

# Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte I: propuesta metodológica

José Emilio Baró-Suárez  
Carlos Díaz-Delgado  
María Vicenta Esteller-Alberich

Universidad Autónoma del Estado de México

Georgina Calderón

Universidad Nacional Autónoma de México

*La estimación de daños económicos potenciales por inundación en una cuenca es de gran importancia para implementar medidas de mitigación. En efecto, una rápida y realista estimación de pérdidas económicas antes, durante y después de la inundación puede ser muy útil para la asignación de recursos orientados a la prevención, mitigación, recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas. La estimación de los daños potenciales es imprescindible en una planeación de medidas (estructurales y no estructurales) de control de inundaciones a largo plazo, en la implementación de medidas de emergencia, y sumamente útil en la planificación y gestión del uso de suelo en una cuenca. En este trabajo se presenta una propuesta metodológica para la cuantificación estandarizada de los daños tangibles, directos e indirectos, ocasionados por una inundación para el caso de zonas habitacionales y agrícolas en México. Para efectuar la estimación de daños en zonas habitacionales se construyeron las curvas de daños económicos en función de la altura de lámina de agua alcanzada por la inundación. Estas curvas fueron construidas para cada una de las categorías de viviendas identificadas. En zonas agrícolas se obtuvieron curvas de duración de la inundación en función de los daños económicos generados, pues en este caso el factor tiempo es el de mayor peso en la cuantificación de pérdidas. Con base en la información obtenida fue posible definir un modelo matemático de tipo regresivo para representar los daños económicos generados en función del tirante de agua alcanzando y de la duración de la inundación.*

**Palabras clave:** inundación, curvas altura de inundación-daños, estimación de pérdidas por inundación, zonas habitacionales, zonas agrícolas, México.

## Introducción

Se considera una inundación al flujo o a la invasión de agua por exceso de escurrimientos superficiales o por la acumulación de éstos en terrenos planos, ocasionada por la falta o insuficiencia de drenaje pluvial tanto natural como artificial. En general, la magnitud de una inundación provocada por eventos de origen hidrometeorológico depende de la intensidad de la lluvia, de su distribución en el espacio y tiempo, y del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, así como de las características

del suelo, y del drenaje natural y artificial de las cuencas (Bremer y Lara, 2001).

Como estas inundaciones se producen frecuentemente en las zonas llanas, donde se dan los mayores asentamientos humanos, fácilmente se puede deducir que provocan importantes daños humanos y socioeconómicos, además de los de naturaleza ambiental.

Con base en las etapas de evaluación de la pérdida promedio anual por inundación (PPAI) propuestas por Helweg (1992), que corresponden a la evaluación de las alturas máximas de inundación ocurridas, la elaboración

de la cartografía de la inundación, la identificación de las zonas inundadas y la definición de su tipo en función de la disponibilidad de curvas de daños potenciales, la determinación de la curva de costo del daño por inundación en función de las alturas máximas de inundación alcanzadas y la cuantificación del costo de la inundación, en este trabajo se ha optado en profundizar en la metodología para el establecimiento de las curvas por daños potenciales ocasionados por inundación.

En los análisis de los daños producidos por inundaciones pueden diferenciarse los *daños tangibles*, que son los daños que pueden ser medidos con base en un valor monetario, y los *daños intangibles*, que no pueden ser medidos en tales términos. Los daños tangibles pueden ser divididos en dos subtipos, los *daños directos*, producidos por contacto con el agua o por sumersión, y los *daños indirectos*, que son los causados por la interrupción de las interrelaciones físicas y económicas, e incluyen, por ejemplo, la interrupción del transporte carretero, de los servicios públicos, pérdidas en salarios y beneficios en los negocios, así como otras consecuencias de las inundaciones, como los costos por el desahüe de la inundación (James y Lee, 1971).

La estimación de los daños económicos generados por una inundación, potencialmente factible, es necesaria para llevar a cabo una planificación que tenga por objetivo la mitigación de los efectos provocados por la inundación, así como para realizar una gestión apropiada en caso de emergencia. Además, esta estimación de daños resulta ser una herramienta indispensable para la gestión y planificación del uso de suelo en una cuenca.

Los métodos para evaluar, en términos de daños una inundación, se pueden implementar integrando una función daño/profundidad y daño/duración de la crecida, con una base de datos espacial que incluya información sobre usos del suelo y características hidráulicas. Esta base de datos será el soporte para determinar los tipos, severidad y localización de los daños ocasionados por una inundación (Boyle *et al.*, 1998).

Para calcular los daños tangibles directos se usan las curvas de daños, las cuales describen la relación entre los dos principales factores de las inundaciones: profundidad de la inundación y duración (Lekuthai y Vongvisessomajai, 2001). Para el caso de daños tangibles indirectos se suelen estimar como un porcentaje fijo de los daños directos, siendo los porcentajes propuestos por Kates (1965) los más empleados.

Ejemplos sobre cálculos de daños económicos producidos por inundaciones se pueden encontrar en diferentes países del mundo como en Estados Unidos (Olsen *et al.*, 1998), Canadá (Boyle *et al.*, 1998), Tailandia (Lekuthai y Vongvisessomajai, 2001), China (Renyi y

Nan, 2002) y Japón (Dutta *et al.*, 2003), aplicándose en la mayoría de estos estudios las curvas de daños. También se pueden encontrar ejemplos en países de Latinoamérica como Argentina (Paoli y Calvo, 1998), Venezuela (López, 2002) y Brasil (Machado *et al.*, 2005). En México se ha propuesto una metodología para determinar el impacto social de los riesgos hidrológicos (Santillán *et al.*, 1998); este impacto incluye los índices de impacto sobre las vidas, sobre los bienes materiales y sobre la conflictividad social, así como el índice de marginación social, pero no se dispone de una metodología específica para el cálculo de daños económicos.

En el caso de México, hay que tener en cuenta que los daños de fenómenos hidrometeorológicos como huracanes y lluvias intensas representan en promedio 4,500 millones de pesos anuales (CNA, 2001).

Así pues, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una propuesta metodológica aplicable a la república mexicana para la construcción de curvas de daños económicos potenciales por inundación en zonas habitacionales y agrícolas para el caso de daños tangibles.

## Material y métodos

La metodología que se expone a continuación será explicada a través de un estudio de caso; las inundaciones en el curso alto del río Lerma (Díaz-Delgado *et al.*, 1998, 2004; Aparicio, 2001), por lo que la información que se recopiló en la base de datos hace referencia a esta zona geográfica (ilustración 1). Los resultados de la aplicación de esta metodología en el estudio de caso se presentan en el trabajo de Baró *et al.* (2006b).

