

Ana Yolanda Zúñiga Arias

PERSPECTIVAS
INTERDISCIPLINARIAS:
riesgo y vulnerabilidad ante
fenómenos hidrometeorológicos



UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



© EUNA

Editorial Universidad Nacional

Heredia, Campus Omar Dengo

Costa Rica

Teléfono: (506) 2277-3825

Fax: (506) 2261-7017

Correo electrónico: euna@una.cr

Apartado postal: 86-3000 (Heredia, Costa Rica)

© Perspectivas interdisciplinarias: riesgo y vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos

Ana Yolanda Zúñiga Arias. Editora

Primera edición 2015

Producción editorial: Alexandra Meléndez C. amelende@una.cr

Diseño de portada: Jania Umaña

363.3492

P467p

Perspectivas interdisciplinarias: riesgo y vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos / Ana Yolanda Zúñiga Arias editora. -- 1. ed. -- Heredia, C. R. : EUNA, 2015.
170 p. : 21 cm.

ISBN 978-9977-65-432-4

1. INUNDACIONES. 2. CATÁSTROFES NATURALES.
3. HURACANES. 4. HIDROMETEOROLOGÍA.
5. TORMENTAS. 6. GESTIÓN. FENÓMENOS NATURALES
I. Zúñiga Arias, Ana Yolanda.

De conformidad con el Artículo 16 de la Ley N.º 6683, Ley sobre Derechos de Autor y Derechos Conexos, se prohíbe la reproducción parcial o total no autorizada de esta publicación por cualquier medio o procedimiento mecánico electrónico, con excepción de lo estipulado en los artículos N.º 70 y N.º 73 de la misma ley, en los términos que estas normas y su reglamentación delimitan (Derecho de cita y Derecho de Reproducción no autorizada con fines educativos).

Contenido

| | |
|--------------------|----|
| Presentación | 19 |
|--------------------|----|

I Parte

Metodología aplicada para el estudio de fenómenos hidrometeorológicos

| | |
|--|----|
| Las inundaciones: una perspectiva técnica y social <i>Juana Elizabeth Salas Hernández, Ruperto Ortiz Gómez, Óscar Antonio Dzul García</i> | 25 |
| Introducción | 25 |
| 1. Estructura de los desastres | 28 |
| 1.1 Fenómenos perturbadores | 30 |
| 1.2 Desastres naturales y políticas públicas | 30 |
| 1.3 Las inundaciones y sus causas | 34 |
| 2. Métodos de análisis de inundaciones | 37 |
| 2.1 Métodos estadísticos | 37 |
| 2.2 Modelación hidrológico-hidráulica | 37 |
| 2.3 Modelación del proceso lluvia escurrimiento con HEC-1 | 40 |
| 2.4 Modelación de inundaciones con HEC-RAS | 42 |
| 3. Conclusiones | 46 |
| Bibliografía | 47 |
| Hemerografía | 48 |

| | |
|---|----|
| Aportes metodológicos para el estudio de los huracanes y tormentas en perspectiva histórica <i>Ana Yolanda Zúñiga Arias</i> | 53 |
| Introducción | 53 |
| 1. Estudio histórico del impacto de huracanes y tormentas: experiencia metodológica | 54 |

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Estudio de los desastres desde las Ciencias Sociales..... | 54 |
| 1.2 | Investigación base: en busca de líneas de investigación de los desastres..... | 57 |
| 1.3 | Reconstruyendo los eventos a través de fuentes primarias impresas | 58 |
| 1.4 | Hacia una caracterización de las áreas impactadas por inundaciones y deslizamientos: estudio de mapas y construcción de zonificación | 60 |
| 1.5 | Historiando con los protagonistas: recuerdos de la inundación | 61 |
| 1.6 | Resultados preliminares | 63 |
| 2. | Retos de la historia como disciplina para el estudio de los desastres y sus impactos | 64 |
| 3. | Conclusiones..... | 65 |
| | Bibliografía | 65 |

II Parte

Gestión del riesgo y atención de emergencias provocadas por fenómenos hidrometeorológicos

| | | |
|-----|--|----|
| | Inundaciones súbitas y gestión local del riesgo: el caso de la ciudad de San Luis Potosí, México | |
| | <i>Gerardo Palacio Aponte</i> | 69 |
| | Introducción..... | 69 |
| 1. | Estudio de los riesgos naturales y el manejo de los desastres en América Latina | 70 |
| 2. | Área de estudio y características de las inundaciones..... | 73 |
| 2.1 | Adaptación y aplicación de los índices de gestión local de riesgo | 75 |
| 2.2 | Resultados | 78 |
| 3. | Conclusiones..... | 84 |
| | Bibliografía..... | 86 |

Tormentas tropicales en el Pacífico costarricense.
Gestión del riesgo y vulnerabilidad (1950-2008)
Ana Yolanda Zúñiga Arias, Rafael Ángel Ledezma Díaz..... 89

 Introducción..... 89

 1. Gestión del riesgo en Costa Rica ante la incidencia
 de fenómenos hidrometeorológicos..... 90

 2. Evolución histórica del impacto de tormentas
 y huracanes en el Pacífico costarricense..... 98

 3. Estudio de caso: Tormenta tropical Alma en
 Costa Rica..... 103

 3.1 Descripción física del fenómeno 104

 3.2 Área impactada: poblaciones..... 105

 3.3 Efectos en la economía e infraestructura..... 106

 3.4 Respuesta ante la emergencia..... 109

 4. Conclusiones..... 115

 Bibliografía 116

III Parte

Estudios de caso: emergencias provocadas por fenómenos hidrometeorológicos: 1950-2010

Análisis social de la inundación del 2008 en Tlaltenango de
Sánchez Román, Zacatecas, México
Luis Román Vega..... 121

 Introducción..... 121

 1. Caracterización del espacio 122

 2. El peso de la población como acción
 transformadora del paisaje..... 123

 3. Antecedentes de inundaciones en Tlaltenango 124

 4. La inundación de julio de 2008. Tlaltenango 127

 4.1 Descripción del desastre 127

 4.2 Análisis del impacto social..... 130

| | |
|---|-----|
| 5. Conclusiones..... | 143 |
| Bibliografía..... | 144 |
| Impacto de las inundaciones en la modernización productiva de la llanura aluvial del río Tempisque (1950 – 1975) | |
| <i>Yanina Pizarro Méndez, Jorge Marchena Sanabria</i> | 147 |
| Introducción..... | 147 |
| 1. Breve esbozo acerca de los fundamentos teóricos en torno a desastres y eventos..... | 148 |
| 2. Las llenas del Tempisque de antaño, la confluencia de riqueza productiva y amenazas naturales..... | 150 |
| 3. Las inundaciones de 1950-1975 | 153 |
| 4. Conclusiones..... | 166 |
| Bibliografía..... | 168 |

Las inundaciones: una perspectiva técnica y social

*Juana Elizabeth Salas Hernández*¹

*Ruperto Ortiz Gómez*²

*Óscar Antonio Dzul García*³

Introducción

El estudio interdisciplinario de los desastres naturales ha surgido para cubrir la necesidad de comprender la realidad social de diversos grupos, de los cuales en dichos sucesos se han convertido en parte de su cotidianidad. Hasta hace un par de décadas, se comenzó a diversificar el paradigma con el que se analizaban los desastres naturales, ya que hasta ese momento se intensificó la idea de que son eventos que tienen una interlocución entre lo natural y lo social, de ahí que se diga que no existen desastres naturales, sino que son provocados por distintas circunstancias sociales. El esquema básico, que ha sido utilizado para entenderlos, es la conjunción entre fenómenos perturbadores y el riesgo, formado por la amenaza y la vulnerabilidad.

