

## MAPAS DE PÉRDIDAS EN LA INFRAESTRUCTURA EN MÉXICO ANTE SISMOS Y HURACANES

Miguel A. Jaimes Téllez<sup>1</sup>, Eduardo Reinoso Angulo<sup>1</sup>, Mario Ordaz Schroeder<sup>1</sup>, Benjamín Huerta Garnica<sup>2</sup>, Carlos Avelar Frausto<sup>2</sup> y Mauro Niño Lázaro<sup>1</sup>

### RESUMEN

Se presentan mapas de pérdidas estimadas para la infraestructura de salud, de educación, de comunicaciones y transportes y de vivienda en pobreza patrimonial en México ante sismos y huracanes. Para estimar el riesgo por sismo o huracán se cuenta con un sistema de cómputo que toma en cuenta por un lado la ocurrencia de todos los eventos posibles y sus diferentes variantes, y por otro, las características de las construcciones. Los resultados de este sistema son estimaciones probabilísticas del daño en las estructuras (escuelas, hospitales, viviendas) e infraestructura (carreteras, puentes). Estos mapas permiten conocer las zonas de mayor riesgo para la infraestructura antes mencionada por sismo y huracán en el país.

### ABSTRACT

We present losses maps for the infrastructure of health, education, communications and transports and housing in patrimonial poverty in Mexico subjected to earthquakes and hurricanes. To estimate the risk due to such hazard scenarios, a computation system that takes into account, in one side, the occurrence of all possible events and its different variants, and in other, the characteristics of the constructions is employed. The results are probabilistic estimations of damage in structures (schools, hospitals, housings) and infrastructure (highways, bridges). The obtained maps allow us to know the riskiest areas for the above infrastructure by earthquakes and hurricanes in the country.

### INTRODUCCIÓN

México, debido a su ubicación geográfica, condiciones climáticas y geológicas, así como a problemas de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, es vulnerable a la presencia de fenómenos naturales, en particular los sismos y huracanes. Algunos de estos fenómenos, por la magnitud y alcance de la región han provocado severos daños que requieren de una respuesta institucional, en la cual se deben canalizar importantes recursos económicos, en un primer momento, para la situación de emergencia y, posteriormente, para resarcir los daños y restablecer las condiciones de normalidad social y económica en la región afectada. Es indispensable fortalecer las acciones de la atención de los daños ocasionados cuando éstos ocurren. Para ello, es necesario integrar, analizar y medir el riesgo por sismo y huracán en México para establecer mecanismos que coadyuven en medidas de mitigación del riesgo. Para ello es preciso conocer las pérdidas en la infraestructura pública que requiere atención inmediata ante un evento natural en caso de sufrir daños. Esto permite también plantear mecanismos para el aseguramiento de la infraestructura pública y la orientación hacia la atención de los daños ante fenómenos naturales.

---

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, mjaimest@iingen.unam.mx; ere@pumas.ii.unam.mx; mors@pumas.ii.unam.mx; mminol@iingen.unam.mx

<sup>2</sup> Evaluación de Riesgos Naturales, Vito Alessio Robles No. 179, Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac 01050, Álvaro Obregón; bhg@ern.com.mx; ceaf@ern.com.mx

A continuación, se presentan mapas de pérdidas estimadas para la infraestructura de salud, de educación, de comunicaciones y transportes y de vivienda en pobreza patrimonial en México ante sismos y huracanes. Para estimar el riesgo por sismo o huracán se cuenta con un sistema de cómputo que toma en cuenta por un lado la ocurrencia de todos los eventos posibles y sus diferentes variantes como es en el caso de sismo de la atenuación y efectos de sitio; en el caso de huracán de trayectoria e intensidad, y por otro, las características de las construcciones como puede ser el sistema estructural, año de construcción, número de pisos, uso entre otros. Los resultados de este sistema son estimaciones probabilísticas del daño en las estructuras (escuelas, hospitales, viviendas) e infraestructura (carreteras, puentes). Estos mapas como veremos permiten conocer las zonas de mayor riesgo para la infraestructura antes mencionada por sismo y huracán en el país.

## METODOLOGÍA

Los valores de riesgo sísmico y huracán se calcularon usando modelos probabilistas que pueden utilizar la información disponible para predecir, de la mejor manera, futuros escenarios y para considerar la incertidumbre que se involucra en el análisis. Por lo tanto, la estimación del riesgo que se presenta en el presente estudio, es prospectiva, anticipando eventos científicamente creíbles que podrían ocurrir en el futuro.

En el caso de sismo, fundamentos sismológicos y de ingeniería son considerados para desarrollar el modelo de predicción sísmica que permite evaluar el riesgo de que se presenten pérdidas como resultado de un evento catastrófico. Dado que existen grandes incertidumbres inherentes en los modelos relacionados con las causadas como consecuencia de estos eventos, el modelo de riesgo sísmico debe estar basado en formulaciones probabilistas que incorporen estas incertidumbres en la evaluación del riesgo. Para el caso de huracán, también existen fundamentos físicos que sustentan el modelo de estimación de pérdidas.

