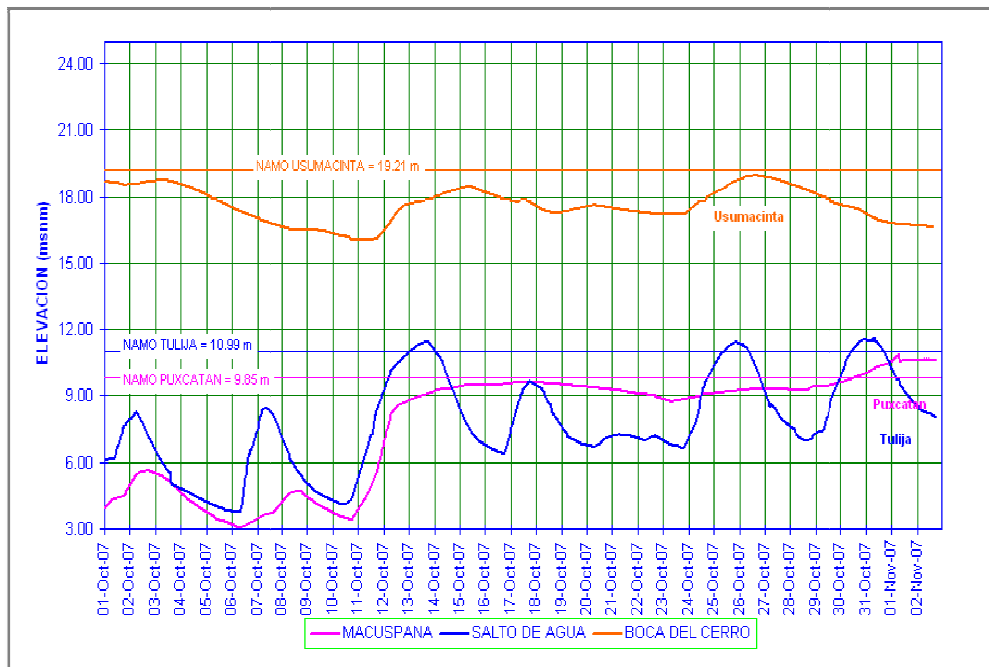


Figura 4.4 b) Evolución de los cauces de la planicie tabasqueña.
Tomada de Conagua (2007b).

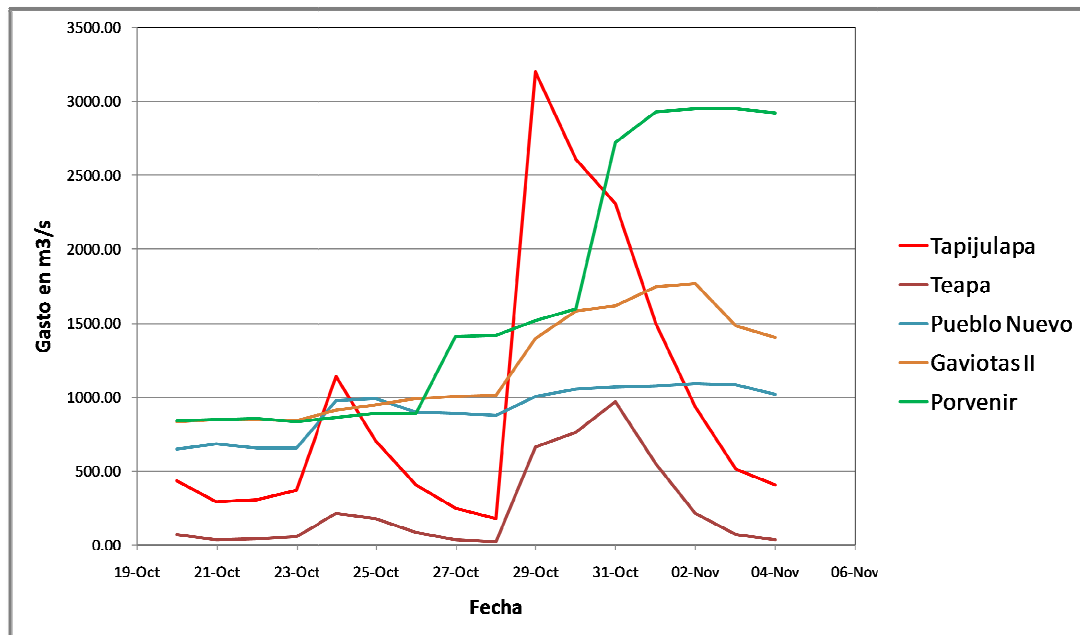


Figura 4.5 Hidrogramas producidos.

Tomada de IMTA (2008).

Revisión de planes y programas de acción y desarrollo

- El IMTA aborda un poco la cuestión de la evolución histórica de la red hidrográfica de la cuenca Grijalva – Usumacinta, en donde se relata que las culturas como la Olmeca y la Maya lograban desarrollar una estrecha vinculación con su medio ambiente, relacionando la cuenca hidrológica con los sistemas costeros y marinos, lo que les permitió establecer pueblos a las orillas de los ríos. De acuerdo con el trabajo realizado por Navarro y Toledo (2008), el cual se ha completado con el trabajo de Álvarez *et al.* (2004), desde la conquista, los pobladores provenientes de climas templados, que arribaron a Tabasco, preferían vivir en zonas altas de la sierra, que aunque más lluviosa, era menos calurosa, además de estar a salvo de las inundaciones de la planicie. Esta concepción de ocupación del espacio, hizo que quedaran prácticamente deshabitadas las zonas lagunarias y los asentamientos fluviales. Esto se vino a pique cuando en el tiempo de Ruíz Cortines se inició el proyecto de explotación del trópico húmedo, apoyado por el Banco Mundial, con lo que se consideraba que se podían explotar dos millones de hectáreas de tierras fértiles y casi deshabitadas, así como construir grandes presas, para la generación de energía y control de inundaciones. Una vez establecida la primera central hidroeléctrica (Malpaso) en la selva se da paso a los planes de desarrollo agrícola que incluían la creación de poblados dentro de las regiones



tropicales para obtener beneficios para productores y para esas regiones. Entre esos planes se encuentra el conocido Plan Chontalpa, el cual tenía como objetivos mejorar las condiciones de vida de los campesinos y contribuir a la producción agrícola del país. Éste se desarrollaría en la inmensa planicie de aluvión de 800,000 hectáreas, ubicada entre Ciudad Cárdenas y Huimanguillo, y de la región de la Chontalpa, una parte se ubica en la llanura de inundación en donde se encuentra la llamada “Olla de la Chontalpa”. Para este plan se llevaron a cabo acciones de desmonte para las obras de infraestructura, obras de beneficio social, redistribución de la población campesina, construcción de poblados y viviendas en núcleos organizados con todos los servicios, investigación agropecuaria y asistencia técnica. Con este plan la región se transformó, pues el escurrimiento del agua se vio incrementado, por la carencia de raíces que impidieran su libre curso, además de acelerar el proceso de deforestación que estaba sufriendo Tabasco.