En la década de los noventa, se realizaron algunas investigaciones que trataron de demostrar dicho esquema, enfatizando la participación social en los desastres naturales, con el propósito de tender diálogo entre diferentes disciplinas, pero sobre todo en aras de proponer rutas de prevención y adaptación. Así

1 Académica de la Unidad Académica de Historia, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Correo electrónico: Salas_juanita@hotmail.com.

2 Académico de la Unidad Académica de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Correo electrónico: ortizgr@uaz.edu.mx

3 Académico, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Correo electrónico: oadzul@hotmail.com

mayor o menor medida vulnerables) y los de carácter social (relativos a las actividades de la propia sociedad que provocan efectos desastrosos)” (Rodríguez Velázquez, 2011:22). En dicho trabajo, se trata de romper con el paradigma naturalista que los ha analizado con una asepsia social, y el no entenderlos como fenómenos extraordinarios, sino como un problema que se suma a las condiciones de vida de la sociedad.

Se plantea como esquema para entender los desastres naturales en México, tres sistemas:

Perturbadores, referidos a los agentes dinámicos, clasificados en cinco tipos: dos de carácter natural y tres de carácter social.

Afectables, en la lógica señalada de definir entes pasivos, este conjunto de agentes está referido a la población, sus bienes y el ambiente.

Reguladores, constituido por sistemas o agentes que en sí mismo serían portadores de soluciones: organización gubernamental, programas, acciones y normas destinadas a proteger a los agentes afectables, sobre todo la población (Rodríguez Velázquez, 2001:28).

Es decir, esta propuesta abarca los elementos por los que se forman un desastre: fenómenos perturbadores, los cuales se clasifican de la siguiente manera: *geodinámica interna* (sismos y erupciones volcánicas), *hidrometeorológicos* (cyclón tropical, inundaciones, sequías, tormentas de granizo y nevadas), *químicos* (incendios y explosiones), *sanitarios* (contaminación ambiental, desertificación y epidemias), *socio-organizativos* (accidentes-aéreos, terrestres, marítimos y fluviales) y antrópicos (Rodríguez Velázquez, 2001:28). Además, el contexto social conformado por tres aspectos: prevención, emergencia y reconstrucción, los cuales están regidos por políticas públicas.

Conforme esta perspectiva, y dando respuesta al paradigma de investigación interdisciplinario, se ha desarrollado el presente trabajo con una mirada técnica y social de las inundaciones, con el objetivo de entenderlas como una confluencia

entre fenómenos perturbadores y contextos sociales marcados por la vulnerabilidad, para lo cual en la segunda parte se establecen algunas de las metodologías para su medición y control.

1. Estructura de los desastres

Un desastre se define como un acontecimiento violento que interrumpe las formas de vida social, lo cual afecta los bienes materiales de una comunidad y provoca daños severos en el ambiente. Para la recuperación, es importante la vinculación de la sociedad y de los poderes administrativos.

Aparentemente, el desastre es un acontecimiento extraordinario y súbito, sin embargo, no es así, porque se desenvuelve en un contexto social marcado por el riesgo y la vulnerabilidad. El primero es la probabilidad de daños en el patrimonio tanto individual como comunitario, así como la pérdida de vidas de personas; la suspensión de la cotidianidad en períodos y regiones determinadas. ¿Quién es un grupo vulnerable? Ha sido fácil definir la vulnerabilidad tanto en investigaciones sobre desastres, como en leyes que tienen que ver con ese ámbito, sin embargo, es más complicado medir el grado de vulnerabilidad en la que vive una comunidad. Dicho término se puede definir como, "susceptibilidad de sufrir un daño o grado de pérdida, como resultado de un fenómeno destructivo" (Ley de protección civil de Zacatecas, 2000). Esta definición es muy vaga, ya que solo se queda en el plano de distinguir entre los grados de efectos de un desastre, es decir, con ello se torna vulnerable a un grupo, pero la cuestión continúa cómo medir la vulnerabilidad, y para qué sirve en relación con la prevención de desastres.

El estudio, *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*, de Piers Blaikie, Terry Cannon, Jan Davis y Ben Wisner (1996), surgió como un esfuerzo de explicar la vulnerabilidad en los contextos de cada tipo de desastre, así se centraron en hacer un panorama general de cómo afectan las hambrunas, inundaciones, tormentas, terremotos, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra, con

1.1 Fenómenos perturbadores

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CEN-APRED), los fenómenos perturbadores se dividen en hidrometeorológicos, sísmicos, volcánicos y origen químico. En cada uno de ellos, la vulnerabilidad es establecida de diferente manera.

Los fenómenos hidrometeorológicos: precipitación, baja temperatura, helada, sequías, nevadas, granizadas, inundaciones, tormentas eléctricas, fuertes vientos, tornados, erosión, frentes fríos, huracanes, ciclones y sequías. Históricamente, los que más afectan al país, desde el punto de vista de los daños que provocan, son las inundaciones fluviales y costeras, producidas por lluvias intensas o huracanes. Las bajas temperaturas y las nevadas afectan solo algunas regiones del país, pero resultan de un gran perjuicio para la población más vulnerable (CENAPRED, 2006).

1.2 Desastres naturales y políticas públicas

El ser humano y su relación con la naturaleza son inseparables. Se conforma por la interrelación marcada por una influencia mutua y diferentes grados de adaptabilidad de ambas partes, durante ese proceso se dan acontecimientos que en simple apariencia son súbitos, como los desastres.

En ese sentido, se han formado distintos programas de prevención dirigidos desde el Estado, con el fin de concientizar a los grupos sociales más vulnerables de que en algún momento pueden vivir un desastre. A lo largo del siglo XX, se fueron conformando distintos programas públicos de prevención, se puede decir que se ha desarrollado un proceso de educación ante eventos que parecen tan sorprendentes y funestos. Las políticas públicas son las que lo han regido, donde por medio de esos instrumentos, se plantean estrategias y líneas de acción articuladas entre sí, con el objetivo de prevenir desastres, por lo que se plantean tácticas y programas (Rodríguez Velázquez, 2008:9). Se ha tratado de tender puentes de comunicación entre

la administración pública y la sociedad, ambos tienen un papel activo, pero además se ha intentado resguardarlos por marcos jurídicos que los protejan.