### Modelación del peligro

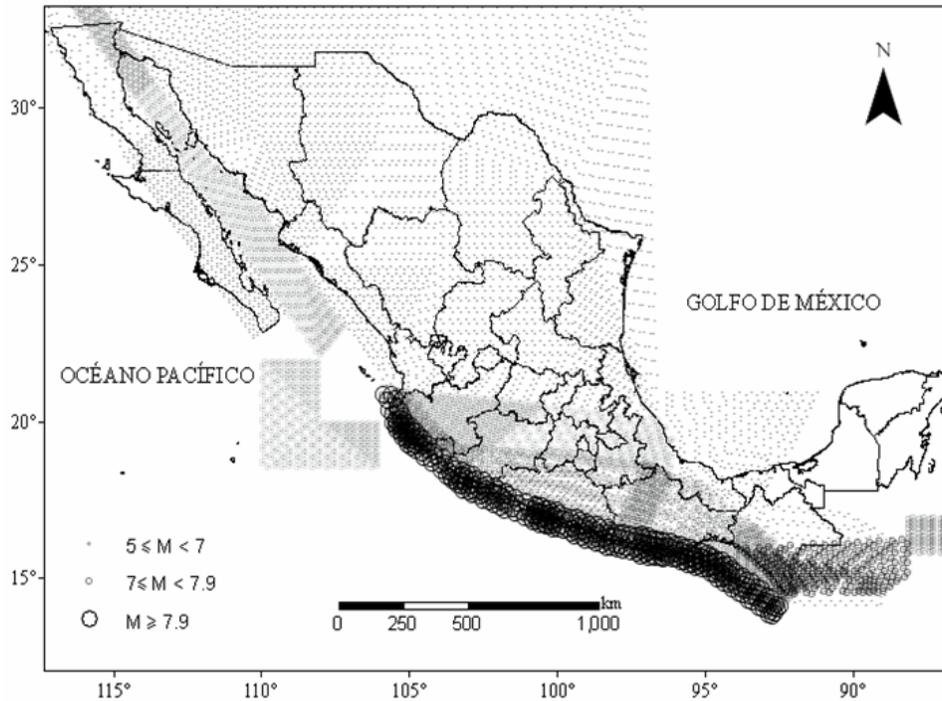
#### *Caso Sismo*

La modelación del peligro consiste en definir la frecuencia y severidad del peligro en un lugar específico. El estudio se complementa analizando las frecuencias históricas de los eventos y revisando los estudios científicos sobre severidad y frecuencias realizados en la zona de interés. Una vez que se han establecido los parámetros de la amenaza, se generan conjuntos de eventos estocásticos. Este módulo analiza la intensidad en un lugar una vez que ocurre un evento del conjunto estocástico, mediante la modelación de la atenuación del evento desde donde se produce hasta el sitio de consideración; y evalúa que tan propensas son las condiciones de sitio locales para la amplificación o la reducción del impacto.

La amenaza sísmica se expresa en términos de tasas de excedencia de valores dadas de intensidad sísmica ( $a$ ). El cálculo considera la contribución de los efectos de todas las fuentes sísmicas localizadas en una cierta área de influencia. Una vez identificadas estas fuentes sísmicas, se asigna un modelo de ocurrencia de los sismos que se presentan en dicha zona. En el caso de México las fuentes sísmicas son modeladas siguiendo tanto un proceso de Poisson como característico en donde  $\lambda(M)$  representa las tasas de actividad para cada sistema de fallas. Dado que las fuentes sísmicas son volúmenes, el epicentro no sólo puede ocurrir en el centro de las fuentes, sino que también puede ocurrir, con igual probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Por lo tanto, para la simulación de los conjuntos de eventos que define subfuentes mediante la subdivisión de las fuentes sísmicas, dependiendo de la distancia hipocentral ( $R_0$ ), en diversas formas geométricas. Para cada subdivisión se considera que la sismicidad de la fuente se encuentra concentrada en su centro de gravedad. En la figura 1 se presentan los epicentros de eventos sísmicos estocásticos dentro de las fuentes sísmicas modeladas.

Adicionalmente, la modelación considera los efectos de atenuación de las ondas sísmicas mediante las leyes de atenuación probabilistas y espectrales, que incluyen diferentes tipos de fuente y los efectos locales de amplificación basados en los estudios de microzonificación e información complementaria disponible. Dado que la intensidad calculada se asume como una variable aleatoria con distribución lognormal, el valor de la incertidumbre correspondiente ( $\sigma_{lna}$ ) es tenido en cuenta para incluir la variabilidad asociada.

Esta metodología basada en Esteva (1970) y Ordaz (2000), genera eventos sísmicos estocásticos como ubicaciones aleatorias dentro de las fuentes sísmicas modeladas, calcula la función de densidad de probabilidad de la intensidad sísmica ( $a$ ) para un lugar específico, y, si se requiere, agrega las contribuciones de todas las fuentes y magnitudes para calcular las tasas de excedencia de intensidad. En la Figura 2 se presenta un evento sísmico estocástico de magnitud  $M=8$  y la distribución de su intensidad sísmica considerando la atenuación del evento.