Es importante resaltar que se realizó la búsqueda de avances de los últimos planes antes de que ocurriese el desastre, esto es, planes estatales de desarrollo del periodo 2001 a 2006, obteniéndose que existe poco de ello. Lo más cercano que se tiene son los informes de gobierno, los cuales contienen información muy escueta sin gran detalle.

En cuanto a los programas que se han realizado principalmente para el control de inundaciones, el IMTA realiza un análisis del Programa Integral para el Control de Inundaciones (PICI). Este programa nació a partir de las inundaciones de 1999 y fue creado el 2 de abril de 2003 como medio de solución a la problemática de las inundaciones en la ciudad de Villahermosa. Con este proyecto se buscaba brindar de protección contra lluvias extraordinarias y crecientes en los ríos Samaria, Carrizal, La Sierra y Grijalva, confinando las corrientes, conduciendo los excedentes lejos de los centros urbanos para evitar daños a la población y a la actividad productiva, acelerando en lo posible la salida de los escurrimientos hacia el mar y disminuyendo significativamente el riesgo de una inundación catastrófica. Los tres sistemas hidráulicos en que intervino el PICI fueron el Mezcalapa – Samaria, los ríos de la sierra y el Carrizal – Medellín. Las obras hidráulicas que conformaron el proyecto fueron la construcción de bordos y protecciones marginales para estos ríos y sus vertientes, así como drenes, estructuras de cruce y desazolve de cauces naturales y drenajes. El avance que cita el IMTA en su informe para estas obras al 2006 es del 70%. Una estructura clave para el funcionamiento correcto del conjunto de obras planteadas por el PICI es la estructura de control sobre el río Carrizal, la cual para el 19 de enero de 2007 llevaba un avance del 55%. De acuerdo con el diseño de dicha obra, ésta debería permitir el paso de un caudal máximo de 850 m³/s. Sin embargo, durante el desastre de Tabasco en 2007, operó parcialmente dando paso a un caudal mayor.



Finalmente, en cuanto a programas respecta, resta mencionar el análisis realizado por Arias (2009), en donde lleva a cabo una investigación exhaustiva sobre la aplicación y seguimiento de los fondos proporcionados por el FONDEN principalmente para la emergencia de 2007. Resultan importantes las observaciones que allí se realizan, pues son un medio para indicar que tan eficientes han sido los recursos destinados al estado de Tabasco. Desde la aparición del FONDEN como instrumento de apoyo a desastres naturales, Tabasco ha recurrido al fondo en siete ocasiones, esto hasta antes de las inundaciones de finales de 2007, en su mayoría por causa de lluvias e inundaciones. Mediante la tabla 4.2 se desglosan los apoyos recibidos en Tabasco por año.

Año	Fenómeno	Recursos federales autorizados (pesos)
1999	Lluvias e inundaciones	1,101'390,000
2000	Lluvias e inundaciones (ampliación 1999)	12'481,000
2002	No especifica	Apoyo en especie
2003	Tormenta tropical Larry	17'262,400
2005	Ciclón tropical Stan	3'400,000
2007 (febrero)	Lluvias extremas e inundaciones	Apoyo en especie
2007 (febrero)	Lluvias extremas e inundaciones	471'539,351

Tabla 4.2 Apoyos del FONDEN para el estado de Tabasco.

Tomada de Arias (2009).

Integración de análisis hidrológicos e hidráulicos con otros factores

- Prácticamente se han finalizado ya los análisis que involucran cuestiones técnicas hidrológicas e hidráulicas. Es el momento de realizar una integración de todos ellos incluyendo factores que no corresponden a estas disciplinas y todos aquellos no tomados en cuenta aun. En los tres informes que se han citado aquí, solo el IMTA continúa con los análisis, ya que los dos informes restantes terminan en cuestiones hidráulicas, determinando desde allí las causas que originaron tal magnitud de desastre en Tabasco. Para el IMTA el factor que queda por ser mencionado antes de llegar al manejo de la emergencia, es la vulnerabilidad y gestión integrada de crecientes. Mas que ser un análisis, el tema está enfocado a recomendaciones, debido a que en Tabasco más que la gestión integrada de crecientes se han visto acciones que se manejan por el lado de lo estructural, no siendo siempre el mejor camino. El IMTA concluye en este tópico, que en Tabasco el uso del suelo presenta una extendida problemática de urbanización, que en su mayoría se han instalado en zonas inundables, lo que en primera instancia los convierte en poblaciones vulnerables. Además, el cambio en el uso de suelo forestal a agrícola, tema que se trató en la caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca, y la acumulación de azolve en cauces, se



suman como factores para volver aun más vulnerables a dichas poblaciones. Las zonas urbanas ya identificadas como especialmente vulnerables, se encuentran en la periferia de la ciudad de Villahermosa, justamente en las inmediaciones de los ríos La Sierra y Carrizal. Pero es deber del analista determinar las causas que han favorecido que dichas zonas se vayan convirtiendo en vulnerables con mayor riesgo cada vez. Es por eso que se debe estudiar los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo planteados para Tabasco, siendo quizá estos factores los de mayor importancia en esta parte de la integración con los análisis hidrológicos e hidráulicos.

