

Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en zonas urbanas

Horacio Ramírez de Alba¹, Brenda Pichardo Lewenstein² y Sandra Paola Arzate Cruz³

Recibido: 9 de febrero de 2007- Aceptado: 16 de abril de 2007

RESUMEN

Se propone un índice de susceptibilidad de daños por sismo que permite estimar el número probable de viviendas afectadas y se establece una metodología para calcularlo. Se comparan los resultados de daños estimados en viviendas mediante el procedimiento propuesto con datos de dos sismos recientes: Tehuacan 1999 y Colima 2003, se encontró relativamente buena correlación. Se propone un procedimiento para estimar los costos para disminuir la vulnerabilidad sísmica mediante técnicas de reforzamiento y los resultados se comparan con los costos de las pérdidas materiales en el supuesto de ocurrir un sismo de la mayor intensidad esperada en la zona de estudio. Se reporta la aplicación de los procedimientos propuestos para el caso del Municipio de Sultepec, México.

Palabras Clave: Vulnerabilidad sísmica, vivienda, técnicas de reforzamiento, daños estructurales.

Seismic vulnerability assessment of housing in urban zones

ABSTRACT

A method to estimate the probable number of houses affected during earthquakes is proposed. The results obtained with this method are compared with data of damaged housing from recent earthquakes: Tehuacan 1999 and Colima 2003, relatively good correlation was found. Costs to reduce seismic vulnerability by means of strengthening techniques are estimated and compared with the cost of material losses assuming the occurrence of the most intense earthquake in the zone. The application of the proposed procedures in the Municipality of Sultepec is reported.

Key words: Seismic vulnerability assessment, housing, strengthening methods, structural damage

¹ Doctor en Ingeniería, profesor e investigador en Ingeniería Civil, Centro de Investigación en Ingeniería Estructural, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México. hra@uaemex.mx.

² Ingeniera Civil, Profesora de Ingeniería Civil, estudiante de posgrado, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México. bpl@uaemex.mx

³ Estudiante de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UAEM, Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México paoac838@yahoo.com.

INTRODUCCIÓN

Al ocurrir sismos intensos se afectan las viviendas pues es frecuente que sus estructuras sean vulnerables. Por ejemplo en México, en el sismo de 1985 se dañaron aproximadamente 90,000 viviendas en varias zonas, en el sismo de Tehuacan de 1999 de dañaron 30 676 viviendas y en el de Colima de 2003, se dañaron 25,353 viviendas. Se espera que sigan ocurriendo movimientos sísmicos intensos por lo que resulta importante contar con métodos que permitan estimar la vulnerabilidad de las viviendas en diferentes zonas. Este problema ha sido abordado desde diferentes perspectivas por varios investigadores. Arellano *et al.* (2002) utilizaron relaciones entre la aceleración máxima del terreno y las intensidades para estimar, mediante encuestas de campo, el número probable de viviendas dañadas en Chilpancingo, Gro. Considerando tres escenarios de sismos posibles, encontraron que 73% de las viviendas existentes pueden sufrir daños de diferente cuantía.

Alarcón y Zavala (2005) estudiaron la vulnerabilidad sísmica en el Distrito de la Molina en Lima, Perú. Evaluaron una muestra representativa y mediante simulación obtuvieron respuestas sísmicas para diferentes tipologías estructurales, como resultado proponen curvas de vulnerabilidad a manera de mapas de riesgo. Vega y Lermo (2005) llevaron a cabo un estudio para estimar el efecto de sitio y la vulnerabilidad sísmica en Acatlán, Puebla. Estudiaron 438 edificaciones y definieron tres tipologías, utilizando un programa de análisis estructural explicaron los daños ocurridos en la zona debido al sismo de 1999 llamado de Tehuacan, así como su posible extrapolación. Salgado (2005) desarrolló una metodología para estimar curvas de vulnerabilidad estructural de viviendas construidas con adobe en tres zonas de la República Mexicana, reconoció que se requieren más datos para probar la confiabilidad del método. Mendoza *et al.* (2005) evaluaron la vulnerabilidad de la vivienda en el sismo de Colima de 2003 tomando como base los reportes de daños de un estudio que comprendió 625 manzanas y 10,829 viviendas, encontraron que las tipologías estructurales a base de adobe y mampostería no reforzada son entre 10 y 14 veces más vulnerables que las de mampostería reforzada.

Tejeda *et al.* (2004) evaluaron el comportamiento estructural de diferentes tipos de vivienda en Colima durante el sismo de enero de 2003, encontraron relación directa de los daños con la calidad de los materiales, las prácticas de diseño y construcción y la aplicación de la normativa. Sánchez (2005) determinó el índice de susceptibilidad de daños por sismo como

una función del peligro sísmico y obtiene mapas cualitativos de riesgo. Guillén *et al.* (2005) desarrollaron una metodología basada en la inferencia estadística para evaluar la vulnerabilidad en una zona determinada que permite identificar casos que requieren evaluación detallada.

Tomando en cuenta estos antecedentes, en primer lugar se detectó que se recurre a diversos enfoques que implican alguna o algunas de las desventajas siguientes: requieren de costosos trabajos de campo, la utilización de herramientas de cálculo sofisticadas y presentan dificultades para su aplicación práctica. Pero se tiene como factor común que las bases son la cuantificación del peligro sísmico, la posible amplificación de las ondas sísmicas por las características del terreno y el comportamiento estructural de las viviendas. Por lo tanto, para los autores de este artículo se hizo evidente la necesidad de desarrollar un procedimiento que tome en cuenta las variables significativas y que retome lo mejor de los trabajos analizados, además de que cumpla con los atributos de: incluir las principales variables; diversificación de aplicación a zonas, poblados, ciudades y municipios; sencillo en los cálculos numéricos y fácil de interpretar; potencial de apoyo para diferentes niveles de decisión, principalmente los gobiernos municipales; y que permita la incorporación de diferentes fuentes de información relacionadas con las variables. En este propósito resultó importante revisar el trabajo de López y Toledo (2002) que está enfocado al estudio de la seguridad de las edificaciones de vivienda ante la incidencia de viento, pero que cumple con algunos de los atributos comentados, además, reconocen la complejidad del problema y lo simplifican al proponer un índice cuantitativo en función de datos de los censos.