### a) Base de datos

La base de datos es necesaria para soportar el análisis de determinación de los tipos, severidad y localización de daños causados por inundación.

### Caracterización de las zonas habitacionales

La información sobre uso del suelo y actividades humanas debe incluir los siguientes aspectos en el caso de las zonas habitacionales (adaptado de Boyle *et al.*, 1998):

- Características socioeconómicas de la población. La información se centra en los indicadores socioeconómicos e índice de marginación por región, municipio y localidad del Estado de México con base en el censo del año 2000 (COESPO, 2001). También se ha tenido en cuenta el porcentaje de población que percibe hasta dos salarios mínimos (INEGI, 2000). La cuantía del salario mí-

nimo por área geográfica (la zona de estudio corresponde al área geográfica C, lo cual representa un salario mínimo diario de \$40.30 para el año 2003) se ha obtenido de la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos (CNSM, 2003). También se ha consultado información de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH, 2002).

- Valor unitario de las construcciones. Se ha considerado la información publicada en la Gaceta del Gobierno del Estado de México (1998, 2002) sobre las clases de viviendas en relación con su estructura básica, la cual se recopila en el cuadro 1, donde se presentan los valores promedios unitarios (por m<sup>2</sup>) de construcción para cada una de estas clases de viviendas para el municipio de Toluca, municipio ubicado en el curso alto del río Lerma (ilustración 1).

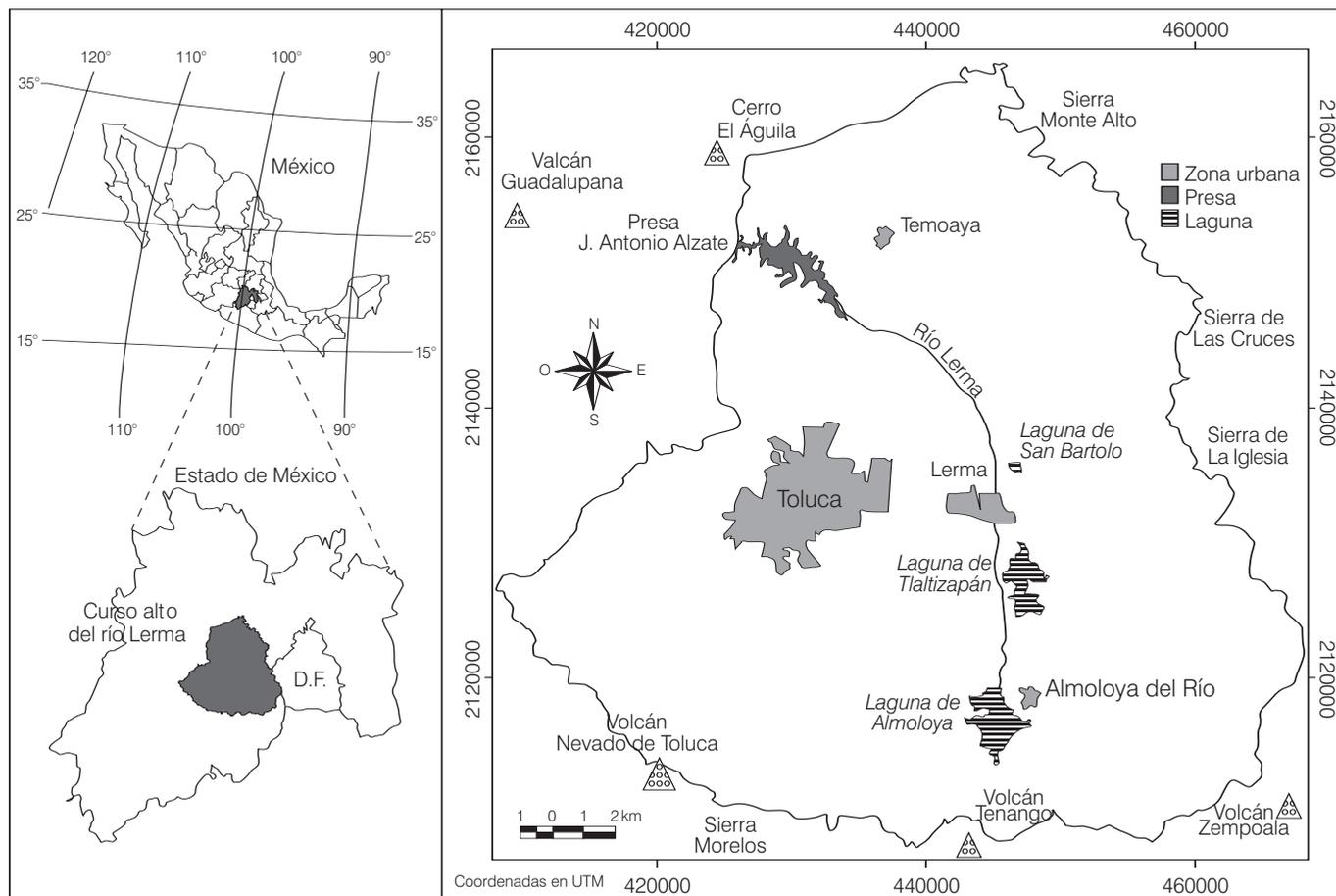
- Información sobre los bienes existentes en las viviendas. Esta información se ha recopilado a partir del Cuestionario Ampliado empleado en el XII Censo de Población y Vivienda 2000 (INEGI, 2000) y con base en encuestas de

campo. La cuantificación de estos bienes se ha llevado a cabo recogiendo información en diferentes casas comerciales, así como a partir de la información proporcionada por la Profeco para el periodo del 1 al 16 de abril del 2003.

Con el objetivo de acotar esta información se utilizó el SCINCE 2000 (INEGI, 2002a), Sistema para la Consulta de Información Censal, el cual cuenta con los resultados definitivos del XII Censo General de Población y Vivienda 2000. El SCINCE es un sistema que permite relacionar los datos estadísticos con el espacio geográfico al que pertenecen. Para ello cuenta con información estadística que se puede consultar para el ámbito federal, municipal, o por localidad urbana, y dentro de éstas, para grupos de manzanas, las cuales se reconocen como Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).