Generación de mapas de inundación y determinación de afectaciones

- Así pues, uno de los resultados del análisis forense de inundaciones es la generación de mapas de inundación, tanto teóricos como reales del evento, con los cuales es posible hablar de zonas de riesgo y zonas afectadas respectivamente. Esas zonas afectadas darán pie para otro resultado, el cual es la cuantificación de los daños en esa extensión. A través del SIG que se implementó para completar los informes aquí insertados, y con información de INEGI fue posible realizar un mapa de zonas de riesgo superpuesto a la zona que resultó inundada, información tomada de *Dartmouth Flood Observatory* (Anexo 14. *Mapa de inundación*), en donde se muestran las zonas potencialmente inundables de la cuenca del río Grijalva y por supuesto de Tabasco, así como la zona inundada por el evento en 2007. Se debe recordar que la zona de estudio aquí analizada es la cuenca del río Grijalva, en su parte media y baja, por lo que no se consideró la totalidad de Tabasco, sino solamente el 41% de éste. Superpuesta a su vez dicha información a los registros de población de la zona de estudio se obtienen las localidades que si se mantienen en su ubicación es posible sufran afectaciones por inundación, así como las zonas que en realidad y debido a la inundación que se estudia resultaron afectadas. Esto es, de acuerdo con INEGI, 286 localidades, 152,583 habitantes y 34,237 viviendas están en riesgo, mientras que para la inundación de 2007, de acuerdo con *Dartmouth Flood Observatory*, 350 localidades, 538,101 habitantes y 137,738 viviendas resultaron afectadas realmente.

Lo anterior está totalmente enfocado a la población y no al sector productivo, ni a la cuantificación de los daños materiales en otros sectores. Es así como el trabajo "Inundaciones en Tabasco: Evaluación socioeconómica" coordinada por CEPAL y CENAPRED, toma relevancia, pues a través de este estudio es como se tiene acceso a la información restante. Se realizó una evaluación sectorial, conformada por: sectores sociales, mediante vivienda, salud y educación; y sectores productivos, tomando en cuenta bienes de la agricultura e industria, servicios como comercio, turismo, etc., infraestructura como



transporte, comunicaciones, energía, agua y saneamiento. Es con esto que se llega a la cuantificación de los daños en todo Tabasco (Tabla 4.3):

Sumando los referente a la tabla 4.3 a otras cuantificaciones, se tiene que en conjunto, los daños y pérdidas causados por el desastre ascendieron a 33.2 miles de millones de pesos, equivalentes a mas de 3,100 millones de dólares. El impacto de desastre representó 18.5% del PIB estatal y en cifras acumuladas, el impacto monetario mayor se registró en los sectores productivos (58.3%) del total de efectos, influidos por las considerables pérdidas en el sector agrícola y en el sector comercio.

A pesar de distinguir entre las acciones el “Censo de verificación de daños en vivienda” por parte de Sedesol y la evaluación de daños que llevó a cabo Protección Civil, no fue posible ubicar y acceder a los resultados que ello generó.

Sector	Daños	Pérdidas	Total
Productivo			
<i>Agricultura</i>	950.3	7,962.2	8,912.5
Otros sectores productivos			
<i>Comercio</i>	3,387.8	1,908.2	5,296.0
<i>Industria manufacturera y construcción</i>	1,128.7	458.6	1,587.3
<i>Servicios</i>	2,508.1	875.4	3,383.5
<i>Turismo y restaurantes</i>	171.2	108.6	279.8
Sectores sociales			
<i>Vivienda</i>	2,526.3	20	2,546.3
<i>Salud</i>	687.6	1,396.2	2,083.8
<i>Educación</i>	682.6	446	1,128.6
<i>Cultura</i>	153.9	61	214.9
Infraestructura			
<i>Carreteras</i>	3,895.1	10.1	3,905.2
<i>Puertos</i>	19.5		19.5
<i>Energía</i>		48	48
<i>Agua y saneamiento</i>	408.1	101.1	509.2
<i>Obras hidráulicas</i>	1,200.0		1,200.0
Total	17,719.2	13,395.4	31,114.6

Tabla 4.3 Resumen de daños en millones de pesos para Tabasco por la inundación de 2007.



Análisis del manejo de la emergencia

- Respecto a análisis del manejo de la emergencia en Tabasco en el año 2007, el IMTA realiza observaciones muy interesantes acerca de este tema, pues menciona en su informe que a pesar de haberse emitido boletines meteorológicos a partir del 27 de octubre a las 14 horas, la información no fue lo suficientemente clara y objetiva. En ellos se usó lenguaje de tipo cualitativo con información como “lluvias fuertes en centro, oriente y sur de Tabasco” y cuantificaciones poco indicativas como “Lluvias mayores que”. Se recopilaron los boletines meteorológicos del Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales emitidos por Protección Civil a través de la Dirección de Administración de Emergencias. Estos boletines corresponden a los días 23 de octubre al 8 noviembre. En éstos además de contener información sobre fenómenos meteorológicos de escala sinóptica, también muestran información de fenómenos de mesoescala, con el mismo nivel de profundidad que lo que expresa el IMTA. Sin embargo, cabe mencionar que estos boletines contienen un espacio en el que mencionan la etapa en la que se encuentra la zona de incidencia del fenómeno que se trate, con leyendas como “Aviso, Alerta, Emergencia y Alarma”. En el caso de los boletines emitidos en las fecha (24 y 25 de octubre, 28 de octubre al 1 de noviembre) del desastre, se manejaron etapas casi permanentes en “Alerta” con poca alternancia hacia etapa de “Aviso” y nunca tocando la etapa de “Emergencia” y mucho menos la de “Alarma”. Finalmente y recordando el SAH instalado en Villahermosa, Tab., éste fue probado por primera vez en el evento de inundación que aquí se analiza, sin embargo y según los afirman los especialistas del CENAPRED (Reforma, 29 de noviembre de 2007), la alerta general funcionó pero aun así debe realizarse una revisión de los umbrales con los cuales opera el sistema. Lo anterior deja en entredicho la eficiencia del SAH, pues no se menciona cabalmente si este funcionó o se vio sobrepasado por el evento.
- Discovery Channel, a través de su documental “Tabasco bajo el agua”. Durante un año se reunió material de las zonas afectadas por las inundaciones de 2007 en Tabasco. El documental está enfocado principalmente al manejo de la emergencia, esto es, cómo reaccionó principalmente el gobierno estatal y el apoyo recibido por el gobierno federal. Se muestra un panorama humano del desastre más que técnico, y cuando se abordan cuestiones técnicas se hace de una forma muy conservadora, tratando de no comprometer a ninguna autoridad involucrada. Sin embargo, se cumple la finalidad del programa, la cual es evidenciar y decir, cuales son los problemas que dirigieron a Tabasco hacia este tipo de desastres.