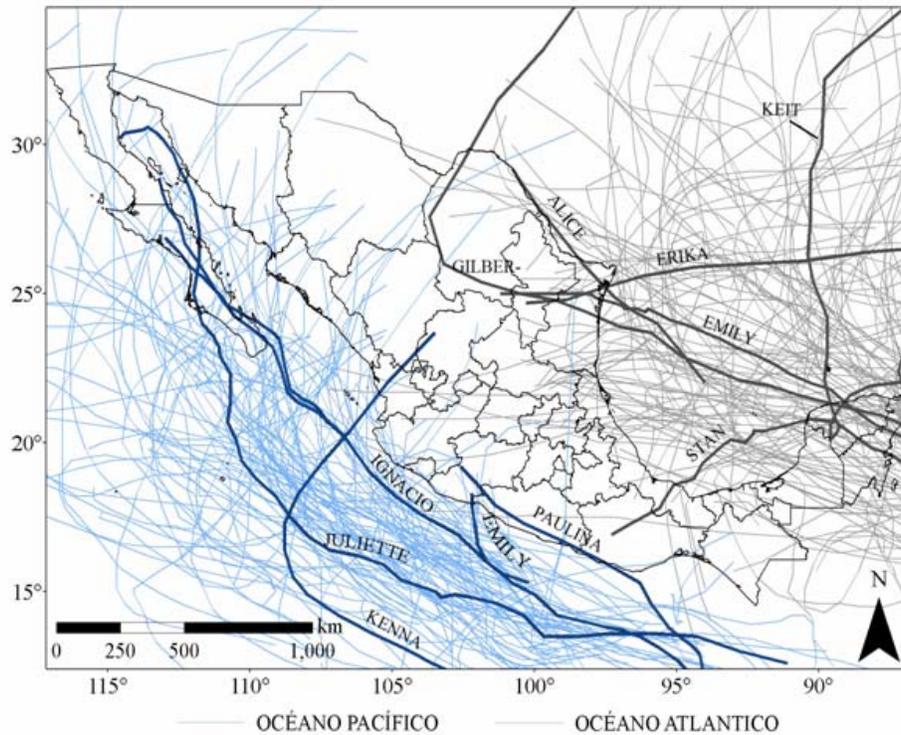
**Figura 1** Epicentros de eventos sísmicos estocásticos dentro de las fuentes sísmicas modeladas



**Figura 2** Evento sísmico estocástico de magnitud  $M=8$  considerando la atenuación de la intensidad del evento

### Caso Huracán

En el caso de huracán, la manera de obtener pérdidas es a través de perturbaciones de las trayectorias de los huracanes históricos, o de la simulación de eventos para el caso de inundación. Estos huracanes perturbados o eventos simulados generan mapas de amenaza que junto con la evaluación de la vulnerabilidad de cada una de las construcciones de la cartera permite obtener el valor de las pérdidas (Avelar, 2007). En las Figura 2 se presenta una imagen con la ruta de los ciclones tropicales que han afectado a México en su vertiente atlántica y pacífica, respectivamente.



**Figura 3 Ruta de huracanes que han afectado al país provenientes del Pacífico y Atlántico**

Se considera que durante el paso de un huracán se producen dos tipos de pérdidas: las debidas al efecto del viento y las debidas a la marea de tormenta y la de inundación. Para poder realizar correctamente los cálculos de las distribuciones de probabilidad de estas pérdidas por huracán se recurre, como en el caso de otras amenazas al concepto de “evento”. En este caso, los eventos están constituidos por el paso de huracanes. El registro de huracanes que han afectado nuestro país data de finales del siglo XIX. Sin embargo, no es sino hasta mediados del siglo XX que se dispone de registros de sus trayectorias completas y de parámetros indicativos de su severidad, tales como la presión barométrica en el ojo o la velocidad ciclostrofica. En estas condiciones, la base de datos útiles de huracanes es limitada. Por tal razón, es necesario extenderla, por la vía de la generación de huracanes artificiales.

Para generar huracanes artificiales, se utiliza la estrategia de perturbar las trayectorias y los valores de presión barométrica en el ojo de huracanes reales que hayan sido correctamente registrados. A continuación se describen estos procesos.

### Viento

Para la República Mexicana las máximas velocidades de viento ocurren cuando se presenta un ciclón tropical, es por ello que se emplean modelos de huracán para el cálculo de este peligro. Existen pocos estudios que se han orientado a la caracterización de este tipo de fenómenos en las costas mexicanas, en

buena medida a causa de la alarmante falta de información y datos medidos en campo. En las últimas décadas, en las regiones que se ven afectadas por la influencia de ciclones tropicales, se han invertido muchos esfuerzos por encontrar algún modelo numérico que permita determinar las condiciones costeras debidas a la presencia de huracanes, siendo los del tipo paramétrico los que más éxito han tenido.

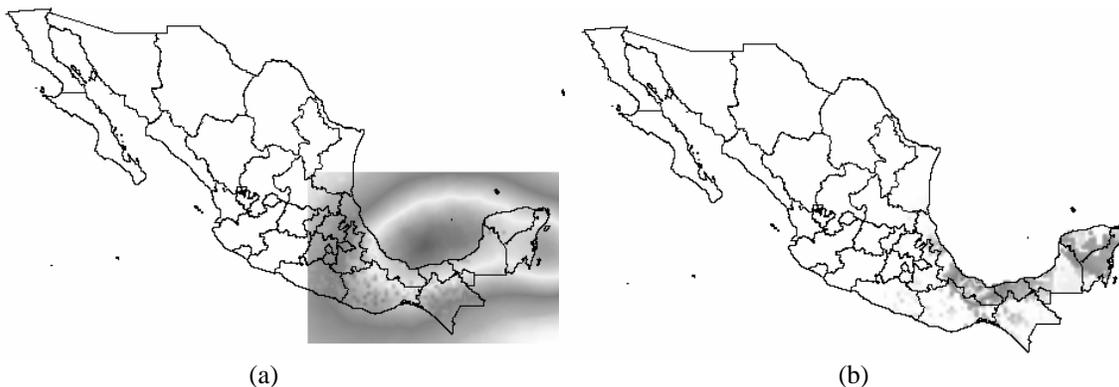
Los modelos paramétricos de presión y viento dependen de la información siguiente: posición del ojo del huracán, presión central, velocidad máxima de viento sostenida en el ojo del huracán y radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente (Avelar *et al.* 2007).