- Información correspondiente a la altura a la cual el agua puede entrar en las viviendas. Las características hidráulicas de una cuenca se pueden obtener con el empleo de algún modelo de simulación hidrológico-hidráulico. Estas características incluyen los caudales del río para diferentes

**Ilustración 1. Localización geográfica de la zona de estudio. Curso alto del río Lerma (México).**



**Cuadro 1. Tabla de valores unitarios de construcciones para uso habitacional para el año 2003. Valores para el municipio de Toluca (Gaceta del Gobierno del Estado de México, 2002).**

Código	Clase	Categoría	Valor unitario (pesos \$M.N. por m <sup>2</sup> )
HA1 Baja	Precaria	Bajo	\$ 302.00
HA2 Media		Medio	\$ 715.00
HA3 Alta		Alto	\$ 1,042.00
HB1 Baja	Económica	Bajo	\$ 1,296.00
HB2 Media		Medio	\$ 1,499.00
HB3 Alta		Alto	\$ 1,667.00
HC1 Baja	Interés social	Bajo	\$ 1,817.00
HC2 Media		Medio	\$ 1,966.00
HC3 Alta		Alto	\$ 2,140.00
HD1 Baja	Regular	Bajo	\$ 2,333.00
HD2 Media		Medio	\$ 2,585.00
HD3 Alta		Alto	\$ 2,907.00
HE1 Baja	Buena	Bajo	\$ 3,316.00
HE2 Media		Medio	\$ 3,828.00
HE3 Alta		Alto	\$ 4,463.00
HF1 Baja	Muy buena	Bajo	\$ 5,237.00
HF2 Media		Medio	\$ 6,167.00
HF3 Alta		Alto	\$ 6,910.00
HG1 Baja	Lujo	Bajo	\$ 7,251.00
HG2 Media		Medio	\$ 8,236.00
HG3 Alta		Alto	\$ 9,360.00

periodos de retorno y las elevaciones potenciales que alcanzaría el agua en las zonas inundables. Un ejemplo del uso de este tipo de modelos se puede consultar en Díaz-Delgado y Vega (2001), donde se exponen los resultados obtenidos para una cuenca ubicada en el curso alto del río Lerma.

#### Caracterización de las zonas agrícolas

En el caso de las zonas agrícolas, la evaluación de los daños se suele realizar a partir del ingreso económico de los agricultores, el cual se ve afectado una vez producida la inundación; por lo tanto, hay que tener presente, fundamentalmente, la disminución o pérdida de la cosecha (Estrela, 1996). Es importante señalar que esta pérdida parcial o total de la cosecha está muy influenciada por la duración de la inundación (Lafitte, 2001). Una duración corta, de uno a tres días, puede causar un retraso del desarrollo sin apenas afectar el rendimiento, mientras que una duración prolongada puede provocar daños irreparables en las plantas y comprometer la cosecha. Otro factor decisivo es la época en que se produce la inundación.

Con base en estas consideraciones, para evaluar los daños en zonas agrícolas se debe disponer, como mínimo, de la siguiente información:

- Tipos de cultivo: se han identificado, inicialmente, con base en la información sobre vegetación y uso del suelo del INEGI (2003), así como con información recopilada en recorridos de campo.
- Estacionalidad de los cultivos: de los cultivos existentes se establece cuál es su ciclo agrícola para de esta forma definir en qué fase de su desarrollo está el cultivo cuando existe más probabilidad de que se produzca una inundación (época de lluvias).
- Productividad: la productividad de cada uno de los cultivos se calcula tomando la información disponible en el Anuario Estadístico del Estado de México (INEGI, 2002b). Se selecciona información sobre volumen de la producción agrícola para los diferentes cultivos identificados, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua (temporal y riego).
- Ingresos de la población por la producción de su cosecha: para el cálculo de los ingresos se toman en cuenta los datos que se presentan en el Anuario Estadístico del Estado de México (INEGI, 2002b).

#### b) Daños tangibles directos – curvas de daños potenciales

Para el cálculo de los daños tangibles directos normalmente se utilizan las curvas de daños, las cuales describen la relación de los dos principales factores de las inundaciones, como son la profundidad de la inundación (o altura de lámina de agua), y la duración de ésta, con los daños económicos que provoca la inundación.

Una primera clasificación de las curvas ha sido la definición de curvas para las zonas habitacionales y para las zonas agrícolas. Dentro de las zonas habitacionales se ha llevado a cabo una subdivisión en función de la clase de vivienda y de las características socioeconómicas ligadas con esa clase de vivienda; en el caso de las zonas agrícolas, se ha efectuado una subdivisión en función del tipo de cultivo.

A cada uno de estos tipos de viviendas se les ha hecho corresponder unos bienes. El valor de estos bienes ha sido cuantificado, para posteriormente analizar cuál es el daño en cada uno de dichos bienes en función de la altura de la lámina de agua. Asimismo, se han considerado los daños a la propia construcción.

Las alturas de lámina de agua a evaluar corresponden a las obtenidas bajo el empleo de un modelo hidrológico-hidráulico, de forma que a partir de la altura máxima de la

lámina de agua que provoca la inundación se establecen intervalos regulares de altura de lámina de agua.

En el caso de las zonas agrícolas, se definen las curvas de daños-duración de la inundación para los cultivos dominantes, ya que la duración de la inundación es un factor decisivo en los cultivos. De igual manera se tendrá en cuenta si el cultivo es de temporal o de riego, ya que el rendimiento y el valor económico son diferentes.

De cada una de estas curvas se obtiene una ecuación, cuyos parámetros servirán para calcular los daños económicos ocasionados en una zona determinada por una inundación de una altura de lámina de agua determinada.

### c) *Daños tangibles indirectos*

En el caso de daños tangibles indirectos (coste adicional por desvíos alrededor del área inundada, las pérdidas derivadas de la interrupción de servicios y en negocios y salarios, los costos de limpieza después de la inundación, los incrementos de costes en tareas de previsión y alarma, las evacuaciones, los alojamientos temporales, etcétera) se calculan como un porcentaje fijo de los daños directos. Estos porcentajes han sido propuestos por Kates (1965), siendo su valor de 15% para zonas habitacionales y de 10% en zonas agrícolas.

Estos porcentajes son aceptados por razones prácticas, ya que el tiempo que se requiere para un análisis detallado de los daños indirectos es demasiado grande para que pueda justificarse el empleo de este tiempo en el estudio particular de una inundación dada (James y Lee, 1971).

Ayala *et al.* (1986) señalan que para realizar una estimación previa de los daños tangibles indirectos se requiere contar con registros de daños indirectos de inundaciones anteriores, de los cuales hasta hoy en día no se disponen para la república mexicana.