En los países se han desarrollado estrategias de prevención, incluso en algunos hasta se han formado secretarías o institutos que se encargan de esta tarea, se encargan de informar a la población de cómo puede actuar en caso de un desastre, pero en pocas ocasiones se ha tratado de reducir la vulnerabilidad. “En México, España e Italia se le conoce como Protección Civil, desde la tradición de proteger a la sociedad ante situación de proteger a la sociedad ante situaciones que esta no puede solventar; Canadá define la Planeación de Emergencia como una responsabilidad.” (Rodríguez Velázquez, 2008: 33). Todas esas políticas están dirigidas por la fase de riesgo y de contingencia, o la probabilidad de que suceda un desastre; pero se debe tener en cuenta la eventualidad de que sucedan en ámbitos considerados como no vulnerables.

En la aplicación de esas políticas públicas, es necesario considerar dos ejes: la longitudinalidad y transversalidad. El primero es la implementación de acciones a largo plazo; el segundo, “a la necesaria inclusión de los sectores público, privado y social, así como las disciplinas de las ciencias naturales y de ciencias sociales.” (Rodríguez Velázquez, 2008:10) En ese sentido, es necesario que se involucre a la sociedad, no solo como el receptáculo de las acciones de prevención, sino también que desde ella se pueden formar estrategias para advertirse en caso de desastre. “Las instituciones gubernamentales, que han contraído la obligación de garantizar la seguridad a la población y atender las necesidades sociales, deberían reconocer que una verdadera prevención de desastres requiere de una sociedad civil participante, no expectante.” (Rodríguez Velázquez, 2008:43). De una manera transversal han surgido instituciones, por las necesidades demandas por la sociedad, incluso en algunos casos, organizaciones civiles se han institucionalizado, como el caso de la Coordinación Única de Damnificados (CUD), creada en octubre de 1985 y reconocida

en mayo de 1986 (Rodríguez Velázquez, 2008:41). El Plan de Protección Civil de México 2008-2012 indica la necesidad de transversalización en el manejo de riesgo para promover la protección ante posibles desastres. Esa estrategia consiste en que los recursos de otras instancias se potencialicen, además de delimitar los alcances y responsabilidades de los actores convocados, este esquema propone reducir el riesgo en la medida en que los estados y los municipios, manejen los recursos materiales y humanos para reducir el riesgo. (Diario oficial de la Nación 2008:2).

Sin embargo, un problema general de esas políticas es que no han podido superar el inmediatismo, se organizan para salir de la emergencia, pero faltan estrategias para reducir la vulnerabilidad y no solo para informar qué se puede hacer ante una contingencia.

El 6 de mayo de 1986, se creó el Sistema Nacional de Protección Civil en México, sin embargo, históricamente ha existido la preocupación de protegerse ante los eventos funestos de la naturaleza. Por ejemplo, en el siglo XVIII se establecieron los serenatos en la Nueva España, cuya función era mantener la serenidad en las noches, y además apagaban los incendios; debían dar alarma a la población en caso de que sucediera un siniestro mientras dormía (Garza Salinas, 2001: 251). La población nunca ha estado exenta de esos acontecimientos que en algunas ocasiones han sido fulminantes, las políticas públicas también se han tendido de acuerdo con las circunstancias sociales, y a la tendencia de que haya cierto tipo de desastres. Así, en 1790 el conde Revillagigedo estableció un reglamento para que se evitaran incendios en la Ciudad de México, sin embargo, durante los siglos XVIII y XIX, esa ciudad nunca fue consumida por un incendio, pero no existían maneras de mitigarlo, ya que no había un cuerpo de bomberos organizado (Garza Salinas, 2001: 254).

Es a partir de la década de los ochenta del siglo XX, cuando se dieron giros importantes a las políticas públicas vinculadas a la prevención de desastres, porque a partir del sismo de 1985 en la Ciudad de México, se vio la necesidad de formular

estrategias mejor fundamentadas para prevenir y poder reaccionar ante siniestros de ese tipo. Una de las acciones fue la fundación del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) con el fin de planear, auxiliar y rehabilitar a la población frente a situaciones de desastre. Además de proponer planes, políticas y estrategias para el desarrollo y aplicación de programas, “establecer sistemas de coordinación con las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, para alcanzar sus objetivos” (Garza Salinas: 271). El comité quedó integrado por el Presidente de la República, el Secretario de Gobernación, los secretarios de Marina, de la Defensa Nacional, de Agricultura, Recursos Hidráulicos, Comunicaciones y Transportes, Desarrollo Urbano y Ecología, Educación Pública, Salud, Trabajo y Previsión Social; Jefe del Departamento del Distrito Federal, el Procurador General de la República, el Director del Centro Nacional de Estudios Municipales, el Secretario General del Consejo de Población y el Subsecretario de Gobernación; esa fue la estructura original, en la actualidad hay una coordinación de la SINAPROC en cada Estado.

El SINAPROC es un organismo de la Secretaría de Gobernación, la cual es la encargada de salvaguardar a la población, sus bienes y su entorno ante un desastre natural (Protección Civil). Está organizada por tres direcciones: coordinación, técnica y operación.

En 1990 se fundó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), cuyas funciones son la investigación, instrumentación, capacitación y difusión de los fenómenos perturbadores y antropogénicos, que provocan los desastres naturales, con el objetivo de educar a la población de cómo prevenir un desastre y cómo enfrentarlo de mejor manera en el caso de que se presente. Hay desastres que no se pueden prevenir y mucho menos evitar, por lo que es necesario informar de cómo se puede resistir ante esos eventos funestos, quizá aún falta la formación de una cultura de prevención, acciones que concienticen a la población de que estos se pueden presentar en cualquier momento.

Una acción que se ha desarrollado, es la investigación científica y ha dado como resultado la creación de información útil para a la prevención de desastres. Otra actividad que se ha impulsado es la creación de atlas locales, en los que se zonifica el riesgo, tomando en cuenta las características de cada fenómeno perturbador, promoviendo su utilización práctica, desde la administración pública para la zonificación del uso de suelo, diseño de obras civiles, para mitigar los desastres y elaborar los planes de contingencia.

1.3 Las inundaciones y sus causas

El concepto de inundación está estrechamente relacionado al de avenida, que significa una elevación, generalmente, rápida en el nivel de las aguas de un curso hasta un máximo, a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor. Lo anterior significa que dicho desbordamiento produce un levantamiento de la superficie libre del agua por arriba de su nivel normal al provocar pérdidas humanas y/o materiales.

Las inundaciones constituyen procesos naturales que cubren los márgenes de los arroyos o cauces de acuerdo con la elevación del fondo natural respecto a las zonas adyacentes. Si el cauce está localizado por debajo del nivel del terreno adyacente, se presentará una elevación gradual del nivel de las aguas en las márgenes; además, si está por encima de una cota mayor al del terreno adyacente, se presentará un desborde rápido hacia las cotas bajas del terreno circundante.