El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento que permita estimar el número probable de viviendas dañadas en el sismo de la mayor intensidad esperada y que cumpla con los atributos mencionados. Una vez establecido el procedimiento, como aplicación, se establecieron los siguientes objetivos particulares; a) proponer formas de utilizar y aprovechar fuentes de información, b) obtener mapas de vulnerabilidad, y c) establecer una estrategia para disminuir la vulnerabilidad.

Considerando lo anterior, en este trabajo se propone y se describe un índice de susceptibilidad de daño por sismo y se establece el método para calcularlo. El método permite la incorporación de la información de que se pueda disponer, se mencionan las fuentes de información utilizadas. Se comparan y se discuten los

resultados encontrados para dos casos de sismos recientes, con esta base se presentan posibles medidas para disminuir la vulnerabilidad de las viviendas y la comparación de su costo relativo a los costos esperados de daños al ocurrir un sismo de la mayor intensidad para la zona de estudio. Finalmente se describe la aplicación al Municipio de Sultepec en el Estado de México, los resultados se analizan para juzgar la aplicabilidad de lo planteado y su posible extensión a otros municipios. Los resultados de este estudio se hicieron del conocimiento de las autoridades competentes de dicho municipio para respaldar sus programas de mejoramiento de vivienda.

METODOLOGÍA

Se partió de establecer un parámetro que permita estimar los posibles daños esperados como promedio de lo que ocurre en el país, de esta manera se define la vulnerabilidad básica, V_B , que se interpreta como el porcentaje (en este estudio de viviendas) de construcciones dañadas si las características del subsuelo y las tipologías estructurales fueran las promedio. Esta vulnerabilidad básica se corrige con los factores apropiados y podrá ser mayor o menor para condiciones desfavorables o favorables respectivamente. Tomando en cuenta la información que se pudo obtener, se establecieron dos criterios para su cálculo: a) en función de lo ocurrido en sismos recientes en México, y b) en función de datos al nivel mundial.

Para el primer criterio, se tomó en cuenta que los daños son proporcionales a la intensidad, se realizó un estudio de los reportes de sismos que consignan daños de forma más o menos precisa. Se incluyeron los siguientes: Manzanillo 9 de Octubre de 1995 (Tena, 1997); Tehuacán 15 de Junio de 1999 (Juárez *et al.*, 1999); Tuxtla Gutiérrez 21 de octubre de 1995 (Red, 1996); Colima 21 enero 2003 (Tejeda y Pandero, 2003). Los datos se pasaron de intensidad a coeficiente sísmico para hacer más práctico su manejo y se estableció una variación discreta para hacerla corresponder a las zonas sísmicas de la Republica Mexicana (CFE, 2005).

Para el segundo criterio, se tomó como base el trabajo de Conchrane y Shaad (1992) que propusieron un criterio para establecer la vulnerabilidad básica por medio de los datos de daños para sismos en todo el mundo, ese estudio se enfocó a desarrollar una herramienta para estimar la vulnerabilidad en términos del costo de reparación de las estructuras dañadas en relación al costo de reemplazar todas las estructuras en una zona en función de la intensidad en

la escala de Mercalli modificada (MMI), la edad de la construcción y su tipo estructural, parámetro que se denomina MDR. El estudio se basó en gran cantidad de datos al nivel mundial por lo que en términos absolutos se puede aplicar a México, sin embargo no incluye construcciones de adobe y de otros materiales precarios ya que dicho estudio se enfocó a su aplicación en compañías de seguros; mientras que la gran mayoría de las construcciones para vivienda dañadas en México y otros países con poco desarrollo económico no cuentan con seguros. Sin embargo a partir de los datos de este estudio se puede estimar la vulnerabilidad básica como aquí se define. Para ello se hace la suposición que si se toma el límite inferior se podrá tener un estimado de los daños mínimos esperados en una zona, que puede ser tomada como referencia afectándola con los factores apropiados para representar las condiciones locales.

Se espera que ambos criterios conduzcan a valores similares de la vulnerabilidad básica, con ello se establece el índice de susceptibilidad de daños por sismo definido por dicho valor afectado por dos factores, el primero toma en cuenta la amplificación de los efectos sísmicos por las características topográficas y geológicas del terreno, y el segundo toma en cuenta el comportamiento estructural de las viviendas, en función de la topología estructural, la calidad de los materiales y la competencia de la mano de obra.

El índice así definido, permite estimar el número probable de construcciones afectadas, por ciento o por millar, incluyendo las que tendrían daños ligeros reparables a relativamente de bajo costo, los casos con daños significativos pero parciales que requieren trabajos importantes para su rehabilitación, así como los casos que representan pérdida parcial o total. Con lo anterior, se establece el método para calcularlo por medio de pasos sencillos, lo cual se describe con más detalle en el apartado de resultados.