## **Resultados y discusión**

### *Curvas de daños potenciales en zonas habitacionales*

Con base en el análisis de la clasificación de las viviendas (cuadro 1) y teniendo en cuenta la encuesta de gastos e ingreso (ENIGH, 2002), se estimaron los salarios mínimos (S.M.) que aproximadamente correspondería a cada clase de vivienda (<1.0 S.M. para clase precaria; de 1.0 a 2.0 S.M. para clase económica; de 2.0 a 5.0 S.M. para clase de interés social; de 5.0 a 8.0 S.M. para clase regular, y > 8.0 S.M. para clase buena-muy buena y lujo), lo cual, a su vez, permitió determinar los bienes tanto en calidad como en cantidad que podría haber en

cada vivienda según su clase, ya que a mayor ingreso hay una mayor capacidad de gasto.

Una vez definidos los bienes existentes en cada vivienda tipo se determinó el porcentaje de afectación de estos bienes en función del nivel que alcance el agua dentro de la vivienda. Este análisis se realizó con el objetivo de tener una cuantificación más realista del valor del daño producido por el contacto directo con el agua. Una vez determinado el porcentaje de afectación, éste se aplicó al valor de cada uno de los bienes, teniendo en cuenta su costo.

Para el caso de los daños a las propias viviendas en sus estructuras, se llevó a cabo una consulta con constructores y aseguradores para poder establecer los porcentajes de afectación en función de la altura de lámina de agua.

A continuación se presenta de forma detallada el proceso de construcción de los diferentes tipos de curvas para cada clase de vivienda.

### Caso de vivienda clase precaria

En primer lugar se definió la relación de bienes que como promedio existen en esta clase de vivienda. A cada uno de estos bienes se le hizo corresponder un precio unitario para finalmente obtener el costo total de todos ellos (cuadro 2). Además se consideraron los daños estructurales que podría tener la vivienda por efecto de la inundación. Para ello se tomó un valor promedio de la superficie construida que puede tener esta clase de vivienda. A cada m<sup>2</sup> se le asignó un valor que corresponde al definido en la Gaceta del Gobierno del Estado de México (2002). Como dentro de la clase precaria existen tres categorías: (baja, media y alta), se tomó como punto de referencia la categoría alta para el caso del municipio de Toluca (cuadro 1).

El siguiente paso fue establecer los intervalos de altura de lámina de agua para definir de este modo el porcentaje de afectación que pudieran tener cada uno de estos bienes, así como la propia vivienda, al entrar en contacto con el agua (cuadro 2). Para ello se consideró, en el caso de los electrodomésticos, a qué altura se encuentra instalado el motor y, en caso de los muebles, cuáles son sus dimensiones promedio.

Las alturas de lámina de agua definidas fueron de 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.70 y 1.00 m. No se definieron más alturas, ya que a esta última los daños totales alcanzarían un valor del 100%. Hay que tener en cuenta que cuando se trata de inundaciones someras, los daños a los edificios y sus bienes suele aumentar de forma aproximadamente lineal con el nivel de la inundación. Para inundaciones más importantes, los daños aumentan cada vez más lentamente con la altura de las aguas, hasta alcanzar un punto en

**Cuadro 2. Porcentaje y valor de afectación por inundación en viviendas de clase precaria (en pesos \$M.N. 2003 y en número de salarios mínimos).**

Bienes en la vivienda	Unidad(es)	Precio unitario \$M.N.	Total \$M.N.	Altura de lámina de agua (m)														
				0.10		0.20		0.30		0.40		0.50		0.70		1.00		
				%	\$M.N.	%	\$M.N.	%	\$M.N.	%	\$M.N.	%	\$M.N.	%	\$M.N.	%	\$M.N.	
Televisión	1	1,300	1,300					80	1,040	90	1,170	100	1,300	100	1,300	100	1,300	
Refrigerador	1	1,800	1,800			70	1,260	80	1,440	90	1,620	100	1,800	100	1,800	100	1,800	
Estufa	1	1,305	1,305					80	1,044	90	1,174	100	1,305	100	1,305	100	1,305	
Sala y comedor	1	500	500	20	100	30	150	50	250	70	350	80	400	100	500	100	500	
Colchón	4	600	2,400									100	2,400	100	2,400	100	2,400	
Recámaras	2	2,000	4,000					80	3,200	90	3,600	100	4,000	100	4,000	100	4,000	
Ropa	1	3,000	3,000					50	1,500	70	2,100	100	3,000	100	3,000	100	3,000	
Daños estructurales	40	1,042	41,680							20	8,336	50	20,840	70	29,176	100	41,680	
Sumatoria (\$M.N.)						100	1,410		7,430		18,220		34,914		43,481		55,985	
Núm. Salarios mínimos (2003)						2		35		184		452		866		1,079		1,389

que los daños no sufren incrementos, a menos que se produzcan fallas estructurales.

Otra altura de lámina de agua de referencia es la "cota de mesa". A esa altura se pueden subir los bienes que se desean preservar sin necesidad de transporte, por lo que los vecinos colocan las cosas de valor sobre mesas, cierran con llave, pueden evacuar la casa y regresan cuando la inundación ha cesado. Si el agua supera la citada cota de mesa, los costos de inundación se incrementan sustancialmente. La cota de mesa tiene un valor de entre 0.80 (Paoli y Calvo, 1988) y 0.90 m (Lopardo y Seoane, 2000).

En cuanto a los daños estructurales en la vivienda, hay que señalar que como se trata de viviendas construidas con materiales de muy baja calidad, la afectación puede ser muy elevada; por lo tanto, se estimó que la afectación se inicia con una altura de lámina de agua de 0.40 m, alcanzándose una afectación del 100% con una altura de lámina de agua de 1.00 m (cuadro 2).

Una vez asignados los porcentajes de afectación se calculó el valor correspondiente con base en el costo de cada rubro y para cada altura de lámina de agua, de modo que se obtiene el valor en pesos (\$ M.N.) de los daños económicos para cada altura de lámina de agua (cuadro 2).