A nivel mundial, las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el periodo 1919 - 2004, han colaborado en más eventos de inundaciones que cualquier otro tipo de desastre (abasto de alimentos, sismos, tormentas, incendios, erupciones volcánicas, entre otros), en gran medida, porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando el riesgo

de inundaciones al que están expuestas muchas poblaciones (CENAPRED, 2007).

Actualmente, las inundaciones constituyen una gran preocupación en diversas partes del mundo. Las devastadoras inundaciones en el sur de Estados Unidos (Travis, 2005), Reino Unido (Arduino et al., 2005), Italia (Borga et al., 2007), Europa Central (Vogel, 2002), y el sudeste asiático (Alam y Rabhani, 2007), son algunos ejemplos de grandes inundaciones en los últimos años a nivel mundial.

Las inundaciones se producen a partir de una combinación de condiciones de varios tipos: hidrológicas (topografía, pendiente y altitud de la cuenca, entre otras), climatológicas (tipo, duración e intensidad de la precipitación, entre otras) y de uso de la tierra (cobertura vegetal, métodos de manejo, etc.).

Los cambios de uso del suelo pueden influir en los procesos hidrológicos como la infiltración, recarga de acuíferos, el flujo base y el escurrimiento de una cuenca (Baltas y Karaliolidou, 2007). Dow y DeWalle (2000) señalan que, desde el punto de vista hidrológico, la urbanización se define fundamentalmente como el incremento de áreas impermeables (por ejemplo, calles, estacionamientos, techos, banquetas, etc.) que resultan del desarrollo urbano y residencial y es considerada la fuerza de uso de suelo más dominante que altera la hidrología de una zona.

La urbanización modifica los procesos hidrológicos mediante la sustitución de vegetación de la cobertura del suelo con superficies impermeables y la transformación de la red de drenaje natural (Xiao, 2007). La urbanización ha provocado cambios significativos en el ciclo hidrológico de una cuenca, por lo tanto, el impacto en la cantidad, y con ello el aumento de los caudales máximos y el volumen total de escurrimiento (Beighley y Moglen, 2002; Tang et al., 2005; Alberti et al., 2007; entre otros); así como el incremento de inundaciones más frecuentes y más severas (Pitt, 2004; Cowden et al., 2006; Muthukrishnan et al., 2006; Vicars-Groening y Williams, 2007; Sheng y Wilson, 2009; entre otros).

Las inundaciones afectan tanto poblaciones rurales como urbanas, y desde luego, a la agricultura y la ganadería. Los principales efectos de las inundaciones en las zonas urbanas son:

- Afectación en las viviendas localizadas en la cercanía de arroyos, ríos o zonas de menor elevación donde escurre el flujo durante las avenidas.
- Inundaciones en zonas de pendiente baja.
- Encharcamiento en zonas de baja pendiente o donde no existe drenaje que permita drenar los volúmenes almacenados. Por su duración, estas zonas pueden representar focos de infección o puntos de epidemias.
- Daños a la infraestructura de agua potable, rotura de tuberías, azolve de los sistemas de aguas residuales.
- Daño a la infraestructura de tratamiento de aguas residuales.
- Contaminación de las aguas superficiales en las cuencas.
- Afectación a la infraestructura de comunicaciones vial, telefónica o suspensión de la energía eléctrica.

Además, los riesgos y daños se incrementan debido a la presencia de asentamientos humanos, generalmente irregulares, en zonas propensas a inundaciones como los cauces naturales y las zonas bajas de una cuenca.

La estimación de las inundaciones es una parte integral de la hidrología de aguas superficiales para la completa planificación de los recursos hídricos, el desarrollo y gestión, incluyendo la mitigación y la prevención de los riesgos de inundación (Bhabagrahi Sahoo et al., 2006), y la selección de las medidas de reducción de daños por inundación se basa en factores hidráulicos, hidrológicos, geotécnicos, ambientales y económicos que actúan de manera simultánea, relacionados con el sistema fluvial y el área a ser protegida contra las inundaciones (Ahmad y Simonovic, 2001). Sin embargo, la aplicación de cualquier medida de gestión de inundaciones seleccionada implica graves consecuencias sociales.

Las inundaciones afectan tanto poblaciones rurales como urbanas, y desde luego, a la agricultura y la ganadería. Los principales efectos de las inundaciones en las zonas urbanas son:

- Afectación en las viviendas localizadas en la cercanía de arroyos, ríos o zonas de menor elevación donde escurre el flujo durante las avenidas.
- Inundaciones en zonas de pendiente baja.
- Encharcamiento en zonas de baja pendiente o donde no existe drenaje que permita drenar los volúmenes almacenados. Por su duración, estas zonas pueden representar focos de infección o puntos de epidemias.
- Daños a la infraestructura de agua potable, rotura de tuberías, azolve de los sistemas de aguas residuales.
- Daño a la infraestructura de tratamiento de aguas residuales.
- Contaminación de las aguas superficiales en las cuencas.
- Afectación a la infraestructura de comunicaciones vial, telefónica o suspensión de la energía eléctrica.

Además, los riesgos y daños se incrementan debido a la presencia de asentamientos humanos, generalmente irregulares, en zonas propensas a inundaciones como los cauces naturales y las zonas bajas de una cuenca.

La estimación de las inundaciones es una parte integral de la hidrología de aguas superficiales para la completa planificación de los recursos hídricos, el desarrollo y gestión, incluyendo la mitigación y la prevención de los riesgos de inundación (Bhabagrahi Sahoo et al., 2006), y la selección de las medidas de reducción de daños por inundación se basa en factores hidráulicos, hidrológicos, geotécnicos, ambientales y económicos que actúan de manera simultánea, relacionados con el sistema fluvial y el área a ser protegida contra las inundaciones (Ahmad y Simonovic, 2001). Sin embargo, la aplicación de cualquier medida de gestión de inundaciones seleccionada implica graves consecuencias sociales.

2. Métodos de análisis de inundaciones

Los avances en los métodos de estimación de las avenidas de diseño con fines de protección contra inundaciones han avanzado muy rápidamente en las últimas décadas.

2.1 Métodos estadísticos

Las tendencias se han basado principalmente en el uso de nuevas técnicas estadísticas (en relación con funciones de distribución y métodos de estimación de parámetros), la aplicación de los nuevos principios de regionalización, y el análisis regional de frecuencia de inundaciones (Hlavcova et al., 2005). El análisis de frecuencias de avenidas consiste en describir probabilísticamente la ocurrencia de gastos máximos anuales por medio de una función de distribución de probabilidad, cuyos parámetros se estiman utilizando los registros históricos de lluvia, los cuales se consideran como una muestra aleatoria. El proceso de distribución se conoce normalmente como "ajuste de la distribución" (Aldama et al., 2005). Para el caso de cuencas no aforadas o con datos muy escasos la aplicación de estos métodos no es una tarea fácil (Jothityangkoon y Sivapalan, 2003). De hecho, la limitada disponibilidad de registros históricos del caudal máximo en un período de observación suficientemente largo induce una incertidumbre relevante en el análisis de frecuencia de las inundaciones. Una posible solución para superar este problema es la aplicación de los estudios de simulación hidrológica con el fin de generar largas series sintéticas de los caudales de los ríos (Moretti y Montanari, 2008).