Establecimiento objetivo de causas, efectos, y lecciones

- De acuerdo con todos los análisis anteriormente presentados, cada una de las instituciones llega a sus conclusiones. La Conagua, más que concluir, simplemente considera la presencia del fenómeno de la Niña como causa de los registros extraordinarios de lluvia. Dejan abierta la opción de que una vez superada la contingencia, se proceda al análisis hidrológico del comportamiento de los ríos en los estados de Tabasco y Chiapas y al replanteamiento de las obras requeridas para incrementar el grado de seguridad hidrológica de los centros de población. Por lo que respecta al CICM en su informe señalan la urgencia de destinar mayores inversiones a la prevención de desastres por inundaciones, aunque esta institución enfoca esa urgencia simplemente a proyectos de infraestructura. Los dos documentos anteriores no establecen causas en forma objetiva, debido a la ausencia de procesos que validen dicha objetividad, sin embargo son validas las observaciones que ellos hacen. Finalmente, el IMTA determina, a través de todos sus análisis, de una forma muy concreta, causas inmediatas y mediatas. Las causas inmediatas de las inundaciones fueron establecidas por las lluvias extraordinarias, especialmente por su duración, en la cuenca de los ríos de la sierra y en la cuenca de la presa Peñitas. Adicionalmente a esto, las crecientes no ocurrieron de manera aislada, sino en un tren de crecientes sucesivas. Las causas mediatas se establecieron en la presencia de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo que además de incrementar la vulnerabilidad de las poblaciones, también disminuye la capacidad de conducción de los cauces; la falta de infraestructura hidráulica de control en los ríos de la sierra y el río Usumacinta, incluido el PICI y su truncada conclusión hasta antes de la ocurrencia del evento; la carencia de un mejor sistema de pronóstico y de alerta temprano con lo que sea posible emitir boletines y pronósticos precisos a tiempo real; y la falta de un manejo integral de crecientes lo que se manifiesta en el uso desordenado del suelo, la deforestación de la cuenca y la carencia de mapas de riesgos. Ante todo esto, el IMTA recomienda realizar un estudio completo y detallado de las inundaciones en Tabasco, para con ello no sólo disminuir la probabilidad de que pueda repetirse un evento con tal impacto, sino también para extraer las lecciones y aprendizaje que permitan entender las acciones y recomendaciones a otras regiones de México también en peligro. Además de recomendar la realización de dicho estudio, recomienda también sean tomadas en cuenta las siguientes recomendaciones mas particulares:
 - Realizar un inventario de los daños generados por la inundación
 - Revisar y terminar la infraestructura prevista en el PICI
 - Realizar un estudio exhaustivo de las condiciones físicas de la cuenca, en cuanto a uso de suelo y vegetación



- Implementar programas de prácticas conservacionistas en las partes agrícolas inscritas en la cuenca para incrementar los tiempos de concentración
- Estudiar estrategias para desalojar en forma rápida volúmenes almacenados en las planicies por efecto de la infraestructura de comunicaciones existentes
- Implementar un sistema de meteorológico automatizado de monitoreo en tiempo real y pronóstico numérico para el complejo hidroeléctrico del río Grijalva
- Determinar y actualizar mapas de inundación y riesgo
- Relocalizar poblaciones vulnerables
- Mejorar la información y aplicación del manejo de emergencias en etapas previas y de alerta
- Preparar a la sociedad para enfrentarlas con éxito, de manera que no se produzcan daños de consideración
- Cualquier programa de control de crecientes debe adoptar un enfoque moderno de gestión integrada de crecientes

Desde la perspectiva de la guía metodológica, el Informe realizado por el IMTA, del que después surgió el artículo "Causas, consecuencias y lecciones aprendidas de las inundaciones de 2007 en Tabasco y Chiapas, México" de Ramírez *et al.* (2008), es un acercamiento claro hacia el análisis forense de inundaciones en México, pues trata, en comunión con las premisas de las ciencias forenses, esclarecer las causas que provocaron el fallo o agravaron el impacto de la inundación. Además, muestra la precisa integración de los diversos análisis necesarios en este tipo de investigaciones, aun ello y de acuerdo con la guía que en esta tesis se plantea, fueron necesarios más análisis y procedimientos que no se realizaron o por lo menos en su documento no fueron reportados.

Así pues, por todo lo vivido, por las lecciones aprendidas y la necesidad inminente de protección ante inundaciones, se ha reconocido la necesidad de formular un plan que permita determinar el conjunto de acciones y programas de mediano y largo plazo que permitan disminuir la vulnerabilidad y los niveles de riesgo frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos. De acuerdo con UNAM (2007), el 16 de noviembre de 2007, los titulares de la Conagua y de la CFE, junto con el gobierno del estado de Tabasco, convinieron en solicitar a la UNAM, por conducto de su Instituto de Ingeniería, coordinar los esfuerzos necesarios para la formulación del Plan Hidráulico Integral de Tabasco (PHIT), encaminado a presentar alternativas de solución a la problemática que enfrenta esta entidad, conforme a una perspectiva de corto, mediano y largo plazo. Mediante este plan se pretende diagnosticar el sistema hidráulico actual de Tabasco, caracterizar el evento de noviembre de 2007, aprender de las lecciones y generar y evaluar alternativas de solución. Debido a la investigación y al desarrollo de metodologías que se pretenden ejecutar dentro del PHIT, se



tendrá en México el primer contacto con análisis del tipo que a través de esta guía se plantea. Estas metodologías son:

- Gestión de crecidas
- Redes de medición
- Modelación matemática. Relaciones Lluvia – Esguerrimiento
- Modelación de las capacidades de conducción de cauces
- Modelación matemática y física de llanuras de inundación
- Simulación hidrológica de los ríos y sus aprovechamientos
- Modelos de optimización de políticas de operación
- Procesos costeros
- Modelos de desarrollo urbano
- Evaluación de humedales y otros ecosistemas
- Metodologías de análisis socioeconómico
- Análisis de aspectos jurídicos
- Evaluación y programación de inversiones
- Modelos de planeación participativa
- Plan de manejo de la cuenca del río Grijalva

El presupuesto total sólo para la formulación de este plan asciende a la cantidad de 232'075,000 de pesos, sin considerar el impuesto al valor agregado y el programa de trabajo se establece desde diciembre de 2007 hasta diciembre de 2009.