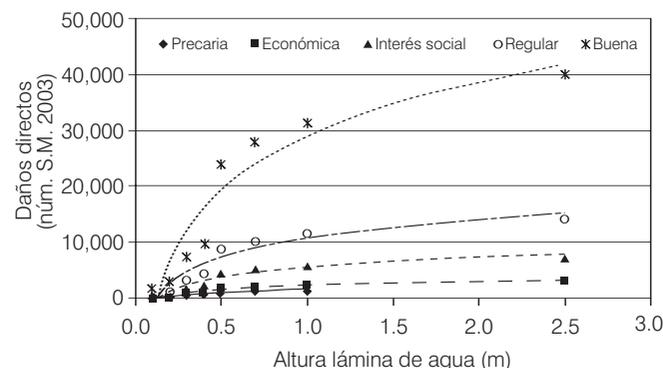
Estos daños totales se convirtieron en número de salarios mínimos, teniendo en cuenta que un salario mínimo equivale a \$40.30 para el año 2003; de esta forma se tiene, para cada altura de lámina de agua, el monto de los daños económicos en vivienda, valorados en el número de salarios mínimos (cuadro 2).

Con estos datos se construyó una gráfica (ilustración 2), donde el eje horizontal corresponde a valores de al-

tura de lámina de agua en metros (*h*), y en el eje vertical a los daños económicos ocasionados en una vivienda en unidades de número de salarios mínimos (DDH). Con base en esta información se construyó un modelo matemático de tipo regresivo. El modelo elegido fue aquel con el que se obtuvo el valor más alto del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que en este caso correspondió a un ajuste lineal, con un coeficiente de determinación de 0.95 (cuadro 3). La ecuación del modelo logarítmico permite calcular los daños potenciales directos para una vivienda precaria, en número de salarios mínimos, para una altura de lámina de agua dada.

Esta gráfica tiene la particularidad de utilizar como unidades de medida el número de salarios mínimos, por lo que puede ser aplicada para cualquier año, ya que para estimar los daños en pesos bastaría multiplicar el

**Ilustración 2. Curva de daños potenciales por inundación en zonas habitacionales. Clase de vivienda con una planta.**



**Cuadro 3. Ecuaciones obtenidas de las curvas de daños potenciales directos en zonas agrícolas y habitacionales (*h*, altura de lámina de agua, *t* duración de la inundación, DDH daños directos habitacionales, DDA daños directos agrícolas).**

Uso del suelo	Ecuación	R <sup>2</sup>
Habitacional precario	DDHp = 1712.9 <i>h</i> - 210.42	0.95
Habitacional económico	DDHe = 1016.6Ln( <i>h</i> ) + 2030.7	0.89
Habitacional de interés social, una planta	DDHis = 2551.0Ln( <i>h</i> ) + 5416.4	0.95
Habitacional de interés social, dos plantas	DDHisp = 2242.7.9Ln( <i>h</i> ) + 4607.6	0.98
Habitacional regular, una planta	DDHr = 4969.9Ln( <i>h</i> ) + 10463	0.92
Habitacional regular, dos plantas	DDHrp = 4358.8Ln( <i>h</i> ) + 8963.7	0.97
Habitacional > buena, una planta	DDHb = 13878Ln( <i>h</i> ) + 28776	0.89
Habitacional > buena, dos plantas	DDHbp = 12210Ln( <i>h</i> ) + 24788	0.97
Maíz grano temporal	DDAmgt = 86.742 Ln( <i>t</i> ) - 17.483	0.87
Maíz grano bajo riego	DDAmgr = 110.17 Ln( <i>t</i> ) - 22.204	0.87
Maíz forrajero temporal	DDAmft = 416.61 Ln( <i>t</i> ) - 83.969	0.87
Maíz forrajero bajo riego	DDAmfr = 438.77 Ln( <i>t</i> ) - 88.969	0.87

número de salarios mínimos correspondiente a la altura de la lámina de agua por el valor del salario mínimo en ese año en particular.

También es posible notar, en la ilustración 2, que a partir de una altura de lámina de agua de 0.50 m se produce un cambio en el comportamiento de los datos. Esto es consecuencia de que para alturas de lámina mayor, el incremento de los daños se debe fundamentalmente a la afectación en la estructura de la vivienda.

Caso de vivienda clase económica

El modo de establecer la curva de daños potenciales para viviendas de clase económica fue el mismo que en el caso anterior; las diferencias estriban en que se tienen otros bienes como la radiograbadora, además de un mayor número de ellos, y por otro lado, el costo de tales bienes es superior. Hay que tener en cuenta que estas viviendas están construidas con mejores materiales y los daños estructurales que pueden tener son menores. Además, para que se produzca un daño total tendrían que presentarse condiciones muy extremas, por ejemplo una altura de lámina de agua mucho mayor que en el anterior caso de vivienda precaria, por lo que mientras que en la vivienda precaria se considera una afectación del 100% para una lámina de agua de 1.00 m, en la vivienda económica esta afectación se alcanza con una lámina de 2.50 metros.

Con todos estos datos se construyó la curva de daños potenciales por inundación para viviendas de clase económica (ilustración 2). Para esta curva se obtuvo un ajuste logarítmico con un coeficiente de determinación de 0.89 (cuadro 3).

Caso de vivienda clase interés social

Bajo el empleo de la misma metodología, pero teniendo en cuenta que en este tipo de viviendas existen más bienes que en los anteriores casos (videograbadora, lavadora, microondas, armarios) y que éstos tienen un costo mayor, se construyó la curva correspondiente (ilustración 2).

También se consideró el aspecto constructivo, ya que en numerosas ocasiones estas viviendas suelen ser de dos plantas, por lo que la distribución de los bienes difiere de la de una vivienda de una sola planta. Generalmente en la planta baja se encuentran todos los electrodomésticos, enseres de cocina, la sala y el comedor, y en la planta alta se ubican las recámaras y los armarios. Para las viviendas con dos plantas, las alturas de lámina de agua consideradas fueron de 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.70, 1.00, 2.50., 2.60, 2.70, 2.80, 3.00, 3.20 y 3.50 m (ilustración 3).

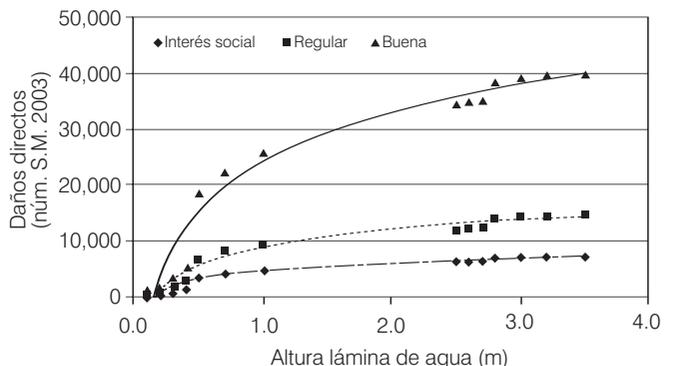
Para el caso de la vivienda de una sola planta, se ajustó un modelo de tipo logarítmico, con un coeficiente de determinación de 0.95, y para la vivienda de dos plantas también se ajustó un modelo logarítmico, con un coeficiente de determinación de 0.98 (cuadro 3).