2.2 Modelación hidrológico-hidráulica

Esta perspectiva se ha centrado en las técnicas de simulación mediante modelos de lluvia escurrimiento (Hlavcova et al., 2005), porque conduce al desarrollo de una serie de enfoques de modelación hidrológica de diversa complejidad de

base física o conceptual. Este enfoque consiste en transformar los registros de precipitación en caudales de un río, y la mayoría de las veces, aun con las dificultades que implica su aplicación resulta más fácil de utilizarse, porque los datos de lluvia son más abundantes que los de caudal, y es ideal sobre todo para cuencas no aforadas. La mayoría de estos modelos utilizan combinaciones de elementos conceptuales lineales con la finalidad de simplificar la representación de los procesos hidrológicos (Baltas, 2007).

El enfoque tradicional, para llevar a cabo la predicción de inundaciones, es utilizar datos de precipitación como entradas, estimados a partir de pluviómetros manejando un modelo hidrológico de parámetros agregados. El estudio del proceso lluvia-escorrentamiento, no solo se ha realizado mediante modelos de sistemas lineales agregados, sino también con modelos de base física (Plate, 1988). Sin embargo, la naturaleza “agregada” del modelo, le da una debilidad intrínseca respecto a la representación de la distribución espacial de la precipitación extremadamente irregular, por lo que es necesario trabajar en pequeñas sub-cuencas en estos casos (Yang et al., 2000), (Baltas, 2007).

Los modelos basados físicamente están diseñados para representar los procesos hidrológicos en las cuencas, y son capaces de predecir los cambios en dichos procesos. Algunos de estos incluyen cambios en el escurrimiento superficial o en el almacenamiento de aguas subterránea como respuesta a un potencial calentamiento global o a la deforestación en una zona particular. Estos modelos son ideales para realizar estudios bajo diferentes escenarios, por ejemplo, de cambio climático o de uso de suelo.

Los avances tecnológicos, tales como los radares meteorológicos, satélites, sistemas de información geográfica y equipos de cómputo de alta velocidad, ofrecen nuevas y mayores oportunidades para mejorar la predicción hidrológica, permiten el desarrollo de modelos distribuidos para la predicción de avenidas (Baltas y Mimikou, 1999 y Baltas, 2007). Dichos modelos pueden ser una herramienta útil y valiosa en el contexto del

enfoque de simulación para este fin, porque son potencialmente capaces de simular el flujo o producir caudales sintéticos en un río en cualquier lugar de la red de drenaje de la cuenca (Brath et al., 2004; Moretti y Montanari, 2008).

Los modelos basados en procesos representan la información distribuida espacialmente, probablemente definen las relaciones causa-efecto que lleva a un comportamiento cambiante de escurrimiento. Tienen la principal ventaja que encarnan de manera explícita los mecanismos de generación del escurrimiento (infiltración, distribución lateral de la humedad del suelo, entre otros), aunque generalmente, dependen de muchos parámetros (Arduino et al., 2005).

Los sistemas de alerta de inundaciones combinan un modelo hidrológico con uno hidráulico para simular la propagación de inundaciones en toda la red de drenaje. Estos modelos dependen de variables meteorológicas como la precipitación, temperatura y evaporación, obtenidas de diferentes fuentes de información, actualmente incluyen en algunos casos mediciones de radar. Asimismo, el estudio de inundaciones incluye la incorporación de modelos de tránsito hidrológico e hidráulico para predecir, no solo los niveles de agua y caudales en puntos críticos a lo largo del sistema fluvial, sino también la velocidad de flujo, considerando una escala apropiada de los modelos digitales del terreno (MDT). Este tipo de modelos utilizados en cadena, es la base de los sistemas de pronóstico de inundaciones (Arduino et al., 2005).

La precipitación y la temperatura son determinantes en la generación de una inundación; además la cuenca y la cantidad de precipitación integrada en el tiempo, la evolución temporal y la distribución espacial dentro de la cuenca juegan un papel esencial para el desarrollo y la división de los diferentes componentes del escurrimiento (Frei et al., 2000).

Las condiciones de temperatura y humedad de los suelos en el instante del evento de precipitación son factores iniciales importantes para la evolución de una avenida. Por lo tanto, la generación de una avenida también depende fundamentalmente

de las condiciones meteorológicas anteriores al episodio de fuertes precipitaciones (Frei et al., 2000).

A medida que la tecnología computacional ha mejorado y la disponibilidad de datos espaciales se ha incrementado, ha surgido un variado número de programas computacionales automatizados para la modelación hidrológica e hidráulica.

2.3 Modelación del proceso lluvia escurrimiento con HEC-1

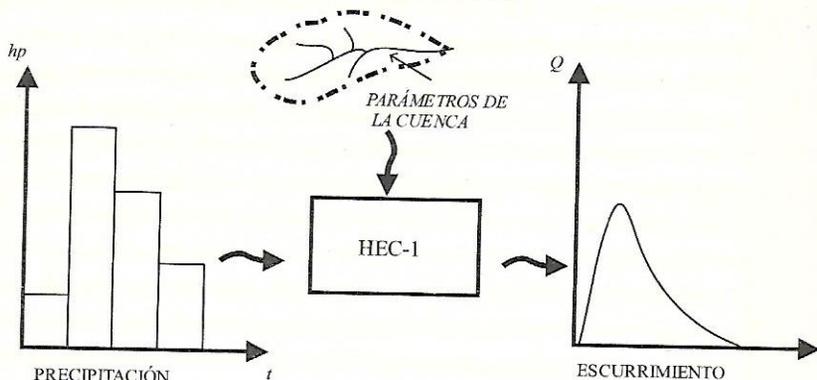
El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC, por sus siglas en inglés), que pertenece al Instituto de Recursos del Agua del Cuerpo de Ingenieros de E. U. (U. S. Army Corps of Engineers), desarrolló el modelo hidrológico HEC-1 (Hydrologic Engineering Center), el cual es computacional basado en eventos de tipo determinístico, diseñado para simular la respuesta del escurrimiento superficial a la precipitación en una cuenca, representando esta como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos. Cada componente modela un aspecto del proceso lluvia-escurrimiento en una parte de la cuenca, comúnmente denominada subcuenca. La representación de dichos componentes requiere de un conjunto de parámetros que especifican las características del mismo y relaciones matemáticas que describen los procesos físicos. El resultado del proceso de modelación es el cálculo del hidrograma de escurrimiento en un lugar específico deseado en la cuenca (USACE, 1998). Con el paso de los años, el HEC desarrolló un modelo de simulación hidrológica más potente que HEC-1, el modelo HEC-HMS, Hydrological Modeling Systems (USACE, 2000).