4.6 Conclusiones

La cuenca Grijalva - Usumacinta, en donde se ubica la mayor parte del estado de Tabasco, en octubre y noviembre de 2007 tuvo una gran incidencia de lluvias extraordinarias, a causa de una combinación de varios fenómenos meteorológicos. Tabasco sufrió una de las mayores y más catastróficas inundaciones de su historia, pues se vio cubierto de agua en un 80% de su territorio. Aunque la magnitud del evento inundante realmente fue extraordinaria, hubo otros factores determinantes en el impacto del desastre en Tabasco y más aun, en la ciudad de Villahermosa, quien se encuentra rodeada por el sistema de ríos de la cuenca.

Las causas que la sociedad identifica como agravantes del desastre de 2007 son precisamente los fenómenos meteorológicos y la marea astronómica y de tormenta, también la construcción de obras hidráulicas, mal manejo y operación de las presas hidroeléctricas de la zona y mala planeación y uso indebido de recursos para obras contra inundaciones, finalmente se acusa a la deforestación y la falta de prevención de desastres como causantes del desastre. Oficialmente se aceptaron los factores



como fenómenos meteorológicos y simultaneidad de eventos como los principales causantes del desastre.

A partir del análisis de las acciones realizadas en Tabasco desde la perspectiva de la guía metodológica, se puede establecer lo siguiente:

Las culturas prehispánicas sabían cómo vivir y relacionarse con el medio que les rodeaba, satisfacer sus necesidades y protegerse de los riesgos. Siendo la mayoría de estas culturas, poblaciones establecidas en zonas fluviales de Tabasco. A la llegada de los españoles a México, se inició un cambio en la concepción del espacio por lo que las zonas fluviales quedaron prácticamente deshabitadas, ocupándose mayormente las zonas altas que aunque más lluviosas se consideraban más seguras respecto a las inundaciones. La concepción cambio notablemente a partir de los años sesentas, con la búsqueda de explotación de zonas fértiles como las fluviales, mediante actividades productivas como agricultura, ganadería y la industria petrolera. Con ello se dio auge al asentamiento de poblaciones en zonas bajas para estar en cercanía con los centros productivos, con su respectivo desarrollo. El desarrollo fue llevado siempre con fines productivos y aunque hubo grandes inversiones para las construcciones de estructuras de control, nunca se estableció un ordenamiento territorial adecuado. El medio ambiente a nivel de cuenca, sufrió grandes cambios y tan agresivos, que a pesar de la aplicación de ciertos planes y programas ha sido insuficiente para contrarrestar la respuesta que se aprecia en la magnitud de las últimas catástrofes en Tabasco causadas por inundación. Todo lo anterior resume en buena medida los factores históricos, que contribuyeron al evento de inundación de 2007.

Existen tres documentos que se pueden considerar como los más integrales de todos aquellos realizados con dicho fin. Estos documentos son: Inundaciones en la planicie costera de los estados de Tabasco y Chiapas en octubre y noviembre de 2007 por el Colegio de Ingenieros Civiles de México, Informe sobre los eventos hidrometeorológicos que afectaron a los estados de Tabasco y Chiapas y acciones realizadas por la Conagua y finalmente, Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, Diagnostico preliminar por el IMTA.

De los tres documentos citados, solo uno de ellos cumple en su mayoría con la metodología del análisis forense de inundaciones, éste es el realizado por el IMTA. Pues trata de esclarecer las causas que provocaron el fallo o agravaron el impacto de la inundación. Además, muestra la precisa integración de los diversos análisis necesarios en este tipo de investigaciones. Con base en todos los análisis realizados, el IMTA recomienda principalmente realizar un estudio completo y detallado de las inundaciones para prevenir sus efectos negativos y para extraer las lecciones y aprendizaje. En los documentos restantes se realizan análisis muy someros de cada uno de los temas abordados,



además de que éstos resultan mínimos, lo que hace que el establecimiento de causas sea poco objetivo.

Ahora, en cuanto a la caracterización del evento con base en los análisis anteriores se tiene que en la cuenca alta y media del río Grijalva se identificó como un evento múltiple con inundaciones ribereñas resultado de lluvias copiosas usualmente continuas para un periodo de días sobre el área. El suelo se saturó y al no darse abasto con los volúmenes de agua, generó escurrimientos hasta provocar el desbordamiento de éstos. Además fue de un tipo torrencial con un incremento en los niveles por el rango de los metros, lo que provocó grandes daños. En la cuenca baja la inundación fue del tipo estuarina como resultado de la combinación de la elevación del nivel de la marea, y la inundación ribereña causada por precipitaciones tierra adentro.

Los factores relacionados que se identifican como agravantes de acuerdo con la aplicación preliminar de la guía metodológica son:

1. Excesiva precipitación debido a frentes fríos y masas polares
2. Modificación de las condiciones de frontera aguas abajo debido a la sobreelevación del nivel del mar por marea astronómica (pleamar) y marea meteorológica, esta ultimo causado por la influencia del Huracán Noel
3. Urbanización alta y deforestación
4. Asentamientos irregulares en zonas de riesgo
5. Insuficiencia de infraestructura de protección eficiente en cuencas libres como la del sistema de ríos de la sierra y la del río Usumacinta
6. La presa Peñitas fue operada con extracciones controladas cuando llegó a los niveles extraordinarios, con objetivos de seguridad de acuerdo con las políticas de operación
7. Ideologías y costumbres, falta de confianza en la misma sociedad como en las autoridades

Lo anterior es resultado de un análisis que no se completó íntegramente, por lo que la necesidad de esclarecimiento de los hechos que permitieron que el desastre tuviera tal magnitud sigue latente, es por esto que las autoridades y diversas instituciones trabajaron para cubrir dicha necesidad.