### ***Marea de tormenta***

La marea de tormenta es uno de los peligros asociados a la ocurrencia de huracanes que más daño causa a inmuebles en la primera línea de costa. Se usa un modelo simplificado cuya descripción se indica en Huerta *et al.* (2007). Los autores suponen que la marea de tormenta depende del gradiente de presiones y de los esfuerzos tangenciales ejercidos por el viento y la fricción de fondo. Mayores detalles se presentan en Huerta *et al.* (2007).

### ***Inundación***

Por su situación geográfica el país se ve afectada por lluvias derivadas de diversos fenómenos hidrometeorológicos. En verano, el país está sujeto a la acción de ciclones tropicales. Durante el invierno, es afectado por frentes polares originados en latitudes altas que viajan hacia el sur y causan fuertes precipitaciones en todo el país, sobre todo en el norte. A estos fenómenos se suman los efectos orográficos y las precipitaciones originadas por fenómenos convectivos, los cuales producen tormentas muy intensas aunque de poca duración y extensión. Debido a la información con que se cuenta, a la disponibilidad de datos aproximados y el nivel de resolución requerida (nivel país) se aplico una metodología que consiste en determinar la distribución de la precipitación máxima en 24 horas en todo el país afectándola por coeficientes que involucran la topografía y la hidrografía. Esta metodología se calibra con los datos obtenidos con el modelo matemático y los leídos en campo (Huerta *et al.*, 2006; Torres *et al.*, 2007).



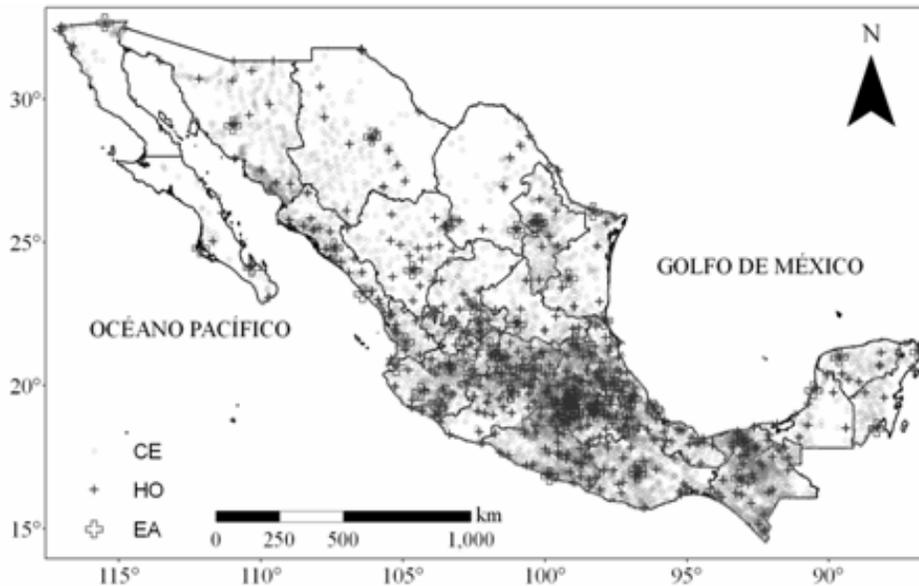
**Figura 4 Escenario de Stan. a) viento y b) inundación**

### **Características de exposición de la infraestructura**

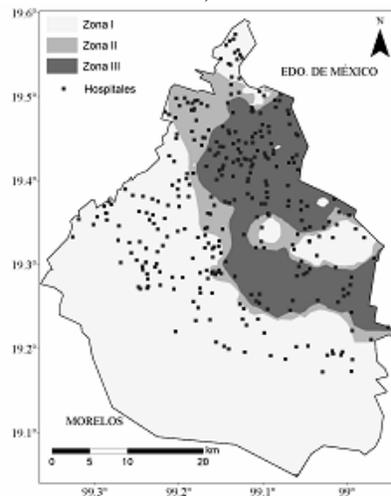
Esfuerzos enfocados en la modelación del peligro han crecido; sin embargo, aún es necesario contar con información precisa para evaluar las pérdidas por sismo y huracán y conocer el riesgo de la infraestructura y tomar medidas que coadyuven en la protección de la misma. Si es posible evaluar la pérdida probable con alguna precisión, entonces se podrá realizar una evaluación de los costos y beneficios de las medidas de mitigación. Los valores de exposición de los “activos en riesgo” se obtuvieron de distintas dependencias del gobierno disponibles como bases de datos existentes. Estas bases de datos deben ser actualizadas y mejoradas

para incrementar la precisión de la información; y por lo tanto, de la estimación de pérdidas. A continuación se presenta una breve descripción de las bases de datos de las dependencias en estudio.