El modelo HEC-1 es robusto y sencillo que utiliza variedad de métodos hidrológicos, diseñado para el análisis de eventos aislados, y que requiere poca información en comparación con otros modelos de simulación hidrológica. Según Nelson y Jonse (2007) para realizar el análisis del proceso lluvia-escurrimiento empleando el sistema computacional HEC-1, se debe contar con las variables de las características geométricas de la

cuenca, así como con información climatológica del lugar. El modelo HEC-1 estima una tormenta única y tiene la ventaja de que emplea los parámetros geométricos y geomorfológicos de la cuenca sin realizar mediciones adicionales en campo. Otra ventaja que tiene este modelo consiste en que no requiere indagación histórica de la cuenca, solo que se le alimente con información complementaria correspondiente a la tormenta de diseño, para poder llevar a cabo la modelación.

En México, debido a la escasez de información hidrológica, el modelo HEC-1 se convierte en una herramienta importante para llevar a cabo análisis hidrológicos en cuencas. Por ejemplo, en el Estado de Zacatecas se han realizado estudios hidrológicos que ha permitido estimar los volúmenes de escurrimiento e hidrogramas de salida en cuencas en ausencia de información histórica. Véase por ejemplo, Ortiz et al. (2005), Dzul et al. (2005) y Gaytán y Nelson (2007). El resultado del proceso de modelado con HEC-1, es el cálculo de hidrogramas de caudal en cualquier lugar deseado de la cuenca a partir de datos de lluvia, (véase figura 1). Entre las aplicaciones más comunes para las que se utiliza HEC-1 están el diseño de sistemas pluviales y la determinación de planicies de inundación, entre otras. Además, proporciona información para la planeación y evaluación de proyectos para el control de avenidas máximas.

Figura 1
Hidrogama de salida en una cuenca
a través del modelo HEC-1



Fuente: USACE (1998).

2.4 Modelación de inundaciones con HEC-RAS

La delimitación de las zonas de inundación requiere dos tipos de análisis: uno hidrológico y otro hidráulico. Mediante la modelación hidrológica se determinan los caudales en el punto de salida de la cuenca o en un punto de interés particular, para diferentes periodos de retorno de los datos de precipitación. Una vez concluido el análisis hidrológico, se procede con el segundo tipo de análisis, el cual consiste en realizar un modelo hidráulico, que toma como datos de partida los resultados obtenidos (caudales) de la modelación hidrológica, para enseguida calcular los tirantes hidráulicos, es decir, los niveles que alcanza la superficie libre del agua, y finalmente definir las zonas de inundación. Las principales dificultades asociadas a este tipo de estudios son la cantidad y calidad de información requerida para el análisis hidrológico-hidráulico. En algunas ocasiones, otras limitaciones adicionales son el costo de adquisición de la información y el tiempo necesario para ejecutar algunas actividades de campo.

El principal resultado del modelo de inundaciones es la delimitación de la zona de afectación en los márgenes de los cauces o ríos para un evento de precipitación con un período de retorno determinado. Un modelo de inundación requiere información de los eventos históricos, las características topográficas, de relieve y datos geométricos de las secciones transversales del cauce a lo largo de la zona de inundación y de registros de aforos (caudales históricos que circulan por el río).

El análisis de las inundaciones implica utilizar las ecuaciones matemáticas de continuidad y de conservación de cantidad de movimiento. En la actualidad existen diversos modelos hidráulicos que se basan en dichas ecuaciones, así como herramientas que permiten modelar las inundaciones empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG aparecieron en la década de los años 1960, pero fue hasta los años 1980 cuando su uso se hizo masivo. Hoy, la tecnología SIG se ha extendido rápidamente en varios campos científicos, alcanzando áreas como la de los recursos naturales, y consecuentemente el de la planificación y manejo de los recursos hidráulicos. Un SIG, es un sistema de información espacial automatizado e internamente referenciado, diseñado para la gestión y análisis de datos espaciales y la elaboración de cartografía; surgen como un instrumento importante en el modelado, así como una forma estructurada y elegante de presentar los procesos y resultados.

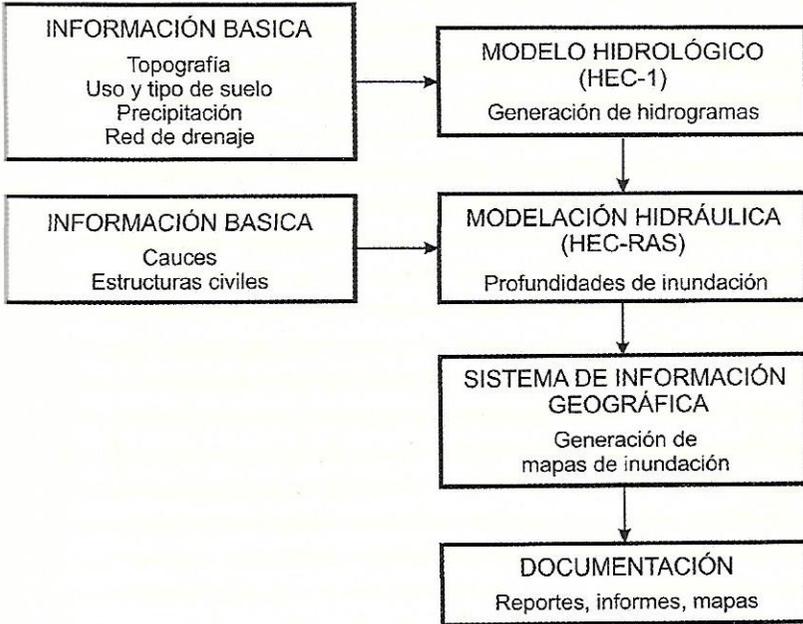
Una herramienta de carácter gratuito que permite realizar análisis de inundaciones es el *software* HEC-RAS (River Analysis Systems), que fue desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (United States Army Corps of Engineers (USACE)), para analizar en una dimensión flujo permanente y transitorio en ríos o canales, así como el análisis de transporte de sedimentos (USACE, 2002). Para desarrollar el modelo hidráulico se debe contar con experiencia para plantear el proceso de estudio de inundaciones y con base en la disponibilidad y calidad de la información de la cuenca se selecciona el modelo más adecuado. Una de las principales ventajas de HEC-RAS, es que permite el intercambio de datos con SIG.