El caso de Tabasco proporciona indicios importantes para establecer factores de riesgo en la zona, sin embargo no causas determinantes, debido a la no vinculación de instituciones y a los análisis respectivos. Debido a la inundación de Tabasco de 2007 surgieron gran cantidad de investigaciones, algunas tomando como base a otras. Sin embargo no se tiene evidencia de que las instituciones, a excepción del IMTA y otras instituciones que trabajaron en conjunto, hayan conjuntado esfuerzos, tecnologías y conocimientos para integrar un análisis más detallado, objetivo y principalmente



multidisciplinario que permitiera establecer las causas de aquel desastre, aprender de los errores y corregirlos.

Más que una acción, se inició un plan por parte de la Conagua, CFE, gobierno del estado de Tabasco y la UNAM, el 16 de noviembre de 2007, denominado Plan Hídrico Integral de Tabasco. Este plan pretende diagnosticar el sistema hidráulico actual de Tabasco, caracterizar el evento de noviembre de 2007, aprender de las lecciones y generar y evaluar alternativas de solución. Si este plan concreta todas las investigaciones y metodologías que se plantean de inicio, será la primera ejecución en el intento en México de un análisis forense de inundaciones en pro de evitar desastres de tal magnitud en un futuro. Aun ello, se puede detectar la ausencia de la integración de la temática técnica con la humana, principalmente visto desde el manejo de la emergencia y la protección civil en eventos inminentes e inevitables. Esto ubica a este plan como una evaluación para plantear un nuevo plan de acciones y a pesar de tener ese acercamiento al análisis forense de inundaciones, no lo es como tal.

Independientemente de que se concrete o no el PHIT, tomando como referencia lo que pasó con el PICI, Tabasco cuenta ya con algunas de las causas que han venido perfilando al estado como vulnerable. Es por esto que se deben enfocar los esfuerzos principalmente en áreas de acción como lo son el ordenamiento territorial en un futuro y reubicación de poblaciones asentadas en zonas de riesgo. Esto lleva por supuesto a la generación de mapas de riesgos que soporten la reubicación. Otra área de oportunidad es el establecimiento de redes de monitoreo y sistemas de alerta temprana regulares y confiables, ya que tratándose de una zona que naturalmente sufre y sufrirá de inundaciones, a través de esa tecnología se podrá prever la magnitud aproximada de algún evento extremo, además de hacer eficiente el manejo de las obras multipropósito y para protección. Ello es importante para una reacción adecuada de las autoridades en quien recae la responsabilidad de seguridad la población. De igual forma la población se debe acostumbrar a vivir con ello, por lo que es importante la preparación de la sociedad ante tales eventos, hacerla participe para crear una reacción adecuada y disminuir así el impacto del desastre. Se debe cambiar el enfoque de acciones reactivas a proactivas, así como de netamente estructurales a holísticas, que a largo plazo converjan en una disminución de la vulnerabilidad de la zona. Se debe promover el acceso e intercambio de información que permita conocer avances de planes, programas, estrategias y manejos de carácter público, pues la información es el insumo básico de cualquier análisis. El trabajo interinstitucional y multidisciplinario en la comprensión de las causas que generan tales impactos en la zona de Tabasco es indispensable, pues se conjuntará en ello un solo esfuerzo que se vea reflejado en un producto integrado y objetivo lo suficientemente aplicable a la realidad. La legalidad de los gobiernos, la confianza de la sociedad, los avances de la tecnología y el entendimiento del entorno serán las bases que sostienen cada uno de los esfuerzos realizados y que proporcionarán el medio para la correcta ejecución de cualquier solución planteada.



Comentarios finales

Los desastres provocados por fenómenos naturales conjuntamente con la actividad antropogénica ocurridos en gran parte del mundo han puesto de manifiesto la inadecuada interrelación del hombre con la naturaleza, la vulnerabilidad de las sociedades ante las amenazas presentes en su entorno y sobretodo el desconocimiento y falta de preparación de las comunidades para enfrentar los peligros existentes.

Como parte de los desastres, las inundaciones no son un fenómeno reciente, sin embargo es un hecho que se ha visto acrecentado el impacto que éstas causan debido al crecimiento poblacional y a su intrínseco desarrollo que en todos los sentidos resulta imparable. Las inundaciones constituyen un serio problema para la mayoría de los países, pues afectan de manera considerable a la economía de la región, además de traer consigo otras consecuencias con costos sociales y ambientales importantes. Estadísticamente, las inundaciones aunque ocupan el segundo lugar dentro de la ocurrencia de fenómenos naturales, sí ocupan el primer lugar en cuanto a daños causados se refiere, además de que las pérdidas relacionadas a esos daños siguen en aumento. Las cifras son de por si impactantes pero quizás no reflejan la completa realidad innegable.

Es indiscutible que para aprender sobre cualquier tema es necesario un estudio a conciencia, y el caso de las inundaciones no es la excepción. El conocimiento derivado de una evaluación sistemática de eventos pasados es sin duda la base para el aprendizaje y la guía para la acción y reacción ante eventos futuros. El conocimiento tiene estructura y es elaborado, es por ello que para llevar a cabo dicha evaluación es necesario un análisis a fondo, que proporcione todos los elementos necesarios para la toma de decisiones y para la disminución notable del impacto que este tipo de fenómenos provoca.

A pesar de la alta presencia de los fenómenos de inundación alrededor del mundo son pocos los esfuerzos realizados para sistematizar una metodología que establezca un análisis en forma ordenada e integral que permita establecer objetivamente las causas y con ello acciones necesarias para la mitigación de inundaciones. La guía metodológica para el análisis forense de inundaciones proporcionará la orientación en la ejecución de diversos métodos y técnicas necesarias para llevar a cabo un análisis con tales fines, dando pie a la elección de técnicas concretas de investigación ya validadas y aceptadas por la comunidad científica. Todo ello con una visión integral y no desde una sola perspectiva, ya sea ésta técnica, social, financiera o ambiental. Además, la guía constituye una herramienta que desde el punto de vista operativo resulta aprovechable por la clara visualización de cada uno de los procesos así como los resultados esperados.