La Secretaría de Salud (SSA) cuenta con información de más de 13,500 unidades médicas georeferenciadas que permiten características de las construcciones como el sistema estructural, año de construcción, número de pisos entre otros. En la figura 4, como un ejemplo de las bases de datos, se presentan en un mapa de la República Mexicana de la ubicación geográfica de las unidades médicas en el país. Con símbolos como “o”, “+” y “⊕” se denotan los centros de salud urbanos y rurales (CE), los hospitales e institutos (HO) y centros de transfusión y laboratorios (EA), respectivamente, que conforman las unidades médicas del país. Se puede observar que las unidades médicas se concentran al centro del país y en la zona sureste donde las instalaciones prestan atención a la población en caso de emergencia ante un fenómeno natural como sismo o ciclón tropical.



a)



b)

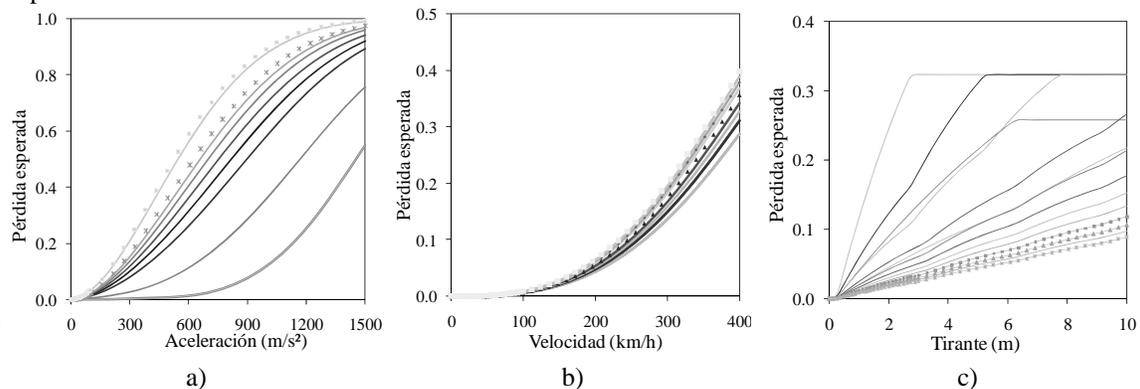
**Figura 5 Mapas de distribución de la infraestructura de Salud. a) país y b) Distrito Federal**

De igual manera para otras dependencias se obtuvo información similar, pero con fines de espacio del trabajo se limita a enunciar brevemente el contenido de las mismas. De la Secretaría de Educación Pública (SEP) se cuenta con la ubicación geográfica de más de 190,000 y 8,500 escuelas de nivel básico y nivel medio y superior, respectivamente. De la Secretaría de Desarrollo Social se tiene información de más de 17,000 y 40,000 AGEB georreferenciados, rurales y urbanos, respectivamente. INEGI distingue estos dos tipos de AGEB por las diferencias de densidad de población y uso del suelo. Las AGEB urbanas delimitan una parte o el total de una localidad de 2,500 habitantes o más, o bien, una cabecera municipal, independientemente de su número de pobladores, en conjuntos que generalmente van de 25 a 50 manzanas; y las AGEB rurales enmarcan una superficie cuyo uso del suelo es predominantemente agropecuario y en ellas se encuentran distribuidas las localidades menores a 2 500 habitantes, que para fines operativos, se han denominado como localidades rurales. Esto permite contar con información adecuada para caracterizar las viviendas en pobreza patrimonial del país a nivel AGEB (p.e. los tipos de viviendas, el número de viviendas y materiales que están compuestos los muros y techos de las viviendas) lo que resulta en una adecuada opción ante la carencia de información; con ello se obtuvo la caracterización estructural de más de 10 millones de viviendas en pobreza patrimonial (Jaimes *et al.* 2008). En el caso de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se evaluaron más de 135,000 km de carreteras considerando el material que están construidas, por ejemplo, asfalto, concreto hidráulico o revestidas. Así como más de 7200 puentes existentes en el país, donde se indican características geométricas y estructurales básicas, ubicación, estado físico y tráfico que soportan.

### Modelación de la vulnerabilidad

En la vulnerabilidad se cuantifica el daño causado en cada tipo de activo por la ocurrencia de un evento de cierta intensidad (Miranda, 1999). En el caso de edificaciones, la clasificación de los activos se basa en la combinación de los materiales de los materiales de construcción, el tipo de edificio (es decir la combinación de muros y cubiertas), el uso del edificio, el número de pisos y la edad. En el caso de carreteras se elaboraron funciones de vulnerabilidad en función del tipo de material construido.

La estimación del daño se mide en términos del nivel de daño medio, que es la relación entre el costo de reparación esperado y el costo de reemplazo de la estructura. Una curva de vulnerabilidad se puede obtener de relacionar el nivel de daño medio y la intensidad sísmica, que puede ser expresada en términos, en el caso de sismo de la aceleración máxima y aceleración espectral, en el caso de viento de la velocidad máxima del viento, en el caso de inundación esta en función del tirante que se presente en cada sitio. Dado un valor de intensidad sísmica, el valor esperado de daño de la estructura se calcula de acuerdo a Miranda (1999). Se pueden definir curvas de vulnerabilidad específicas para el costo de los contenidos del edificio y para la interrupción de la producción. En la figura 6 se presenta, por fines de espacio, un ejemplo de las funciones de vulnerabilidad para el sector salud por sismo (figura 6a), viento (figura 6b) e inundación (figura 6c). En el caso de las funciones de vulnerabilidad de inundación no se consideran los daños provocados por socavación, falta de resistencia por reblandecimiento del suelo o deficiencia de la cimentación que pueden producir el colapso de las estructuras.