Las ilustraciones 2 y 3 representan cómo los daños van aumentando de forma aproximadamente lineal con respecto del nivel de las aguas, pero llega un punto en que los daños se incrementan más lentamente hasta que se producen los daños estructurales en la vivienda, lo que implica una afectación del 100%, tal y como lo reporta Estrela (1996).

Caso de vivienda clase regular

La construcción de la curva de daños potenciales por inundación para viviendas de clase regular se realizó de manera similar a la de interés social. En este tipo de

**Ilustración 3. Curva de daños potenciales por inundación en zonas habitacionales. Clase de vivienda con dos plantas.**



viviendas existen los mismos bienes que en el caso de las viviendas de interés social, pero su costo es mayor.

Las ilustraciones 2 y 3 presentan las curvas de daños potenciales para una vivienda de clase regular de una y dos plantas, respectivamente. Las curvas de ajuste que se establecieron corresponden a un tipo de modelo logarítmico con un coeficiente de determinación de 0.92, para el caso de una vivienda de una planta y de 0.97 para dos plantas (cuadro 3).

#### Caso de vivienda clase buena-muy buena-lujo

Para este caso se optó por agrupar en una sola clase todos aquellos tipos de viviendas que corresponden a las clases de buena, muy buena y lujo, que se definen en la Gaceta Oficial del Estado de México (1998). Esta agrupación se definió con base en el hecho de que los bienes existentes en esta clase de viviendas son muy similares en promedio y, además, su presencia en zonas inundables suele ser mínima.

También se definen viviendas de una planta y dos plantas, con las mismas características señaladas en los anteriores casos estudiados. En las ilustración 2 y 3 se presentan las curvas de daños potenciales para el presente caso en estudio. Se aprecia que la curva de ajuste corresponde nuevamente al de tipo logarítmico y presenta un coeficiente de determinación de 0.89 para el caso de una planta y de 0.97 para el de dos plantas (cuadro 3).

#### Curva de daños potenciales en zonas agrícolas

Al igual que en el 80% del país, el principal cultivo del área de estudio es el maíz, tanto el de grano como el forrajero. Se trata de un cultivo tradicional y muy arraigado en la cultura nutricional del mexicano, de fácil desarrollo y de producción anual, cuyo ciclo agrícola comprende desde mayo hasta noviembre.

En el caso del maíz, su comportamiento en los terrenos inundados varía de acuerdo con la fase de desarrollo de la planta, la cual se puede expresar como la altura de la planta; si la planta tiene una altura inferior a los 30 cm es más susceptible a los efectos de la humedad; y si la zona permanece inundada más de tres días, los efectos negativos son considerables.

Estos efectos negativos también están en función de los sedimentos que arrastre el río, ya que si son lodos industriales y/o urbanos, entonces se acelera el deterioro de la planta.

Cuando la planta de maíz tiene una altura superior a 30 cm, altura que se alcanza por lo general durante los meses de julio, agosto y septiembre (periodo de posi-

**Cuadro 4. Valor de la producción de maíz de grano y forrajero para el Distrito de Desarrollo Rural de Toluca (INEGI, 2002a) (número de salarios mínimos para 2003).**

Cultivo	Valor cultivo bajo riego (\$M.N./ha)	Valor cultivo de temporal (\$M.N./ha)	Valor cultivo bajo riego (núm. de S.M./ha)	Valor cultivo de temporal (núm. de S.M./ha)
Maíz grano	7,018	5,532	174	137
Maíz forrajero	27,944	26,524	693	658

bles inundaciones), la planta puede resistir más de seis días bajo los efectos de la humedad y sólo se verá afectada por la corriente de agua, ya que esa fuerza pueda provocar la caída de la planta y que se produzcan pérdidas considerables en la cosecha.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se estimaron los daños en un cultivo de maíz con base en el valor de la producción (cuadro 4), en su variedad de maíz de grano y maíz forrajero, valor que se obtuvo del Anuario Estadístico del Estado de México (INEGI, 2002b). También se tomó en consideración si el cultivo era de riego o de temporal, ya que este hecho afecta a la producción (tonelada de grano por hectárea) y, por tanto, al valor de la cosecha.

En función de la duración de la inundación y considerando que el cultivo tuviese una altura superior a los 30 cm, se estableció el porcentaje de afectación que tendría el cultivo (cuadro 5). Una vez establecido el porcentaje de afectación para cada cultivo, se calculó el valor de los daños, tomando como punto de partida el valor de la cosecha de una hectárea en número de salarios mínimos (cuadro 5).

En la ilustración 4 se presentan las curvas de daños potenciales por inundación para el caso de un cultivo de maíz de grano tanto bajo riego como de temporal. En esta ilustración el eje horizontal representa la duración de la inundación ( $t$ ) y el eje vertical los daños económicos (DDA). Los modelos obtenidos son de tipo logarítmico, y aunque la ecuación difiere, los coeficientes de determinación tienen un mismo valor de 0.87 (cuadro 3).

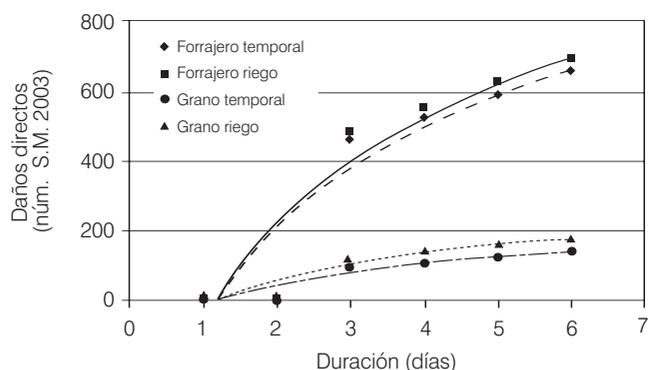
Los modelos de daños potenciales para un cultivo de maíz forrajero bajo riego y de temporal se presentan en la ilustración 4. Se aprecia que las curvas de ajuste son de tipo logarítmico, con un mismo coeficiente de determinación del 0.87.

Estas ecuaciones sólo serían aplicables para cuando la planta tuviese una altura superior a los 30 cm; de forma que si fuese menor a esta altura no se aplicarían estas ecuaciones y se supondría que se produce una afectación del 100% en los cultivos (pérdida total).