En la figura 2 se muestra el proceso metodológico para el análisis de inundaciones al utilizar conjuntamente un SIG y el modelo HEC-RAS. En el proceso de definición de zonas con riesgo de inundación se considera la siguiente información inicial para construir el modelo hidráulico:

- Imágenes aéreas. Sirven como guía para definir el cauce, *identificar estructuras hidráulicas y para visualizar la zona de inundación.*
- Datos geométricos del cauce. Esta información corresponde a las secciones transversales del cauce donde se desea realizar la modelación de la inundación.
- Información de gastos de diseño. Dicha información corresponde a la obtenida en el proceso de modelación hidrológica de la cuenca.
- Información de estructuras hidráulicas. Es necesario que se cuente con las características de puentes y/o alcantarillas existentes en el tramo del cauce donde se realizará la simulación, así como de tipos de materiales, contracciones y expansiones.
- Información adicional del cauce. Se requiere la definición del coeficiente de rugosidad del cauce de acuerdo con el tipo de material del lecho del cauce y sus taludes.

Figura 2

Proceso metodológico para la definición de zonas inundables



Fuente: Elaboración propia (1998).

Uno de los primeros pasos para la definición de las zonas de inundación es obtener los datos geométricos de los cauces, mediante levantamientos topográficos y de las estructuras hidráulicas (puentes, alcantarillas, diques, etc.) que alteran el flujo en el cauce de estudio, así como la determinación del coeficiente de rugosidad. Se integra la información topográfica levantada y la información digital disponible de la zona de estudio (continuo de elevaciones, ortofotos, cartas temáticas, trazas urbanas, entre otros). En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) dispone de esta información que puede ser integrada en un SIG para generar archivos compatibles al modelo hidráulico HEC-RAS. De esta manera, con la información topográfica, la complementaria de campo y

los hidrogramas o gastos de diseño obtenidos en la modelación hidrológica con HEC-1, se construye el modelo hidráulico en HEC-RAS para realizar la simulación. Los resultados obtenidos definen las profundidades y la zona de inundación.

La información generada en HEC-RAS es posteriormente procesada en un SIG, para finalmente obtener los mapas de inundación en archivos con distintos formatos para su publicación y distribución. Los mapas de inundación al visualizar las zonas afectadas, permiten a los que participan en la toma de decisión o a las autoridades de gobierno realizar un análisis de las afectaciones durante la inundación y sus efectos en la zona urbana o para el proceso de planeación de la mitigación de eventos futuros.

3. Conclusiones

Actualmente, la problemática de los recursos hídricos vista desde varias perspectivas es cada vez más frecuente y compleja en todo el mundo, donde solamente con un enfoque holístico podrán plantearse mejores soluciones a tales problemas. Sin duda, las inundaciones ocupan un lugar distintivo dentro de estos, porque de acuerdo con distintas investigaciones, son el fenómeno más recurrente en las últimas décadas, debido principalmente a dos factores: el cambio climático y el cambio de uso de suelo. A su paso, las inundaciones generalmente dejan pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños económicos. Esto se acentúa sobre todo en lugares que no cuentan con la infraestructura hidráulica y tecnológica para llevar a cabo una definición de zonas susceptibles de inundaciones y planes de emergencia.

La solución del problema de las inundaciones, como muchos otros relacionados al agua, necesariamente implica abordarlos desde un punto de vista interdisciplinario donde se integren especialistas hidrólogos, hidráulicos, geólogos, sociólogos, economistas, ambientalistas, antropólogos e historiadores, entre otros estudiosos, para disminuir o mitigar sus efectos.

los hidrogramas o gastos de diseño obtenidos en la modelación hidrológica con HEC-1, se construye el modelo hidráulico en HEC-RAS para realizar la simulación. Los resultados obtenidos definen las profundidades y la zona de inundación.

La información generada en HEC-RAS es posteriormente procesada en un SIG, para finalmente obtener los mapas de inundación en archivos con distintos formatos para su publicación y distribución. Los mapas de inundación al visualizar las zonas afectadas, permiten a los que participan en la toma de decisión o a las autoridades de gobierno realizar un análisis de las afectaciones durante la inundación y sus efectos en la zona urbana o para el proceso de planeación de la mitigación de eventos futuros.

3. Conclusiones

Actualmente, la problemática de los recursos hídricos vista desde varias perspectivas es cada vez más frecuente y compleja en todo el mundo, donde solamente con un enfoque holístico podrán plantearse mejores soluciones a tales problemas. Sin duda, las inundaciones ocupan un lugar distintivo dentro de estos, porque de acuerdo con distintas investigaciones, son el fenómeno más recurrente en las últimas décadas, debido principalmente a dos factores: el cambio climático y el cambio de uso de suelo. A su paso, las inundaciones generalmente dejan pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños económicos. Esto se acentúa sobre todo en lugares que no cuentan con la infraestructura hidráulica y tecnológica para llevar a cabo una definición de zonas susceptibles de inundaciones y planes de emergencia.

La solución del problema de las inundaciones, como muchos otros relacionados al agua, necesariamente implica abordarlos desde un punto de vista interdisciplinario donde se integren especialistas hidrólogos, hidráulicos, geólogos, sociólogos, economistas, ambientalistas, antropólogos e historiadores, entre otros estudiosos, para disminuir o mitigar sus efectos.

Además, los avances tecnológicos en materia de cómputo, la creación de *hardware* y *software*, así como el desarrollo teórico de algunas áreas de la ingeniería pueden contribuir a plantear mejores soluciones al problema de inundaciones que las existentes. Por ejemplo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ajustados a herramientas de modelado hidrológico e hidráulico, permiten procesar una gran cantidad de información de manera eficiente, pueden contribuir a dar solución no sólo al problema de inundaciones, sino a muchos otros problemas relacionados con el agua y el medio ambiente. Asimismo, estas herramientas permiten evaluar y explorar diversas alternativas de solución para el manejo de inundaciones bajo diversos escenarios hidrológicos y de cambio en el uso del suelo posibles, facilitando además, la toma de decisiones. En forma paralela al desarrollo de los SIG, se ha dado el de la percepción remota o telemetría y sin duda, en la próximas décadas los datos obtenidos de esta tecnología jugarán un rol aún más importante, dado su creciente desarrollo, mejorando la resolución espacial de los datos de topografía, uso de suelo, entre otros, contribuyendo de manera importante al manejo y solución de las inundaciones.

Bibliografía

- Arduino Gabriel, Paolo Reggiani and Ezio Todini (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4): 280–284.
- Blaikie Piers, Terry Cannon, Jan Davis y Ben Wisner (1996). *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*, La RED. Editorial Tercer Mundo. Editores Santa Fe Colombia.
- Borga Marco, Paolo Boscolo, Brancesco Zanon, and Marco Sangati (2007). Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology* 8: 1049-1067.