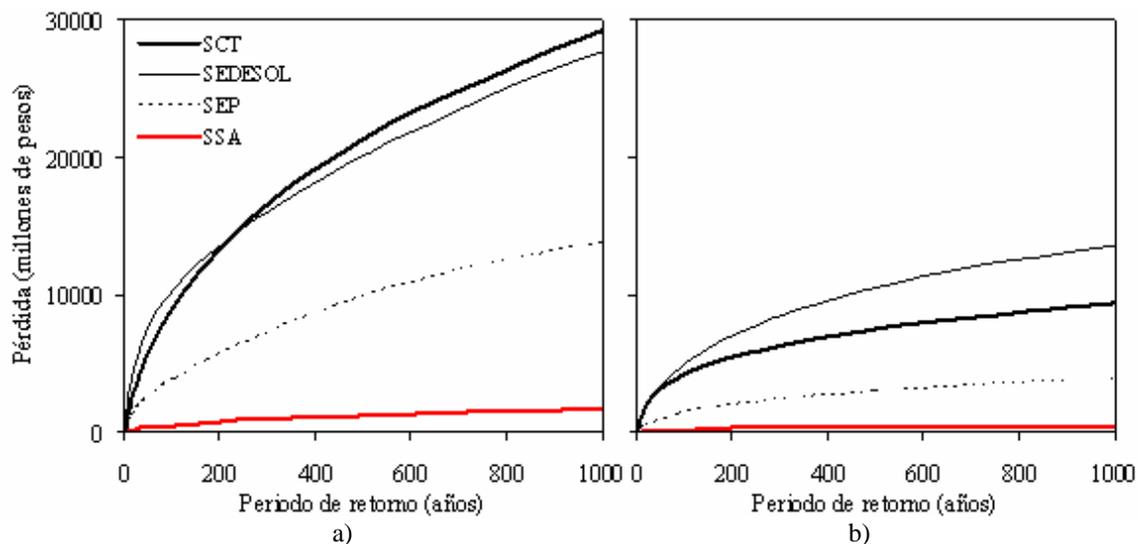


**Figura 6 Función de vulnerabilidad para el sector salud. a) sismo, b) viento e c) inundación**

### Modelación de evaluación de pérdidas

Para calcular las pérdidas, la tasa de daño obtenida en la modelación de la vulnerabilidad se transforma en pérdidas económicas multiplicando dicha tasa por el valor en riesgo. Este cálculo se realiza para cada tipo de activo en cada sitio. Las pérdidas pueden ser agregadas como se requiera (Ordaz *et al.* 1999; Ordaz, 2000). Las medidas de riesgo obtenidas por el modelo, es la pérdida anual promedio y otra es la curva de excedencia de pérdidas. La pérdida anual promedio (PAP) es la pérdida anual esperada. Matemáticamente, la PAP es la suma de los productos de las pérdidas esperadas para todos los eventos estocásticos considerados en los modelos de pérdida. En términos probabilistas el PAP es la esperanza matemática de la pérdida anual.

La curva de excedencia de pérdida (CEP) representa la frecuencia anual con el cual una pérdida de una cantidad monetaria específica puede ser excedida. Esta es la medida de riesgo catastrófico más importante para los encargados del riesgo, dado que estima la cantidad de fondos requeridos para alcanzar los objetivos de la gestión del riesgo. La CEP se puede calcular para el mayor evento en un año o para todos los eventos (en forma acumulativa) en un año. En la figura 7 se presenta resultados de CEP para la infraestructura del país para sismo (figura 7a) e inundación (figura 7b). Se puede observar que las CEP para sismo son mayores que la CEP para huracán en la infraestructura del país.