**Cuadro 5. Porcentaje de afectación en cultivos de maíz de grano y forrajero, y valor de los daños en número de salarios mínimos para el año 2003 por hectárea.**

Cultivo	Duración de la inundación											
	1 día		2 días		3 días		4 días		5 días		6 días	
	%	Núm. S.M./ha	%	Núm. S.M./ha	%	Núm. S.M./ha	%	Núm. S.M./ha	%	Núm. S.M./ha	%	Núm. S.M./ha
Grano riego	0	0	0	0	70	122	80	139	90	157	100	174
Grano temporal	0	0	0	0	70	96	80	110	90	110	100	137
Forrajero riego	0	0	0	0	70	485	80	554	90	554	100	693
Forrajero temporal	0	0	0	0	70	460	80	526	90	526	100	658

**Ilustración 4. Curva de daños potenciales por inundación en cultivos de maíz temporal (altura de la planta mayor a 0.30 m).**



En el caso en que la planta tuviese una altura de más de 30 cm, sólo habría que sustituir en la ecuación el valor de  $t$  por la duración de la crecida ( $t$  en días), de forma que haciendo esta sustitución se tendría el valor de DDA, que representaría los daños tangibles directos potenciales en zonas agrícolas (DDA en número de salarios mínimos).

### Conclusiones

La base de datos sobre los bienes contenidos en las viviendas ha ayudado a cuantificar, para cada clase de vivienda, el tipo de bienes, su número y valor, aspecto importante para posteriormente inferir los daños económicos ocasionados por una inundación.

Las curvas de daños tangibles directos potenciales provocados por una inundación en zonas habitacionales ha permitido establecer, por medio de modelos matemáticos de tipo regresivo, los daños ocasionados por una inundación de una altura de lámina de agua alcanzada para cada una de las clases de vivienda definidas. La aplicación de estas curvas en otras cuencas de la repu-

blica mexicana necesitaría una evaluación previa para comprobar si las características socioeconómicas son similares, lo cual sí permitiría utilizar las mismas curvas o bien habría que construir nuevamente las curvas de daños, partiendo de una base de datos específica de la cuenca de estudio y siguiendo los pasos expuestos en este trabajo.

En el caso de las zonas agrícolas, el cultivo que puede ser más afectado es el de maíz (grano y forrajero). Las curvas de daños tangibles directos potenciales para el maíz se han estimado en función de la duración de la crecida, considerando que la planta de maíz tenga una altura superior a 30 cm. Si la altura es menor, se ha definido una pérdida total del cultivo, sea cual sea la duración de la crecida. Si en la zona inundada existiese otro tipo de cultivo, sería necesario determinar la curva de daños respectiva.

Los modelos de estimación de daños por inundación han sido construidos en función del número de salarios mínimos, con la finalidad de que dichos modelos permanezcan vigentes a través del tiempo.

Para la implementación de esta metodología es necesario contar, en primer término, con los resultados del análisis de frecuencias de caudales máximos de la cuenca en estudio, así como de los tirantes máximos alcanzados, resultado del tránsito de las avenidas en la cuenca. Este estudio de tránsito de avenidas requiere del empleo de un modelo hidrológico-hidráulico, con objeto de obtener la altura de lámina de agua y la superficie inundada para cada uno de los caudales de diferente periodo de retorno.

Finalmente, es necesario subrayar que el desarrollo de esta metodología ha tenido como objetivo contribuir en la construcción de una herramienta más cercana a la realidad para la estimación de daños por inundación, etapa esencial en un estudio de asignación de recursos orientados a la prevención, mitigación, recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas.

## Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a aquellas personas que han ayudado en su realización, así como a los revisores por sus valiosas aportaciones. El M. en G. Baró manifiesta su agradecimiento a la UNAM por el apoyo ofrecido a través de una beca para cursar sus estudios de maestría en dicha institución.

Recibido: 24/08/2005  
Aprobado: 12/05/2006

## Referencias

- AYALA, L., AYALA, J.C. y CISNEROS, R. *Metodología para el estudio y evaluación económica de proyectos de defensa fluvial. Aplicación al río Cachaporal entre Rancagua y Doñihue*. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 1986.
- APARICIO, J. Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En Hansen, A.M. y van Afferden (editors). *The Lerma Chapala Watershed. Evolution and management*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, pp. 3-30.
- BARO, J.E., DÍAZ-DELGADO, C., CALDERÓN, G. y ESTELLER, M.V. Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México Parte II: Caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. En prensa, 2007. **OJO AUTOR, NO SE MENCIONA EN EL CUERPO DEL TEXTO.**
- BOYLE, S.J., TSANIS, I.K. y KANAROGLOU, P.S. Developing Geographic Information Systems for land use impact assessment in flooding conditions. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 124, 1998, pp. 89-98.
- BREMER, M.H. y LARA, C.A. *Proyecto de Atlas de Riesgo de Inundación de la Ciudad de Monterrey*. Reporte. México, D.F.: ITESM Campus Monterrey, 2001, 6 pp.
- CNA. *Fichas temáticas sobre el sector hidráulico: obras de protección contra inundaciones. Prevención de emergencias*. México D.F.: Comisión Nacional de Agua, 2001.
- CNSM. *Salarios mínimos y zonas geográficas* [en línea]. Comisión Nacional de Salarios Mínimos, 2003 (citado el 25 de junio del 2003). Disponible para World Wide Web: <http://www.cnsm.org.mx>.
- COESPO. *Índices de marginación: regional, municipal y por localidad*. México: Gobierno del Estado de México–Consejo Estatal de Población del Estado de México, 2001.
- DÍAZ-DELGADO, C. y VEGA, G. Análisis de gran visión de las inundaciones en la Cuenca Alta del Río Lerma: caso de la Subcuenca del Río Tejalpa, Estado de México, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, núm. 1, 2001, pp. 73-86.
- DÍAZ-DELGADO, C., BÂ, K.M., ESTELLER, M.V. y GARCÍA-ARAGÓN, J.A. *Sistema de Información Geográfica para el análisis Geográfico-Hidrológico del Curso Alto del Río Lerma*, SIGCARL [en línea] 1998 (citado el 10 de febrero del 2002). Disponible para World Wide Web: <http://www.uaem.mx/ceninv/cira>.
- DÍAZ-DELGADO, C., QUENTIN, E., MAYA, R., ALBITER, R., BÂ, K., y ESTELLER, M.V. *Sistema de información para las Cuencas Hidrológicas del Estado de México* (SICHEM Versión 1.0) Laboratorio de Hidrogeomática del Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería UAEM, 2004.
- DUTTA, D., HERAT, S. y MUSIAKE, K. A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*. Vol. 277, núms. 1-2, 2003, pp. 24-49.
- ENIGH. *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares*. INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [en línea]. México, 1998 (citado el 1 de febrero del 2002). Disponible para World Wide Web: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx) Fecha de consulta: 1/febrero/2002.
- ESTRELA, T. *Inundaciones: Impactos y estrategias de respuesta*. Apuntes del Curso de Planificación Hidrológica y Medio Ambiente. Madrid: CEDEX. Ministerio de Obras Públicas y Medio Ambiente, 1996.
- HELWEG, O.J. *Recursos hidráulicos – planeación y administración*. México. D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 1992, pp. 121-174.
- INEGI. *XII Censo de Población y Vivienda*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática Gobierno de la Federación, 2000.
- INEGI. *SCINCE Sistema para la consulta de Información Censal 2000*. (CD). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002a.
- INEGI. *Anuario Estadístico del Estado de México. Edición 2002*. México: Gobierno del Estado de México–Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002b.
- INEGI. *Mapa de usos del suelo*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2003.
- JAMES, L.D. y LEE, R.R. *Economics of Water Resources Planning*. New York: McGraw-Hill, 1971.
- KATES, R.W. *Industrial Flood Losses: Damage estimation in the Lehigh Valley*. Department of Geography Research Paper No. 98. Chicago: University of Chicago. The University of Chicago Press, 1965.
- LAFITTE, H.R. Estrés abióticos que afectan al maíz. Paliwal, R.L., Granados, G., Lafitte, H.R. y Violiv, A.D. (editores). *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*. Colección FAO Producción y Protección Vegetal. Roma: FAO, 2001.
- LEKUTHAI, A. y VONGVISESSOMAJAI, S. Intangible flood damage quantification. *Water Resources Management*. Vol.15, 2001, pp. 343-362.
- LÓPEZ, S. Las crecidas torrenciales como factor de riesgo: propuesta metodológica de evaluación para la Ciudad de San Cristóbal, Venezuela. *Memorias del I Seminario Taller*