Derivado de la verificación del grado cumplimiento de esta guía para el caso de Tabasco, resulta importante señalar que se debe realizar una investigación de tipo forense de las inundaciones más catastróficas sucedidas en este estado. Esta investigación debería, sin duda, ser tomada en cuenta en el Plan Hídrico Integral de Tabasco que se está llevando a cabo. Mediante la conjunción del análisis forense y el propio plan se estará en posición de establecer francamente los factores que hacen del estado de Tabasco una región vulnerable ante este tipo de eventos y con ello proponer y ejecutar todo tipo de acciones estructurales y no estructurales verdaderamente necesarias. Si se mantiene la línea de acción que se ha venido siguiendo, con enfoque más reactivo que proactivo, Tabasco seguirá teniendo grandes problemas por el impacto de las inundaciones y con ello cuantiosas pérdidas que no permitirán el pleno desarrollo de la región. De forma adelantada se puede decir que en Tabasco es totalmente necesario erradicar un sinnúmero de acciones que obstruyen la materialización de la posible mitigación, entre ellas la desinformación, la mala gestión de recursos y mala aplicación de técnicas científicas e ingenieriles.

Finalmente, con el propósito de aprovechar lo planteado en el documento, se recomienda ampliamente la aplicación de la guía metodológica, no solo a gran escala, como las inundaciones generadas frecuentemente en las extensas planicies como Tabasco, Veracruz y Tamaulipas, sino también a escala local, en inundaciones urbanas o afectaciones menores. Por otro lado, la aplicación sistemática de esta guía en los ámbitos municipal, estatal y federal, permitiría estandarizar la información derivada de eventos inundantes y facilitaría la integración de bases de datos confiables, insumo de cualquier investigación, en este tema tan importante para muchos países, incluido México.



Bibliografía y Referencias

- Aguilar, E. (2009). *Comunicación Verbal*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México
- Aldama, A. y Aguilar, E. (1996). *Antitránsito de Avenidas en Vasos*. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Guayaqui, Ecuador.
- Aldama, A., Ramírez, A., Aparicio, J., Mejía, R. y Ortega, G. (2006). *Seguridad Hidrológica de las Presas en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México
- Aldana, A. (2006). *El problema de las Inundaciones. Peligrosidad, Vulnerabilidad y Riesgo*. Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. España
- Álvarez, C., López, E., Gallardo, F., López, J., y Gómez, R. (2004). *Evaluación del Plan Chontalpa, En Tabasco, México*. A través de la página de internet:
<http://www.grupochoarvi.org/php/doc/documentos/PlanChontalpa.pdf>
- Aparicio, J. (2005). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa. México
- Arias, J. (2009). *Los Recursos Públicos después de un Desastre Natural. El Caso del FONDEN en Tabasco*. Asociación Ecológica Santo Tomás, A.C. México
- Bitran, D. (2001). *Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México en el Periodo 1980 – 1999*. CENAPRED. México
- BOE (1995). *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones*. Boletín Oficial del Estado, No. 38, 14 de febrero de 1995. Secretaria del Estado de Interior de España. España
- Campos, D. (1997). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Librería Universitaria Potosina. México
- Campos, D. (2006). *Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos*. AMH, IMTA. México
- Campos, D. (2007). *Estimación y Aprovechamiento del Ecurrimiento*. Librería Universitaria Potosina. México
- Campos, D., y Gómez, R. (1990). *Procedimiento para Obtener Curvas I-D-Tr a Partir de Registros Pluviométricos*. Ingeniería Hidráulica en México. Volumen 5, numero 2. México
- CICM (2007). *Inundaciones en la Planicie Costera de los Estados de Tabasco y Chiapas en Octubre y Noviembre de 2007*. Boletín de prensa. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A. C. México
- Conagua (1993). *Manual de Ingeniería de Ríos. Estudio Hidrológico para Obras de Protección*. Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. Comisión Nacional del Agua. México
- Conagua (2007a). *Manual de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario. Alcantarillado Sanitario*. Comisión Nacional del Agua. México



- Conagua (2007b). *Informe sobre los Eventos Hidrometeorológicos que Afectaron a los Estados de Tabasco y Chiapas y Acciones Realizadas por la Conagua*. Comisión Nacional del Agua. México
- Conagua (2008). *Estadísticas del Agua en México 2008*. Comisión Nacional del Agua. México
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994a). *Hidrología Aplicada*. McGraw – Hill Interamericana. Colombia
- Chow, V. (1994b). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw – Hill Interamericana. Colombia
- Devoli, G. y Álvarez, A. (2001). *Guía Técnica de la Elaboración del Mapa de Amenaza por Inundación del Área de Managua y sus Alrededores (Nicaragua) a escala 1:50 000, Área Managua y sus alrededores*. INETER – Georiesgos. Nicaragua
- DGPC (2006). *Manual de Organización y Operación del Sistema Nacional de Protección Civil*. Dirección General de Protección Civil, Secretaria de Gobernación. México
- Domínguez, R. (2000). *Escurrimientos Extremos*. Tláloc AMH. México
- Domínguez, R., Jiménez, M., García, F., Salas, M. (1994). *Reflexiones Sobre las Inundaciones en México*. CENAPRED. México
- Eagleson, P. (1972). *Dynamics of flood frequency*. *Water Resources Research*. U. S. A.
- Eagleson, P. (1992). *Opportunities in the Hydrologic Sciences*. Nat. Acad. Press. U.S.A.
- Escalante, C., Reyes, L. (2005). *Técnicas Estadísticas en Hidrológica*. Facultad de Ingeniería de la UNAM. México
- Esparza, J. (2005). *La influencia de la Longitud del Registro en las Estimaciones de Gastos de Diseño en México*. Tesis de Maestría UNAM. México
- García, A. (2003). *Una Aproximación a la Ingeniería Forense*. Consejo Profesional de Ingeniería Mecánica y Electricista. Argentina
- Gutiérrez, A., Aparicio, J., y León, J. (2005). *Modelación del Régimen Pluviométrico en la Ciudad de Morelia*. Cap. 2, en: Gutiérrez, A., Ramírez, A., y Sánchez, F. (Editores). *Las Ciencias del Agua en Morelia, Aplicaciones Frente a los Retos del Siglo XXI*. IMTA – UMSNH. México
- Haan, C. (1986). *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press. U.S.A.
- Holland, G. (1993). *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. World Meteorological Organization. Bureau of Meteorology Research Centre. Australia
- Hurst, R. (2007). *An Overview of Forensic Hydrology*. *Southwest hydrology*. Volume 6/Number 4. U.S.A.
- IMTA (2008). *Informe de las Inundaciones de 2007 en el Estado de Tabasco, Diagnostico Preliminar*. Gaceta del IMTA. No. 12 abril de 2008. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México