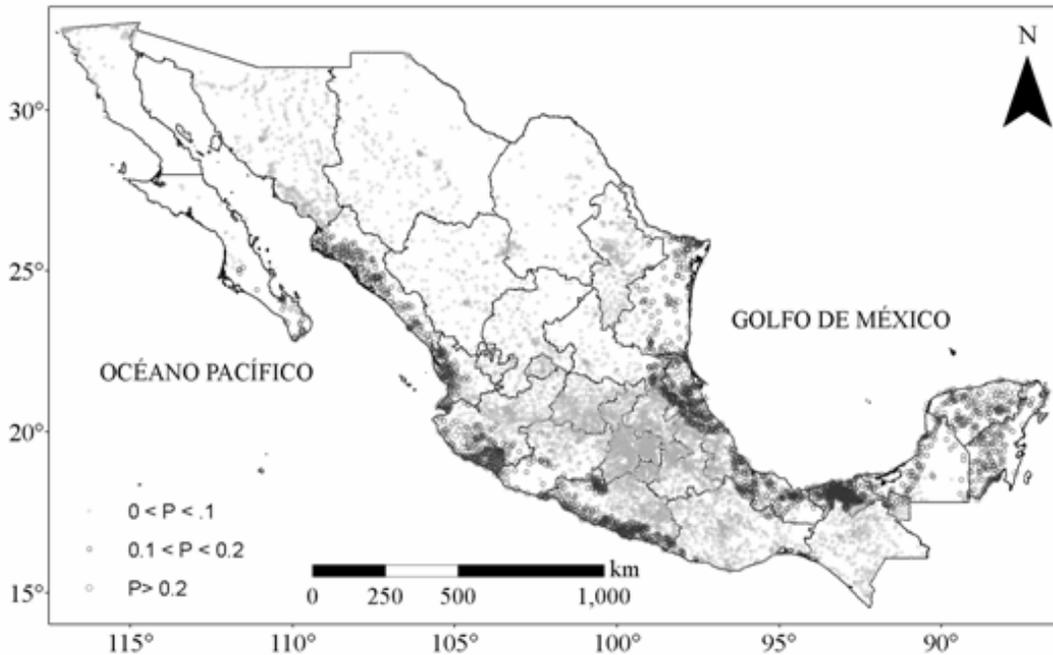


**Figura 7 Curva de excedencia de pérdida para la infraestructura en México. a) sismo y b) huracán**

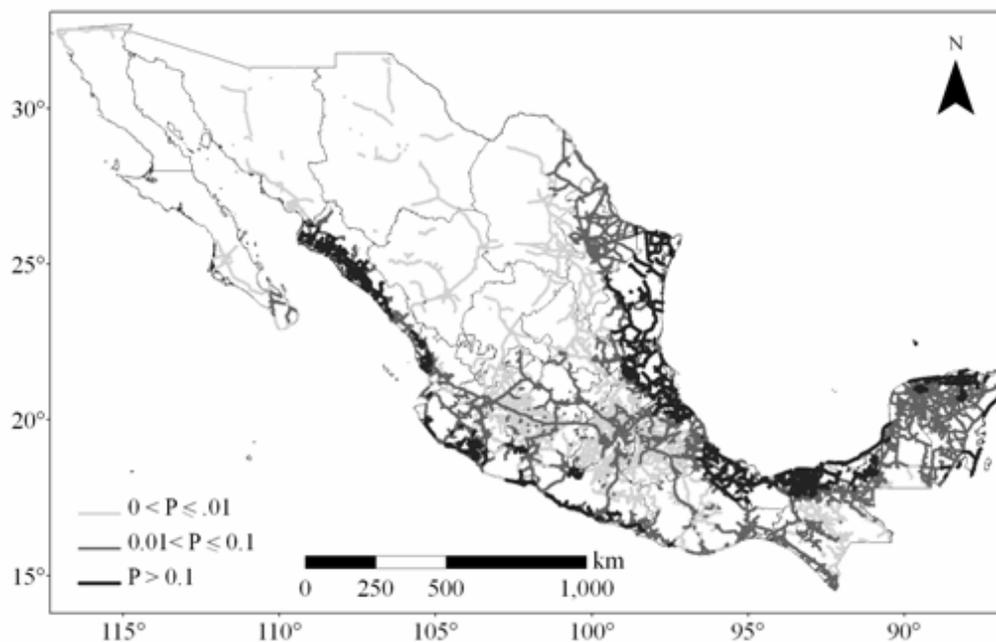
### RESULTADOS

En la figura 8 se presenta los mapas con las pérdidas anuales esperadas por peligros de viento, marea de tormenta e inundación (estos tres peligros son los que incluye un huracán, pero en distinta intensidad se presentan en todo el país) solamente para dos infraestructuras, SSA y SCT-carreteras consideradas en el estudio, esto con fines de espacio en el documento. Los valores indican el porcentaje de daños que anualmente, en promedio, tendrá cada infraestructura en su vida útil. Nótese que los valores máximos corresponden a Cozumel y Cancún; sin embargo, existen también valores de daños similares en el norte de Tamaulipas y en el sur de Jalisco y de Baja California, de sitios todos estos donde han impactado los huracanes más intensos. Por otro lado, existen estados cuya costa no está en gran riesgo, como Veracruz, Oaxaca y algunos en el noroeste. El caso de Tijuana es interesante, ya que presenta valores de pérdida relativamente altos y no es por los huracanes, sino por los frentes fríos húmedos de invierno, que también están incluidos e el sistema de cálculo de pérdidas.

En la figura 9 se muestra los daños estimados, ahora por sismos, para la misma infraestructura referida en la figura 8. Nótese que las curvas de pérdida siguen valores conocidos de intensidad como los incluidos en el manual de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