Además, los avances tecnológicos en materia de cómputo, la creación de *hardware* y *software*, así como el desarrollo teórico de algunas áreas de la ingeniería pueden contribuir a plantear mejores soluciones al problema de inundaciones que las existentes. Por ejemplo, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ajustados a herramientas de modelado hidrológico e hidráulico, permiten procesar una gran cantidad de información de manera eficiente, pueden contribuir a dar solución no sólo al problema de inundaciones, sino a muchos otros problemas relacionados con el agua y el medio ambiente. Asimismo, estas herramientas permiten evaluar y explorar diversas alternativas de solución para el manejo de inundaciones bajo diversos escenarios hidrológicos y de cambio en el uso del suelo posibles, facilitando además, la toma de decisiones. En forma paralela al desarrollo de los SIG, se ha dado el de la percepción remota o telemetría y sin duda, en la próximas décadas los datos obtenidos de esta tecnología jugarán un rol aún más importante, dado su creciente desarrollo, mejorando la resolución espacial de los datos de topografía, uso de suelo, entre otros, contribuyendo de manera importante al manejo y solución de las inundaciones.

Bibliografía

- Arduino Gabriel, Paolo Reggiani and Ezio Todini (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4): 280-284.
- Blaikie Piers, Terry Cannon, Jan Davis y Ben Wisner (1996). *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*, La RED. Editorial Tercer Mundo. Editores Santa Fe Colombia.
- Borga Marco, Paolo Boscolo, Brancesco Zanon, and Marco Sangati (2007). Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology* 8: 1049-1067.

- CENAPRED (2007). *Inundaciones*. Serie Fascículos. Segunda edición. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. México, D.F. 53 p.
- Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México* (2001). Secretaría De Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil y CENAPRED. México.
- Dow Charles L. and David R. DeWalle (2000). *Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States*. *Water Resources Research*. 36(7): 1835-1847.
- García Virginia, Coord (1996). *Historia y desastres en América Latina*, volumen I, CIESAS/RED (Red de estudios sociales en Prevención de Desastres en América Latina). Editoriales La Red Y CIESAS, México D. F.
- Garza Salinas y Rodríguez Velázquez (2001). *Desastres en México. Una perspectiva multidisciplinaria*, Universidad Iberoamericana/Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F.
- Mozaharuil Alam and MD Golam Rabbani (2007). *Vulnerabilities and responses to climate change for Dhaka*. *Environment and Urbanization*. 19(1):81-97.
- Rodríguez Daniel, Simone Lucatello y Mario Salinas, coords. (2008). *Políticas públicas y desastres, México*, Cooperación Internacional, Red Mexicana de Estudios Interdisciplinarios para la prevención de desastres, Instituto Mora. México D. F.
- Vogel Gretchen. (2002). *Central Europe floods: labs spared as climate change gets top billing*. *Science*. 297(5585):1256.
- Xiao Q., E. G. McPherson, J. R. Simpson and S. L. Ustin. 2007. *Hydrologic processes at the urban residential scale*. *Hydrological Processes* 21(16):2174-2188.

Hemerografía

- Ahmad Sajjad and Slobodan P. Simonovic (2001). Integration of heuristic knowledge with analytical tools for the selection of flood damage reduction measures. *Canadian Journal of Civil Engineering* 28: 208-221.

- Alberti Marina, Derek Booth, Kristina Hill, Bekkah Coburn, Christina Avolio, Stefan Coe, Daniele Spirandelli (2007). The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning* 80: 345–361.
- Baltas E. (2007). The combined use of weather radar and geographic information system techniques for flood forecasting. *Advances in Geosciences* 10: 117–123.
- Beighley R. Edward and Glenn E. Moglen (2002). Trend Assessment in Rainfall-Runoff Behavior in Urbanizing Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(1): 27-34.
- Cowden, J. R., D. Watkins, and T. E. Croley II. (2006). *Investigating urban land use effects on runoff by using the distributed large basin runoff model. Proceedings of The World Environmental and Water Resources Congress.*
- Dzul García Oscar Antonio, E. James Nelson, Ernesto P. Nuñez Peña, Ortiz Robles Fidel Alejandro, Kennard, M. E., Roberto Gaytán Bautista (2005). *Cooperación universitaria: "UAZ-Brigham Young University: modelación computacional, uso y conservación de los recursos hidráulicos en el estado de Zacatecas"*. IX Jornadas de investigación, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- Frei Christoph, Huw C. Davies, Joachim Gurtz and Christoph Schär (2000). Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment* 1: 281–299.
- Gaytán Roberto, José De Anda. and E. James Nelson (2008). *Computation of changes in the run-off regimen of the Lake Santa Ana watershed (Zacatecas, Mexico)*. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 13: 155–167. doi: 10.1111/j.1440-1770.2008.00364.
- Hlavcova, K., S. Kohnova, R. Kubes, J. Szolgay and M. Zvolensky (2005). An empirical method for estimating future flood risks for flood warnings. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (4): 431-448.

- Jothityangkoon, C. and Sivapalan, M. (2003). Towards estimation of extreme floods: Examination of the roles of runoff process changes and floodplain flows. *Journal of Hydrology* 281: 206–229.
- Ley de Protección Civil del Estado de Zacatecas en Periódico Oficial*, 1 de enero del 2000.
- Moretti G. and A. Montanari (2008). Inferring the flood frequency distribution for an ungauged basin using a spatially distributed rainfall-runoff model. *Hydrology Earth System Science* 12: 1141–1152.
- MUTHUKRISHNAN Suresh, Jon Harbor, Kyoung Jae Lim, and Bernard A. Engel (2006). Calibration of a simple rainfall-runoff model for long-term hydrological impact evaluation. *URISA Journal* 18 (2): 35-42.
- Ortiz Robles Fidel Alejandro, Rodríguez González Baudelio, Dzul García Óscar Antonio, E. James Nelson, Ernesto P. Núñez Peña, José Alfredo Femat Parga (2005). *Modelación hidrológica espacialmente distribuida de la microcuenca de Trancoso, Zacatecas*. IX Jornadas de investigación, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- PLATE E. J., J. Ihringer, and W. Lutz (1988). Operational models for flood calculation. *Journal of Hydrology* 100 (1-3): 489–506.
- Pitt Robert (2004). *Effects of stormwater runoff from development*. River Network. River Voices, Volume 14, Number 3:1-17.
- Aldama Álvaro, Aparicio Francisco, Ramírez Aldo, Mejía Roberto, Santillán Óscar, Esparza José, Gómez Juan (2005). Anuario. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 61-72. Mexico D. F.
- Sahoo Bhabagrahi, Chandranath Chatterjee, Narendra S. Raghuvanshi, Rajendra Singh, and Rakesh Kumar (2006). Flood estimation by GIUH-based Clark and Nash models. *Journal of Hydrologic Engineering* 11(6): 515-525.

- USACE (1998). *Flood Hydrograph Package User's Manual*. Hydrological Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. A. pp. 434.
- USACE (2000). *Hydrological Modeling Systems, HEC-HMS, Technical Reference Manual*. Hydrological Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. A. pp. 149.
- USACE (2002). *HEC-RAS, River Analysis Systems User's Manual*. Hydrological Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. A.