Uno de los propósitos básicos de este estudio es su aplicación práctica, por lo que se establece una estrategia para disminuir la vulnerabilidad sísmica de las viviendas a nivel municipal, para ello se establece el siguiente procedimiento:

1. Estimar, con el método aquí propuesto y de la mejor manera posible, el número de viviendas que probablemente serían afectadas al ocurrir el sismo de la mayor intensidad.
2. Estimar el costo de reparación de daños causados por la supuesta ocurrencia de un sismo intenso, Costo A.

3. Establecer un programa de mejoramiento de vivienda que implica identificar las más vulnerables y reforzarlas, estimar el costo de este programa, Costo B.
4. Calcular el número de viviendas que supuestamente se dañarían si se realiza previamente el programa de mejoramiento, y estimar el costo de reparar los daños en esas condiciones, Costo C. Se espera que la suma de los costos B y C sea menor que en costo A.

Se supone que con esta información la autoridad correspondiente implemente el programa de mejoramiento de vivienda mencionado. Una vez que se autorizara el presupuesto correspondiente se procedería a localizar las viviendas que requieran intervención de acuerdo a las tipologías estructurales más vulnerables como son: estructuras con muros de adobe o de mampostería no reforzada, con claros defectos de estructuración o de construcción, construcciones en esquina; que han sufrido modificaciones importantes o con muy pocos muros en una de sus direcciones, entre otros casos.

En seguida se procede a reforzar las estructuras así identificadas utilizando los procedimientos para cada caso y que han mostrado eficiencia en estudios experimentales. Se puede partir de la intervención de las viviendas detectadas como más vulnerables a las menos vulnerables hasta agotar el presupuesto, es posible que se detecten casos en muy mal estado en cuyo caso se deberán reponer totalmente o clausurarlas.

Otro requisito importante, de acuerdo a recomendaciones de CENAPRED, para que los trabajos de rehabilitación sean exitosos es involucrar a los propietarios de las viviendas en programas de auto construcción. Para ello se requiere del apoyo técnico de expertos, proporcionando asesoría y supervisión en la ejecución de los trabajos. Con todo ello, será difícil que se intervengan todas las viviendas que pueden dañarse o inclusive colapsar, pero su número se espera que se reduzca considerablemente, y se esperarían menores gastos absolutos si se hacen las acciones de reforzamiento antes de la ocurrencia de un sismo, además de que seguramente se tendrían menos personas afectadas en su integridad física.

RESULTADOS

Cálculo de la vulnerabilidad básica

Con el primer criterio, se pudo observar que para las intensidades más altas de IX en escala Mercalli modificada, se tiene un porcentaje de daños entre 15% y 65%; para intensidades moderadas de VIII entre 10% y 35%; y para intensidades relativamente bajas de VI se tiene entre 1% y 1.5% de estructuras dañadas. Para establecer el daño probable en función del coeficiente sísmico c , primero se recurre a relaciones que se han propuesto entre intensidad y aceleración (Hamada, 1991), de esta manera la intensidad IX se relaciona con 500cm/seg^2 ; la intensidad de VIII con 350 cm/seg^2 y la de VI con 60cm/seg^2 . Se propone que estos casos representen las zonas sísmicas D, C y B, (CFE, 2005). Para las zonas D y C se asume que el coeficiente sísmico corresponde a las aceleraciones del suelo, o sea 0.51 para la zona D y 0.36 para la zona C, en cambio para la zona B la aceleración de respuesta es 3.5 veces la del suelo, esto por la forma de espectro de diseño, o sea, $c= 0.21$. Para los propósitos de este trabajo, se propone establecer la vulnerabilidad básica con tramos de recta entre los puntos básicos definidos anteriormente, lo cual permite diferenciar entre zonas con alto peligro sísmico y zonas con bajo peligro sísmico.

Para valores de c menores de 0.21 no se tienen datos por lo que se optó por un criterio simple (menor intensidad menor daño), es decir una recta que pasa por el origen hasta el valor correspondiente a 0.21 que es de 0.010 (zona B donde generalmente se manifiestan daños por sismos intensos ocurridos en zonas vecinas). De esta manera, los autores proponen las ecuaciones 1 a 3.

$$V_B = 0.0476c; \quad c \leq 0.21 \quad (1)$$

$$V_B = 0.6c - 0.116; \quad 0.21 < c \leq 0.36 \quad (2)$$

$$V_B = 0.347c - 0.0248; \quad c > 0.36 \quad (3)$$

Para la aplicación del segundo criterio se parte de los valores mínimo y máximo de MDR reportados en dicho estudio para los casos que interesan en este trabajo, como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Vulnerabilidad básica, basado en Conchrane y Shaad (1992).

Zona	MMI	Aceleración cm/seg^2	c	MDR (%)	Porcentaje de estructuras dañadas como mín.
D	IX	500	0.51	8.75 - 75	18.2
C	VII	360	0.36	4 - 60	11.4
B	VI	210	0.21	0.13 - 2	0.64

De los datos de MDR se puede inferir el porcentaje de estructuras dañadas para cada zona sísmica tomando en cuenta la afectación durante sismos reciente en México. En la zona D, 20% de las construcciones sufre daño total por lo que el costo de reparación es igual al de reemplazo, el 50% de las construcciones sufre daño parcial con un costo de reparación aproximadamente de la mitad del correspondiente al reemplazo y 30% de las construcciones sufren daños menores con costo aproximado de la décima parte del costo de reemplazo. Por lo tanto para las condiciones establecidas se espera que 18.2% de las construcciones probablemente sufrirían algún tipo de daño. Este valor se calcula mediante el razonamiento: costo reparación relativo al costo de reemplazar todas las viviendas igual a $((0.2)(1.0)+(0.5)(0.5)+(0.3)(0.1)) = 0.48$ por el total de las viviendas dañadas; la relación entre el costo de reparación y el costo de reemplazo es igual a MDR, para este caso 0.0875 , se obtiene $0.0875/0.48 = 0.182$. Para la zona C, 10% de las edificaciones sufre daño total, 40% daño parcial y