- Jiménez, M., Matías, L., Fuentes, O., y Prieto, R. (2007). *Ciclones Tropicales*. CENAPRED. México
- Juárez, E. (1974). *Mecánica de Suelos, Vol. 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa, México
- Kingma, N., Westen, C. y Vargas, R. (2008). *Evaluación de la Amenaza por Inundación*. International Institute for Geo – Information Science and Earth Observation. Países Bajos
- Kite, G. (1988) *Frequency and Risk analyses in Hydrology*. Water Resources Publication. U.S.A.
- Kreyszig, E. (1992). *Introducción a la Estadística Matemática*. Editorial Limusa. México
- Linsley, R., Kohler, M., y Paulhus, J. (1990). *Hidrología para Ingenieros*. McGraw – Hill. México
- Loáiciga, H. (2001). *Flood Damages in Changing Flood Plains: A Forensic – Hydrologic Case Study*. Journal of the American Water Resources Association. Volume 37/Number 2. U.S.A.
- Martínez, S. (2007). *La Percepción, el Orden Social y la Civilidad en el Reciente Desastre de Tabasco*. Subje/Civitas, I(1). A través de la página de internet
http://www.subjecivitas.com.mx/vol1/num1/arenas_civilidad_desastre_tabasco.pdf
- Maza, J. (1987). *Introduction to River Engineering*. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. UNAM. México
- McCuen, R. (1998). *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice Hall. U.S.A.
- Medina, R. y Méndez, F. (2006). *Inundación Costera Originada por la Dinámica Marina*. Revista Ingeniería y Territorio. Numero 74. España.
- Moliner, M. (2007). *Diccionario del Uso del Español*. Rba Libros. España
- Nanía, L., y Gómez, M. (2006). *Análisis de la Peligrosidad de la Escorrentía Pluvial en Zona Urbana Utilizando un Enfoque Numérico – Experimental*. Ingeniería Hidráulica en México. Volumen 21, numero 2. México
- Navarro, J. y Toledo, H. (2008). *Transformación de la Cuenca del Río Grijalva*. Revista AMIP Noticias. Año 4, No. 16. México
- OPS (2006). *Hospitales Seguros ante Inundaciones*. Serie Mitigación de Desastres. Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C. U.S.A.
- Preciado, M., Ramírez, A., Ocón, A. y Mejía R. (2007). *Seguridad Hidrológica de las Presas “Temascal-Cerro de Oro” en Relación con su Política de Operación*. Memoria del Congreso 20071116-01. Organización Mexicana de Meteorólogos, AC. México
- Ramírez, A., Aguilar, E., Guitron, A., Aparicio, J., Martínez, P. (2008). *Causas, Consecuencias y Lecciones Aprendidas de las Inundaciones de 2007 en Tabasco y Chiapas*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena, Colombia.



- Ramírez, A., Aldama, A. (2000). *Análisis de Frecuencias Conjunto para la Estimación de Avenidas de Diseño*. AMH, IMTA. México
- Ramírez, A., Gómez, J., y Campos, D. (2005). *Actualización de las Envolventes Regionales de Gastos Máximos para la República Mexicana*. Ingeniería Hidráulica en México. Volumen 20, numero 1. México
- Rocha, A. (1998)- *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Primera Edición. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Perú
- Ruiz, A. (2003). *El Agua en la Agricultura*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México
- Schlanger, V. (2003). *Espere Climate Enclopaedia*. Servicio Meteorológico Húngaro. A través de la página de Internet:
www.atmosphere.mpg.de/enid/3fb018da30163aeb2e5955a95e7f1692,0/Introducci_n_al_Clima/-_Meteorolog_a_443.html
- Seed, R., Bea, R., Athanasopoulos-Zekkos, A., Boutwell, G., Bray, J., Cheung, C., Cobos-Roa, D., Rogers, J., Storesund, R., Vera-Grunauer, X., y Wartman, J. (2008). *New Orleans and Hurricane Katrina III. The 17th Street Drainage Canal*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 134, Issue 5, (May 2008). U.S.A.
- Singh, V. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice – Hall. U.S.A.
- SNET (2008). *Atlas de Información Territorial para el Desarrollo Sostenible y la Reducción del Riesgo*. Disponible en el sitio de Internet <http://atlas.snet.gob.sv/atlas/?q=node/98>
- Stuyt, L., Dierickx, W. y Martínez, J. (2005). *Materials for Subsurface Land Drainage Systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper 60. Italy
- UNESCO (2008). *Floods*. Disponible en el sitio de Internet de la UNESCO, en http://portal.unesco.org/science/en/ev.phpURL_ID=6012&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html
- UNAM (2007). *Propuesta General para la Formulación del Plan Hidráulico Integral de Tabasco*. Instituto de Ingeniería de la UNAM. México
- USACE (2008a). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS 3.3. User's Manual (CPD-74A) and Technical Reference Manual (CPD-74B)*. U.S. Army Corp of Engineers. Hydrological Engineering Center. U.S.A .
- USACE (2008b). *River Analysis System HEC-RAS 4.0. User's Manual (CPD-68) and Hydraulic Reference Manual (CPD-69)*. U.S. Army Corp of Engineers. Hydrological Engineering Center. U.S.A.
- USACE (2008c). *Coastal Engineering Manual. Part II (EM-1110-2-1100)*. U.S. Army Corp of Engineers. Hydrological Engineering Center. U.S.A.
- Valtierra, J., y Domínguez, M. (2007). *Herramienta para la Caracterización Geomorfológica de Cuencas*. Universidad Autónoma de Querétaro. México



WMO (1994). *Guide to Hydrological Practices. Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications. Fifth Edition.* No. 168. World Meteorological Organization.