- Binacional sobre control y manejo de inundaciones*. San Cristóbal, Edo. Tachira, Venezuela, 2002.
- LOPARDO, R.A. y SEOANE, R. Algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones. *Ingeniería del Agua*. Vol. 7, núm. 1, 2000, pp. 11-21.
- MACHADO, M.L., NASCIMENTO, N., BAPTISTA, M., GONÇALVES, M., SILVA, A., COSTA DE LIMA, J., DIAS, R., SILVA, A., MACHADO, E., y FERNÁNDES, W. Curvas de danos de inundacao versus profundidades de submersao: Desenvolvimento de Metodologia. *REGA*. Vol. 2, núm. 1, 2005, pp. 35-52.
- OLSEN, J.R., BELING, P.A., LAMBERT, J.H., y HAIMES, Y.C. Input-output economic evaluation of system of levees. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 124, núm. 5, 1998, pp. 237-245.
- PAOLI, C. y CALVO, L.M. *Determinación de daños y las relaciones hidrológicas en inundaciones urbanas. Caso de la Ciudad de Buenos Aires*. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México, 1998, pp. 535-544.
- RENYI, L. y NAN, L. Flood area and damage estimation in Zhejiang, China. *Journal of Environmental Management*. Vol. 66, 2002, pp. 1-8.
- SANTILLÁN, O.D., TORREGROSA, M.L., RAMÍREZ, A.I., DEHAYS, J. y APARICIO, J. Determinación de zonas de riesgo hidrológico, de acuerdo con el impacto social y la severidad de las inundaciones. *Memorias del XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca, México, 1998, pp. 425-433.

### Abstract

BARÓ-SUÁREZ, J.E., DÍAZ-DELGADO, C., ESTELLER-ALBERICH, M.V. & CALDERÓN, G. Economic flood loss estimation curves for Mexican rural and residential areas. Part I: methodology proposal. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish), vo. XXII, no. 1, January-March, 2007, pp. 91-102.

The estimation of economic loss caused by floods in a catchment is very important in order to develop flood disaster mitigation measures. In fact, a quick and realistic estimate of economic loss before, during and after a flood event can be very useful in allocating resources to prevent, mitigate, recover and reconstruct affected areas. Moreover, the estimation of potential flood damage is needed in long-term flood control planning, emergency management and useful for land use planning and management. In this work, a standard methodology to quantify the direct and indirect tangibles flood damages for rural and residential areas in Mexico is proposed. Stage - damages curves were built to obtain the flood loss estimation over residential areas. These curves were determined for each one of the five residential categories identified. In the case of rural areas, the damage curves were built taking into account the flood duration because the time is the most important factor to evaluate the agriculture flood losses. With the information obtained, it was possible to define regression mathematical models in order to represent the damage as function of the highest water lever reached.

**Keywords:** floods, stage-damages curves, flood loss estimation, urban area, rural area, Mexico.

#### Dirección institucional de los autores:

M.G. José Emilio Baró-Suárez

Profesor-investigador.  
Facultad de Planeación Urbana y Regional,  
Universidad Autónoma del Estado de México,  
Mariano Matamoros s/n,  
teléfono: + (52) (722) 2129 246,  
fax: + (52) (722) 2121 938,  
barosuarez@hotmail.com

Dr. Carlos Díaz-Delgado

Profesor-investigador.  
Centro Interamericano de Recursos del Agua,  
Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma del Estado de México  
Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n,  
50130 Toluca, Estado de México, México,  
teléfono: + (52) (722) 2965 550,  
fax: + (52) (722) 2965 551,  
cdiaz@uaemex.mx

Dra. María Vicenta Esteller-Alberich

Profesora-investigadora.  
Centro Interamericano de Recursos del Agua,  
Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma del Estado de México,  
Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n,  
50130 Toluca, Estado de México, México,  
teléfono: + (52) (722) 2965550,  
fax: + (52) (722) 2965551,  
esteller@uaemex.mx

Dra. Georgina Calderón

Profesora.  
Facultad de Filosofía y Letras,  
Posgrado en Geografía,  
Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, México,  
Teléfono: + (52) (55) 5606 4378

**OJO AUTORA, ¿DESDE AGREGAR CORREO ELECTRÓNICO?**