50% daños menores, con las mismas suposiciones anteriores se espera que 11.4% de construcciones sufran daños. De forma similar para la zona B, 5% de las construcciones sufre daño total, 15% daño parcial y 80% daño ligero, con lo que se obtiene que probablemente 0.64% de las construcciones se dañen. Estos valores se consignan en la última columna de la Tabla 1. Para este caso los autores proponen las ecuaciones 4 a 6.

$$V_B = 0.03c; \quad c \leq 0.21 \quad (4)$$

$$V_B = 0.717c - 0.144; \quad 0.21 < c \leq 0.36 \quad (5)$$

$$V_B = 0.4533c - 0.0492; \quad c > 0.36 \quad (6)$$

En la Figura.1 se presenta la variación de V_B para diferentes valores del coeficiente sísmico según los dos criterios considerados, se observa que se presenta una tendencia similar en los dos casos.

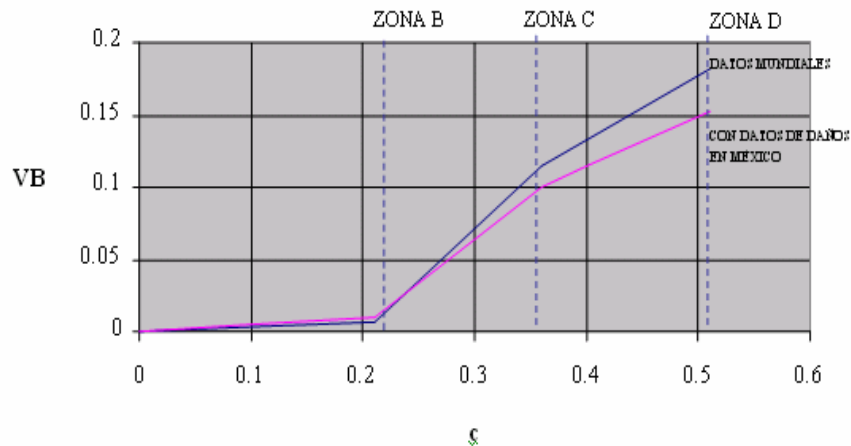


Figura 1. Vulnerabilidad básica en función del coeficiente sísmico, c .

Los factores que se toman en cuenta para modificar la vulnerabilidad básica son: el tipo de terreno, las diferentes tipologías estructurales y la calidad de materiales y de construcción. De esta manera se llegó a la definición del índice buscado cuyo cálculo se detalla en el siguiente apartado.

Método de cálculo

El índice de susceptibilidad de daños por sismo se define de acuerdo a la ecuación 7.

$$I_{SD} = V_B T_E E \quad (7)$$

Donde:

V_B = VULNERABILIDAD BÁSICA;

T_E = FACTOR DE TERENO BLANDO,

E = FACTOR DE TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL Y CALIDAD DE CONSTRUCCIÓN.

Para obtener el coeficiente sísmico, c , (terreno duro) se recurrió a lo propuesto en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, o sea, 0.08 para la zona A, 0.14 para la zona B, 0.36 para la zona C y 0.51 para la zona D. Se aclara que si en alguna región se cuenta con zonificaciones sísmicas particulares se podrán usar los valores de c correspondientes.

El factor de terreno blando, T_E , se calcula con datos geológicos y topográficos, depende del coeficiente sísmico y de una variable que permita estimar si se

pueden presentar amplificaciones de los efectos sísmicos debidos a las características del subsuelo, que se denomina T_B . Se recurrió a los estudios que permitieron establecer los espectros de diseño para diferentes tipos de terreno buscando que dichas fórmulas fueran sencillas pero que reconocieran las principales tendencias que se reflejan de los fenómenos sísmicos ocurridos. Las fórmulas propuestas por los autores son las ecuaciones 8 y 9 dependiendo del valor del coeficiente sísmico.

$$T_E = (1.67c + 1.37)T_B + 1 \quad ; \quad c \leq 0.14 \quad (8)$$

$$T_E = (1.90 - 2.36c)T_B + 1 \quad ; \quad c > 0.14 \quad (9)$$

La relación T_B se define como el área de terreno con posibilidades de incrementar los efectos sísmicos al área total. Para proponer valores prácticos de T_B , se recurrió a una carta geográfica de la Republica Mexicana (INEGI, 2001) y para el nivel municipal en el Estado de México se contó con los datos de la

Síntesis de Información Geográfica del Estado de México, que comprende las cartas geográficas, topográficas, geológicas, hidrológicas, edafológica y de regionalización fisiográfica (INEGI, 2001); y para los municipios del Estado de Colima se tuvo como base los mapas fisiográfico, geológico, de suelos dominantes, de orografía, corrientes y cuerpos de agua y regiones y cuencas hidrológicas (INEGI, 2001). Con los resultados se logró establecer un criterio general para la evaluación de esta relación, con lo que se obtuvo de forma sintética lo consignado en la Tabla 2. Para el cálculo del factor por tipología estructural y calidad de construcción, E , se los autores propusieron un criterio empírico, tomando la forma de un factor de amplificación o de reducción según el caso, de acuerdo a la ecuación 10.

$$E = \frac{p^x}{1 - p} \quad (10)$$

Tabla 2. Valores de T_B .

Características del terreno	T_B
Predominio de terrenos altos con valles aluviales antiguos, topografía uniforme.	0
Predominio de terrenos aluviales con escasos depósitos de arcilla. O bien depósitos de arcilla consolidados con topografía uniforme.	0.25
Predominio de terrenos aluviales con depósitos significativos de arcilla no consolidados y topografía accidentada.	0.50
Predominio de terrenos aluviales poco consolidados, con zonas significativas cercanas a lechos de ríos o grandes áreas urbanas sobre depósito de arena.	0.75
Predominio de terrenos cerca de costas, lechos de ríos o rellenos sobre antiguos lagos o bien terrenos muy escarpados con propensión a movimiento de taludes.	1.0

El valor, p , se define como la relación del número de edificaciones con posible comportamiento insatisfactorio al total de construcciones. Una forma de calcular este valor es a partir de los datos del censo general de población y vivienda (INEGI, 2000), que consignan tipologías estructurales y construcciones hechas con materiales precarios.

Los datos útiles de los censos para este caso son: A, porcentaje de muros de adobe; M, porcentaje de muros de ladrillo, bloque de concreto, piedra; Pr, porcentaje de muros con materiales precarios; O, porcentaje de muros con otros materiales; y T, porcentaje de techos de teja. Tomando en cuenta los datos de daños en sismos recientes, se establecen las ecuaciones 11 y 12 para obtener el valor de la tipología estructural (propuesta de los autores):

$$p = \frac{[a_1A + a_2M + (Pr + O)a_3]}{100} \quad \text{si } T < A \quad (11)$$

$$p = \frac{[a_1A + a_2M + (Pr + O)a_3 + (T - A)a_4]}{100} \quad \text{si } T > A \quad (12)$$

Los valores de los coeficientes a se obtienen de la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes para establecer el valor de a .

Zona Sísmica	a_1	a_2	a_3	a_4
A y B	0.5	0.05	0.2	0.4
C	0.7	0.10	0.4	0.6
D	1.0	0.3	0.4	0.8

Alternativamente, un criterio más directo es tomando en cuenta que muchas viviendas se hacen por autoconstrucción (90% a nivel Nacional, 85% en el Estado de México) por lo que no se esperan valores de p menores de 0.10. Tampoco se esperan valores cercanos a 1.0 puesto que lo más común es que se tengan más estructuras bien construidas que mal construidas. Por lo tanto se establece el criterio general de la Tabla 4 para estimar el valor de p .

Tabla 4. Criterio para obtener valores de p.

Tipo de estructuras	p
Predominio de estructuras de mampostería reforzada, concreto reforzado y acero estructural, no más de 10% de estructuras con muros de adobe o materiales precarios.	0.1
Igual que el anterior pero con más de 10% de estructuras con muros de adobe o mampostería no reforzada	0.2
Casi igual cantidad de estructuras de mampostería reforzada y concreto reforzado respecto a los de adobes y mampostería sin refuerzo.	0.3
Localidades donde exista predominio de las estructuras cuyos muros sean de adobe, mampostería no reforzada o de materiales precarios.	0.5

Para el índice de calidad de construcción, **x**, se investigó la población total que se dedica a laborar en cualquier ocupación y la población que se dedica a la industria de la construcción, también se utilizó la información del censo (INEGI, 2000) sobre el tipo de materiales utilizados para la elaboración de viviendas, con estas bases se proponen los valores prácticos de la Tabla 5.

Finalmente para desagregar el número de viviendas dañadas por tipo de daño se recurre a las proporciones previamente establecidas, resultando en los valores de la Tabla 6 que permiten estimar el número de construcciones para cada nivel de daño.

Tabla 5. Valores de x.

Características de la construcción	x
Regiones con reconocida tradición constructiva, uso de materiales controlados y mantenimiento oportuno de las construcciones	1.0
Regiones con calidad de construcción normal, materiales de calidad regular y acciones de mantenimiento generales	0.7
Calidad de construcción variable tendiendo a la baja, materiales que no son sometidos a controles estrictos, propensión a la modificación y ampliación de estructuras, poca cultura del mantenimiento.	0.5
Calidad de construcción muy baja, materiales de construcción de baja resistencia y poca durabilidad, poca cultura de mantenimiento.	0.3
Calidad de construcción excepcionalmente baja, materiales precarios y nula atención al mantenimiento.	0.1

Tabla 6. Relaciones de construcciones afectadas por tipo de daño.

Zona sísmica	Tipo de daño		
	Ligeros reparables	Severos pero parciales	Total
A y B	0.80	0.15	0.05
C	0.50	0.40	0.10
D	0.30	0.50	0.2

Mapas de vulnerabilidad

El cálculo del índice propuesto se puede sistematizar y representar en forma gráfica, se hicieron cálculos para la Republica Mexicana, así como los municipios del Estado de Colima y del Estado de México. Para ello se recopiló y analizó la mayor información disponible como se explicó anteriormente, a manera de ejemplo en la Figura 2 se presenta el mapa para Colima.

1999. Para el caso de Colima (Tejada y Pandero, 2004) se presenta la Tabla 7 que consigna los casos de viviendas dañadas por municipio y totales. Considerando los totales, se observa que se tuvieron 25,353 viviendas dañadas de las cuales 7,973 con daño leve, 13,623 con daño parcial y 3,757 con daño total, mientras que los datos estimados con el procedimiento propuesto en total se esperarían 25,328 viviendas dañadas de las cuales, 7,598 con daño leve, 12,664 con daño parcial y 5,065 con daño total. En este caso fue posible hacer cálculos desagregados por municipio como se presenta en la Tabla 7. Se puede observar una tendencia de correlación entre lo estimado con el método propuesto y los datos de los daños ocurridos. Para el caso de Puebla según los datos obtenidos del sismo de Tehuacan de 1999, se tuvieron 30,676 viviendas dañadas de las cuales 9,682 con daño leve, 15,688 con daño parcial y 5,306 con daño total, mientras que los datos estimados con el procedimiento propuesto corresponden a 45,775 viviendas dañadas, 22,888 con daño leve, 18,310 con daño parcial y 4,578 con daño total. En este caso no se contó con suficientes datos para establecer daños por municipio (de hecho solamente se tomaron en

DISCUSIÓN

Comparación con datos de sismos recientes

Se procedió a comparar los resultados de aplicar la metodología en los casos de Colima 2003 y Puebla

cuenta las partes del Estado de Puebla que manifestaron intensidades mayores VIII) se observa al nivel general que si existe correlación.

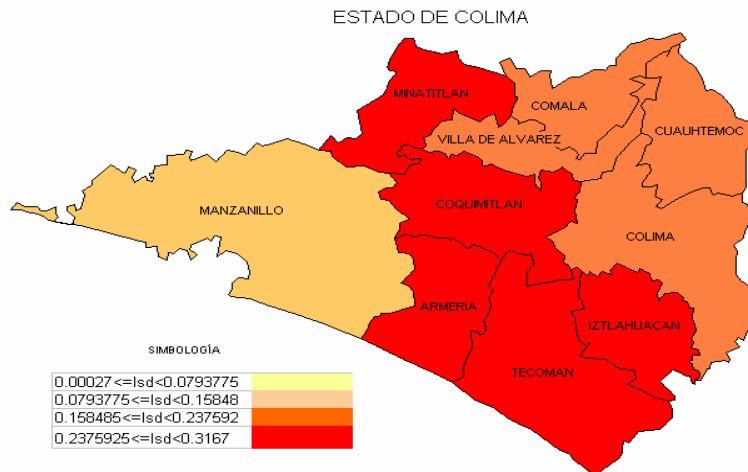


Figura 2. Valores de I_{SD} para el Estado de Colima.

Tabla 7. Daños del Estado de Colima.

Municipio	Total de Viviendas (año 2003)	Total de Viviendas (estimado)	Afectadas N° (%)	Afectadas (estimado) N° (%)	Daño Leve N° (%)	Daño Leve (estimado) N° (%)	Daño Parcial N° (%)	Daño Parcial (estimado) N° (%)	Daño Total N° (%)	Daño Total (estimado) N° (%)
Colima	33,581	30,806	5,874 (17.5)	5,865 (19)	1,592 (4.7)	1,759 (5.7)	3,263 (9.7)	2,932 (9.5)	1,019 (3.0)	1,173 (3.8)
Manzanillo	33,795	29,157	3,507 (10.4)	4,007 (13.7)	1,462 (4.3)	1,202 (4.1)	1,798 (5.3)	2,003 (6.8)	247 (0.7)	801 (2.8)
Tecomán	24,117	21,730	5,820 (24.1)	7,055 (32.4)	1,746 (7.2)	2,116 (9.7)	3,492 (14.1)	3,527 (16.2)	662 (2.7)	1,411 (6.5)
V. de Álvarez	22,660	18,972	2,549 (11.7)	3,370 (17.7)	1,073 (4.7)	1,011 (5.3)	1,177 (5.2)	1,685 (8.9)	399 (1.8)	674 (3.5)
Armería	6,944	6,381	2,819 (40.6)	2,374 (37.2)	798 (11.5)	712 (11.2)	1,621 (23.3)	1,187 (18.6)	400 (5.8)	474 (7.4)
Cuauhtémoc	6,692	6,108	516 (07.7)	1,039 (17)	270 (4.0)	311 (5)	220 (3.4)	519 (8.4)	26 (0.4)	207 (3.5)
Comala	4,794	4,261	582 (12.1)	893 (20.9)	252 (5.3)	268 (6.2)	235 (4.9)	446 (10.5)	95 (2.0)	178 (4.2)
Coquimatlán	4,618	4,132	2,158 (46.7)	1,713 (41.4)	422 (9.1)	514 (12.4)	1,127 (24.4)	856 (20.7)	609 (13.2)	342 (8.3)
Minatitlán	1,999	1,892	480 (24.6)	539 (28.4)	145 (7.3)	161 (8.5)	260 (13.0)	269 (14.2)	60 (3.8)	107 (5.7)
Ixtlahuacán	1,374	1,245	948 (69.0)	868 (69.7)	213 (15.5)	260 (20.9)	510 (37.1)	434 (34.9)	225 (16.4)	173 (13.9)
Total	140,574	124,684	25,353 (18.0)	25,328 (20.3)	7,973 (5.7)	7,598 (6)	13,623 (9.7)	12,664 (10.2)	3,757 (2.7)	5,065 (4.1)

Estrategia para disminuir la vulnerabilidad.

Si se supone que se hubiera aplicado la estrategia antes del sismo de Colima, con los pasos propuestos

se obtiene: 1) $I_{SD} = 0.203$, número probable de viviendas dañadas 25,328 (real 25,353). 2) Costo A, estimado 231.1 M\$ (millones de pesos), con datos

aportados por Cuatláyotl (2005) la cantidad realmente invertida fue de 210.6 M\$. 3) Con valores promedio y suponiendo que generalmente en una vivienda son relativamente pocos los elementos estructurales que se requieren intervenir para mejorar notablemente su comportamiento se puede estimar que el costo para viviendas con pocas a medianas deficiencias sería de \$7000 pesos por unidad y para viviendas con deficiencias importantes sería de \$14 000 pesos por unidad, la aplicación conduce a un estimado del Costo B de 137.9 M\$. 4) El supuesto mejoramiento de las viviendas hubiera conducido a $p = 0.1$ y $x = 0.9$, con lo que se obtiene, $I_{SD} = 0.0279$, lo que significa que en el supuesto de que se hubieran reforzado la mayoría de las estructuras vulnerables antes del sismo, la viviendas dañadas hubieran sido solamente 3,487, de las cuales 1,046 tendrán daños menores, 1,743 daños parciales y 697 daños totales. Con las mismas suposiciones del paso 2) el Costo C resulta de 31.7 M\$. Por lo tanto la inversión total antes del sismo, sería de 169.6 M\$ mientras que la cantidad requerida para la reparación considerando el número real de viviendas dañadas fue de 210.8 M\$.

Para poder contar con más elementos de evaluación, se aplicó también al municipio de Sultepec en el Estado de México, incorporando información de observaciones de campo que permitieron partir de datos lo más apegados a la realidad. Los principales datos de este municipio son: Superficie: 552.52 km²; tipo de terreno predominante: terrenos muy escarpados; por lo tanto se puede estimar $T_B = 1$; $T_E = 2.1$; zona sísmica $c = 0.36$; $V_B = 0.1$, $p = 0.5835$; $x = 0.1$, calidad de construcción baja, número de viviendas = 4939; por lo tanto se tiene $I_{SD} = 0.466$, lo que representa que el número probable de viviendas dañadas al ocurrir un sismo intenso será de 2,304 de

un total de 4,939. De las viviendas probablemente dañadas, 1,152 se espera que tengan daños leves, 922 daños parciales y 230 daños totales. Estos datos indican que la vulnerabilidad en el municipio es alta. En seguida se calculó el costo de reparación de las viviendas en el supuesto que se dañara el número de viviendas antes referido que resultó de 23.4 M\$. Después se estimó la cantidad que debería invertirse para disminuir 80% aproximadamente la vulnerabilidad resultando de 13.5 M\$. Finalmente se estimó el costo de reparar daños después de un sismo intenso suponiendo que previamente se haya hecho la inversión para mejorar la vivienda que resultó de 7.3 M\$. Con estas bases se solicitó el apoyo a las autoridades municipales para realizar estudios directamente en la cabecera municipal y contar con estimaciones más precisas basadas en las condiciones reales de las viviendas.

Se diseñó un formato para captura de información que se aplicó a 360 viviendas en la cabecera municipal de cada caso se elaboró una ficha técnica. Se detectaron tres tipologías estructurales principales correspondientes a estructuras con muros de carga, estructuras con marcos y estructuras con combinación de muros y marcos. Se obtuvieron datos de su estado de conservación lo cual se relacionó con la vulnerabilidad de sufrir daños en sismos intensos, de esta manera un caso sin daños o con daños de poca cuantía se denominó “nada vulnerable”, un caso con desperfectos menores como “poco vulnerable”, un caso con daños moderados y estructuración defectuosa como “medianamente vulnerable” y un caso con desperfectos significativos y estructuración defectuosa como “muy vulnerable”. Un resumen de los resultados de la inspección de 360 viviendas de presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de inspección de viviendas en Sultepec.

Tipo	Estado de conservación (vulnerabilidad)			
	Buen estado (nada vulnerables)	Pocos daños (poco vulnerable)	Daños moderados (medianamente vulnerable)	Mal estado (muy vulnerable)
Muros de carga	2	15	89	46
Marcos	4	13	16	4
Muros y marcos	28	68	67	8
Sumas	34 (9.4%)	96 (28.7 %)	172 (47.8 %)	58 (16.1%)

En seguida se realizó el análisis de costos de reparación considerando métodos desarrollados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (Ramírez y Carreón, 2003) y en otras instituciones (Alcocer, 2004), lo que permitió contar con estimados refinados tanto del número

probable de viviendas dañadas en un sismo intenso como de los costos de reparación para diferentes escenarios, de la siguiente manera: viviendas probablemente dañadas 1,753, con daños de poca consideración 165, con daños ligeros 468, con daños moderados 838 y con daños totales 282. Costo de

reparar los daños después de un sismo intenso: 16.1 millones de pesos. Costo de un programa de mejoramiento de vivienda: 11.5 millones de pesos. Costo de reparar los daños suponiendo que previamente se invierte en el programa de mejoramiento de la vivienda: 4.4 millones de pesos. Por lo tanto se concluye que mediante la identificación en campo de los tipos estructurales principales y su estado de conservación en zonas representativas se obtienen costos del mismo orden que con el procedimiento aproximado, pero se supone que serán más apegados a la realidad. Los resultados de este estudio se dieron a conocer a la autoridad municipal para su posible aplicación.

CONCLUSIONES

Se definió un índice de susceptibilidad de daños por sismo y un método para calcularlo, lo cual permite estimar el número probable de viviendas dañadas al ocurrir sismos intensos. Esta información puede ser útil para establecer el grado de vulnerabilidad de una ciudad o de un municipio. Con estas bases se propuso su aplicación por medio de una estrategia para disminuir la vulnerabilidad como base para el establecimiento de programas municipales de mejoramiento de vivienda. De los resultados obtenidos y su discusión, se establecen las siguientes conclusiones:

1. El procedimiento propuesto para estimar el número de viviendas que probablemente se dañen durante sismos intensos se puede sistematizar para generar mapas de vulnerabilidad, en este artículo se presenta como ejemplo el mapa del Estado de Colima.
2. Los resultados son comparables, en lo general, con los reportes de daños en sismos recientes. Para el caso de Colima se presentó una discrepancia de 1% en el total de viviendas

dañadas, 4% en daños ligeros, 7% en daños moderados y 30% en daños totales. En el caso de Puebla los porcentajes respectivos fueron 49%, 136%, 16% y 14%. Con mejor información de partida se obtienen resultados más aproximados.

3. Se presentó un criterio para disminuir la vulnerabilidad de la vivienda en zonas determinadas, en zonas de alta vulnerabilidad es recomendable invertir en programas de mejoramiento de vivienda.
4. Se aplicó el criterio para disminuir la vulnerabilidad en el municipio de Sultepec, Méx., encontrando resultados del mismo orden de magnitud entre los datos estimados y aquellos basados en la verificación en campo. Resulta muy recomendable realizar estudios de campo para respaldar los programas de mejoramiento de vivienda.
5. Tomando en cuenta lo anterior, se establece que los resultados de este trabajo tienen potencial para su aplicación como herramienta para tomar decisiones al nivel municipal.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo se realizó como parte del proyecto “Sistematización de la respuesta en caso de sismos” proyecto financiado por la Universidad Autónoma del Estado de México a través de la Secretaria de Investigación y Estudios Avanzados con Clave: 1991/2004-2. Los estudiantes Antonio Gómez Sotelo y Martín González Cruz realizaron las observaciones de viviendas en Sultepec como parte de su trabajo para obtener el título de ingeniero civil. En las primeras etapas del trabajo participó, como parte de su servicio social, la estudiante de ingeniería civil Ana Cecilia Beltrán García.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón** P, Silvia y Zavala T. Carlos (2005), Vulnerabilidad sísmica de viviendas en el Distrito de la Molina. En “Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Artículo II-27, México Distrito Federal
- Alcocer**, S. (1999), Capítulo 10. Rehabilitación de estructuras de mampostería. En “Edificaciones de mampostería para vivienda”. pp211-302. Fundación ICA, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y la Universidad Autónoma del Estado de México. México Distrito Federal
- Arellano** M., Eduardo, Hugón J. G. y Alonso G. (2003), Caracterización y clases de vulnerabilidad de edificaciones de la Colonia Roma, Ciudad de México. En “Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Artículo ID-II-01, León, Guanajuato

- CFE (2005) Diseño por sismo, Cap C1.3 En “Manual de Diseño de Obras Civiles”. Pp 45 Comisión Federal de Electricidad, México DF
- Conchrane, S. W., W. H. Shaad (1992), Assessment of earthquake vulnerability of buildings, “Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering”. Ed. Balkema, pp231-255, Madrid, España.
- Cuatláyotl J. (2005) Lecciones derivadas del sismo de Tehuacan Puebla en la reparación de edificios de mampostería. En “Memoria, Curso corto regional de alto nivel sobre edificaciones de mampostería”, Tema II-4 Morelia, Michoacán.
- Guillén L. Briseida, Consuelo G. S. y Aldama O. Alejandro (2005), Evaluación de la vulnerabilidad sísmica por muestreo estadístico. En “Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Artículo II-01, México Distrito Federal
- Hamada, (1991) “Seismic Engineering” First edition, J. Wiley, New York
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2001), “Síntesis de Información Geográfica del Estado de México”. México.
- INEGI, Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2000), “Censo General de Población”. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (2007), www.inegi.gob.mx
- Juárez, H., A. Gómez, A., Terán y otros (1999) Intensidades de daños asociados al sismo del 15 de julio de 1999. En “Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Vol. II pp757-762, Morelia Michoacán
- López B. Oscar y Toledo S. Héctor (2002) Estudio de la seguridad de las edificaciones de vivienda ante la incidencia de viento. En “Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, Artículo II-14, Puebla México.
- Ramírez, H., B. Carreón (2004) Experimental study on masonry walls strengthened with steel and plastic straps “Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering”, Paper No 1995 Vancouver, Canada.
- Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica. “Sismo del 20 de Octubre de 1995” Informe R115-05, Jorge Aguilar (editor), México D.F. Julio de 1996, 98p
- Salgado R. Alberto, (2005), Daños por sismos esperados en las viviendas tradicionales de ciertos Centros Históricos del sureste mexicano. En “Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Artículo II-04, México Distrito Federal
- Sánchez P. Tomás. (2005), Vulnerabilidad y riesgo de la vivienda en México, En “Memoria, curso corto regional de alto nivel sobre edificaciones de mampostería destinada a habitación”. Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil y Colegio de Ingeniería en Michoacán, Tema II-1, Michoacán, México.
- Tejeda Jacome Juan de la C., Licea Panduro Ramiro, Araiza Garaygordobil Juan Carlos (2004) Evaluación del comportamiento estructural de la vivienda económica, en la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez, durante el sismo de enero del 2003. En “Memoria del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, Artículo V-04, Acapulco, Guerrero
- Tejeda J. A., L. Pandero R. (2005) Estadística de daños y reparación de edificios de mampostería, tras el sismo de Tecoman de Enero 2003. En “Memoria, Seminario Regional de Edificaciones de Mampostería”. Tema II-2, Morelia Michoacán.
- Tena Colunga A. (1993) “El macrosismo de Manzanillo del 9 de Octubre de 1995” Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C. Colima, México.
- Vega Daniel y Lermo Javier, (2005) Estimación de efecto de sitio y la vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Acatlán, Puebla. En “Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica”, Artículo II-26, México, Distrito Federal.

Este documento se debe citar como:

Ramírez de Alba, H., Pichardo Lewenstein, B. y Arzate Cruz, S. P. (2007). **Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas en zonas urbanas.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-1, pp.13-23, ISSN: 1665-529X