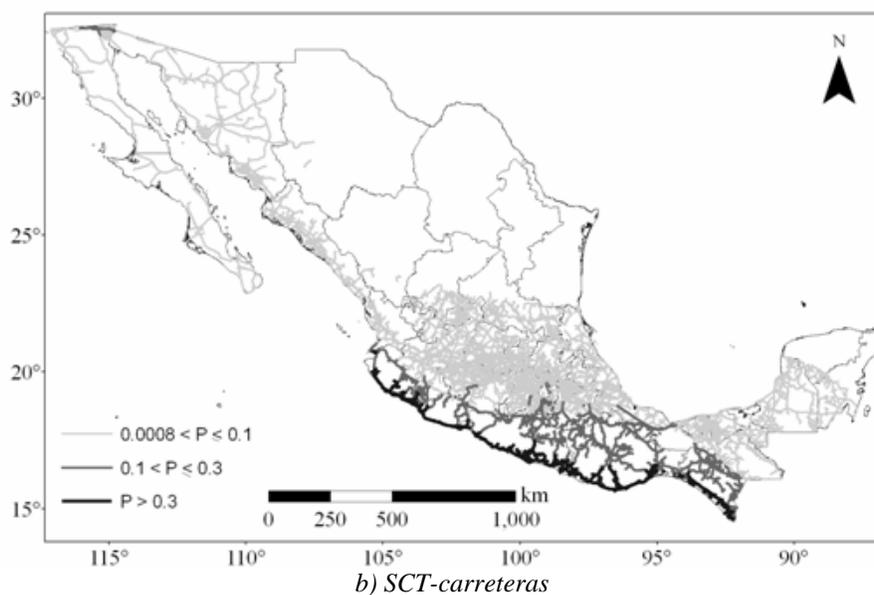
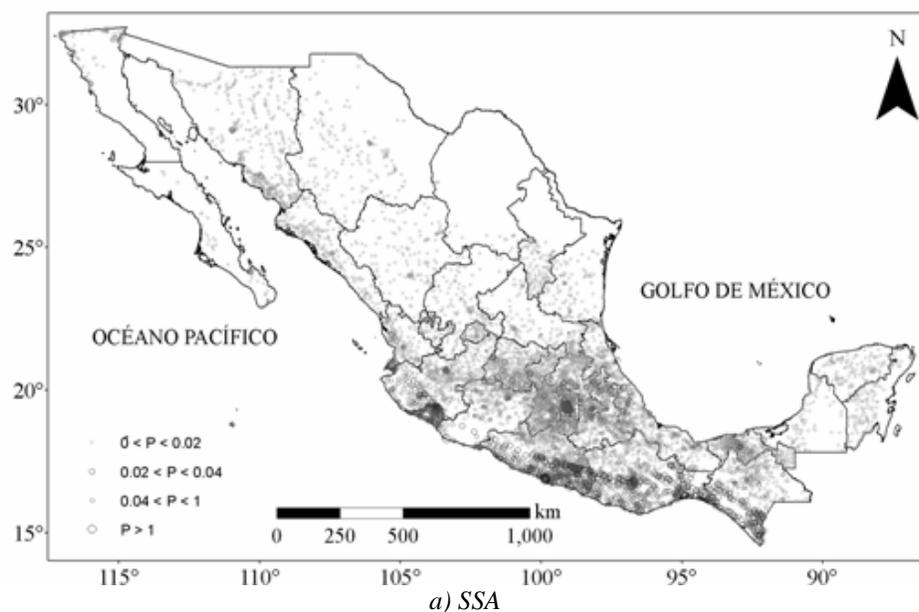


a) SSA



b) SCT-carreteras

**Figura 8 Pérdida anual esperada por huracán dividida por el valor de reemplazo en porcentaje a) SSA y b) SCT-carreteras**



**Figura 9 Pérdida anual esperada por sismo dividida por el valor de reemplazo en porcentaje a) SSA y b) SCT-carreteras**

## CONCLUSIONES

En este artículo se presentan mapas de la relación entre la pérdida anual esperada y el valor de reemplazo en porcentaje, que se refiere a la suma de los productos de las pérdidas esperadas para todos los eventos estocásticos considerados para la infraestructura de salud, de educación, de comunicaciones y transportes y de vivienda en pobreza patrimonial en México ante sismos y huracanes. Para estimar el riesgo se hace uso de un sistema que emplea para el cálculo, eventos sísmicos y de huracanes (con sus distintos nombres e intensidades) y funciones de vulnerabilidad específicas para los distintos sistemas estructurales. Esto permite visualizar el riesgo de manera clara observando por un lado las amenazas y por otro lado los inventarios

expuestos de las instituciones y la relación entre ambas. Además, el sistema permite calcular pérdidas en función de un periodo de retorno o tasa de excedencia, lo que es fundamental para administrar el riesgo de carteras y negociar con el sector financiero. Esto permitirá mejorar la estrategia federal de administración de riesgos y optimizar los recursos asignados para hacer frente a los daños derivados de eventos naturales de gran impacto.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo de la Secretaría de Hacienda y Agroasemex S.A. en el proyecto “Integración, análisis y medición de riesgo de sismo, inundación y ciclón tropical en México para establecer los mecanismos financieros eficientes de protección al patrimonio del fideicomiso FONDEN del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS)”.

## REFERENCIAS

Avelar, C.E. (2007), “Validación de un modelo para estimar pérdidas esperadas por escenarios de huracán en México”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.

Esteva, L. (1967). “Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico”, 3er Simposio Panamericano de Estructuras, Caracas, Venezuela.

Huerta, B., Vega E. y Avelar C., (2006), “Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras”. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Huerta, B., Ordaz, M., Reinoso, E., Avelar F., Torres, M., Zeballos, A., Osuna, E., Martínez, I. y Hernández, G. (2007), “Sistema experto para la evaluación de pérdidas por riesgos hidrometeorológicos en México”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.

Jaimes, M.A., Reinoso, E., Huerta, G. y Zeballos, A. (2008). “Estimación de pérdidas en viviendas en pobreza patrimonial por sismo, inundación y ciclón tropical en la República Mexicana”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, Veracruz.

Miranda, E. (1999), “Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings”, Journal of Structural Engineering, 125(4), 417-425.

Ordaz, M. (2000), “Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros para terremoto”, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.

Ordaz, M., Miranda E., Reinoso E. y Mendoza C. (1999), “Sistema experto para la evaluación de pérdidas por sismo en México”, XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia-México, 13(5), pp 982-991.

Torres, M.A., Avelar, C.E. y Huerta, B. (2007), “Evaluación del riesgo por inundaciones debidas a tormentas”, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero



