



TOMO I
METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PROBABILISTA DE
RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-5
VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES E
INFRAESTRUCTURA



CEPRENAC



Inter-American Development Bank



opportunities for all



Consortio Evaluación de Riesgos Naturales
- América Latina -
Consultores en Riesgos y Desastres

Consortio conformado por:

Colombia

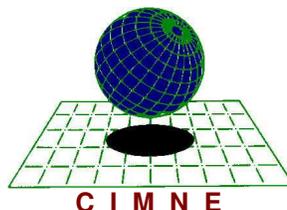
Carrera 19A # 84-14 Of 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

España

Centro Internacional de Métodos Numéricos
en Ingeniería - CIMNE
Campus Nord UPC
Tel. 34-93-401-64-96
Fax 34-93-401-10-48
Barcelona



México

Vito Alessio Robles No. 179
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón
Tel. 55-5-616-8161
Fax 55-5-616-8162
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

ERN Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina
www.ern-la.com

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

Omar Darío Cardona A.
Dirección General del Proyecto

Luis Eduardo Yamín L.
Dirección Técnica ERN (COL)

Gabriel Andrés Bernal G.
Coordinación General ERN (COL)

Mario Gustavo Ordaz S.
Dirección Técnica ERN (MEX)

Eduardo Reinoso A.
Coordinación General ERN (MEX)

Alex Horia Barbat B.
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

Martha Liliana Carreño T.
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Miguel Genaro Mora C.
Especialista ERN (COL)

César Augusto Velásquez V.
Especialista ERN (COL)

Karina Santamaría D.
Especialista ERN (COL)

Mauricio Cardona O.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrés Mauricio Torres C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Diana Marcela González C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Yinsury Sodel Peña V.
Asistente Técnico ERN (COL)

Andrei Garzón B.
Asistente Técnico ERN (COL)

Carlos Eduardo Avelar F.
Especialista ERN (MEX)

Benjamín Huerta G.
Especialista ERN (MEX)

Mauro Pompeyo Niño L.
Especialista ERN (MEX)

Isaías Martínez A.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Edgar Osuna H.
Asistente Técnico ERN (MEX)

José Juan Hernández G.
Asistente Técnico ERN (MEX)

Marco Torres
Asesor Asociado (MEX)

Johner Venicio Correa C.
Asistente Técnico ERN (COL)

Mabel Cristina Marulanda F.
Especialista CIMNE(ESP)

Jairo Andrés Valcarcel T.
Especialista CIMNE(ESP)

Juan Pablo Londoño L.
Especialista CIMNE(ESP)

René Salgueiro
Especialista CIMNE(ESP)

Nieves Lantada
Especialista CIMNE(ESP)

Álvaro Martín Moreno R.
Asesor Asociado (COL)

Mario Díaz-Granados O.
Asesor Asociado (COL)

Liliana Narvaez M.
Asesor Asociado (COL)

Asesores Nacionales

Osmar E. Velasco
Guatemala

Sandra Zúñiga
Nicaragua

Alonso Brenes
Costa Rica

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

Francis Ghesquiere
Coordinador Regional

Oscar A. Ishizawa
Especialista

Joaquín Toro
Especialista

Fernando Ramírez C.
Especialista

Edward C. Anderson
Especialista

Stuart Gill
Especialista

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

Flavio Bazán
Especialista Sectorial

Cassandra T. Rogers
Especialista Sectorial

Hori Tsuneki
Consultor Interno

Tabla de contenido

| | | |
|------------|--|-------------|
| 1 | Generalidades y necesidad de información | 1-1 |
| 2 | Comportamiento de estructuras ante eventos extremos | 2-1 |
| 2.1 | Vulnerabilidad sísmica | 2-1 |
| 2.1.1 | Funciones de vulnerabilidad para sismos..... | 2-1 |
| 2.1.2 | Curvas de capacidad y curvas en formato Sa-Sd..... | 2-4 |
| 2.1.3 | Definición de niveles de daño..... | 2-6 |
| 2.1.4 | Estimación de la demanda inelástica | 2-7 |
| 2.1.5 | Desviación estándar del daño..... | 2-12 |
| 2.1.6 | Modificaciones para obtener funciones de vulnerabilidad..... | 2-11 |
| 2.2 | Vulnerabilidad ante huracanes (vientos y mareas)..... | 2-14 |
| 2.2.1 | Introducción..... | 2-14 |
| 2.2.2 | Efectos del viento sobre las estructuras..... | 2-16 |
| 2.2.3 | Funciones de vulnerabilidad propuestas para viento | 2-17 |
| 2.3 | Inundaciones (Marea, Inundación y aplicable a Tsunami)..... | 2-18 |
| 2.3.1 | Generalidades..... | 2-18 |
| 2.3.2 | Funciones propuestas..... | 2-19 |
| 2.4 | Vulnerabilidad estructural ante deslizamientos | 2-21 |
| 2.4.1 | Vulnerabilidad de las construcciones ante deslizamientos | 2-21 |
| 2.4.2 | Vulnerabilidad de contenidos en casos de deslizamientos..... | 2-22 |
| 2.5 | Vulnerabilidad ante erupciones volcánicas | 2-22 |
| 3 | Vulnerabilidad humana ante eventos extremos | 3-1 |
| 3.1 | Sismos (movimiento del terreno) | 3-1 |
| 3.1.1 | Introducción..... | 3-1 |
| 3.1.2 | Metodología propuesta de cálculo | 3-2 |
| 3.1.3 | Resultados representativos..... | 3-6 |
| 3.2 | Viento de huracán..... | 3-6 |
| 3.3 | Inundaciones (huracán, marea o precipitación)..... | 3-7 |
| 3.4 | Deslizamientos..... | 3-7 |
| 3.5 | Erupciones volcánicas..... | 3-8 |
| 4 | Librería de funciones de vulnerabilidad | 4-1 |
| 4.1 | Software <i>ERN-Vulnerabilidad V1.0</i> | 4-1 |
| 4.2 | Funciones de vulnerabilidad sísmica..... | 4-2 |
| 5 | Referencias | 5-3 |

Índice de figuras

| | |
|--|--------------------------------------|
| FIGURA 2-1 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO PARA DIFERENTES INTENSIDADES..... | 2-2 |
| FIGURA 2-2 CURVA DE CAPACIDAD..... | 2-4 |
| FIGURA 2-3 CURVA DE CAPACIDAD Y CURVA EN FORMATO SA-SD..... | 2-6 |
| FIGURA 2-4 GRUPO DE CURVAS CON DIFERENTES CURVATURAS. | 2-7 |
| FIGURA 2-5 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LAS CURVAS DE VULNERABILIDAD | 2-10 |
| FIGURA 2-6 DESVIACIÓN ESTÁNDAR TÍPICA DEL DAÑO | 2-14 |
| FIGURA 2-7 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD PARA DIFERENTES VARIABLES | 2-12 |
| FIGURA 2-8 FACTORES DE FORMA PARA CONSTRUCCIONES TÍPICAS..... | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| FIGURA 2-9 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD PARA ALGUNOS TIPOS ESTRUCTURALES TÍPICOS..... | 2-17 |
| FIGURA 2-10 EJEMPLOS DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD A INUNDACIÓN, INCLUYE EL DAÑO A LA ESTRUCTURA Y A LOS CONTENIDOS..... | 2-19 |
| FIGURA 2-11 EJEMPLOS DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ANTE LAS INUNDACIONES PARA EDIFICIOS DE UNO O VARIOS NIVELES..... | 2-20 |
| FIGURA 2-12 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD CARACTERÍSTICA PARA DESLIZAMIENTOS | 2-22 |
| FIGURA 2-13 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD PARA DIFERENTES TIPOS DE CUBIERTA (CARGA DE DISEÑO) .. | 2-23 |
| FIGURA 2-14 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD | 2-24 |
| FIGURA 3-1 CÁLCULO DEL FACTOR DE COLAPSO (FC) DADA LA PÉRDIDA OBTENIDA DEL ESTUDIO DE RIESGO SÍSMICO | 3-3 |
| FIGURA 3-2 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD HUMANA..... | 3-5 |
| FIGURA 3-3 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD HUMANA PARA TIPOS ESTRUCTURALES REPRESENTATIVOS | 3-6 |
| FIGURA 3-4 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD HUMANA PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA..... | 3-7 |
| FIGURA 3-5 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD HUMANA PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA..... | 3-7 |
| FIGURA 3-6 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD HUMANA PARA EL CASO DE DESLIZAMIENTO | 3-8 |
| FIGURA 3-7 FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD HUMANA PARA EL CASO DE LLUVIA DE CENIZAS..... | 3-8 |
| FIGURA 4-1 VISTA GENERAL DEL SOFTWARE ERN-VULNERABILIDAD V1.0 PARA LA MODIFICACIÓN Y GENERACIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD | 4-1 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| TABLA 3-1 FACTORES DE ATRAPADOS Y FATALIDAD PARA DIFERENTES TIPOS ESTRUCTURALES | 3-4 |
| TABLA 4-1 CLASIFICACIÓN GENERAL DE TIPOS CONSTRUCTIVOS PARA VULNERABILIDAD SÍSMICA | 4-2 |

1 Generalidades y necesidad de información

La vulnerabilidad se define como la predisposición de un sistema, elemento, componente, grupo humano o cualquier tipo de elemento, a sufrir afectación ante la acción de una situación de amenaza específica. Como tal, la vulnerabilidad debe evaluarse y asignarse a cada uno de los componentes expuestos y para cada uno de los tipos de amenazas considerados.

Para efectos del presente estudio, se hace una clara diferenciación entre vulnerabilidad estructural y vulnerabilidad humana. La vulnerabilidad estructural se refiere al daño o afectación que sufrirá un activo determinado ante una amenaza dada. Usualmente se mide en términos de un porcentaje medio de daño o valor económico requerido para reparar el bien afectado y llevarlo a un estado equivalente al que tenía antes de la ocurrencia del evento y la incertidumbre asociada. Por otro lado la vulnerabilidad humana hace referencia al nivel de afectación a los ocupantes de una edificación en términos de número esperado de víctimas, heridos o en general cualquier nivel de afectación que se defina, en función de la intensidad del fenómeno amenazante.

La vulnerabilidad se expresa por lo tanto en términos de la llamada “función de vulnerabilidad”. La función de vulnerabilidad define la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se define mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno amenazante.

Cada uno de los activos que conforman la base de exposición de componentes deberá tener asignada una función de vulnerabilidad para las pérdidas físicas y una función de vulnerabilidad humana, diferentes para cada una de las amenazas requeridas.

Las funciones de vulnerabilidad pueden evaluarse mediante diferentes técnicas incluyendo:

- Observaciones del comportamiento de diferentes tipos estructurales ante fenómenos que producen desastres.
- Estudios experimentales de componentes estructurales particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Estudios analíticos de componentes estructurales o de estructuras completas particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Experiencia acumulada de expertos.
- Funciones publicadas en la bibliografía internacional.

Por ejemplo, si los elementos o componentes de la construcción, tales como los acabados o los mismos contenidos, tienen funciones de vulnerabilidad similares a las de la estructura, pueden considerarse de manera muy simple mediante la consideración del valor de estos elementos en el valor total de la construcción y el análisis correspondiente con la función de vulnerabilidad asignada a la edificación. Por otro lado, los elementos o componentes tales como acabados o contenidos con funciones de vulnerabilidad muy diferentes pueden considerarse mediante la ponderación y modificación de la función de vulnerabilidad de la construcción, según los criterios del usuario para llevar a cabo esta aproximación.

El sistema no involucra por lo pronto y en forma explícita, la evaluación de pérdidas debidas al lucro cesante o interrupción del funcionamiento.

Las funciones de vulnerabilidad para los tipos estructurales típicos y para los diferentes tipos de amenaza en cada uno de los países debe ser objeto de un trabajo de investigación y refinación permanente. El grado de precisión que se utilice en la función de vulnerabilidad definirá el grado de precisión de los resultados de riesgo. La utilización de funciones de vulnerabilidad de tipos constructivos similares con base en curvas propuestas en otros países es posible siempre y cuando se realice una validación y verificación de las mismas. Universidades y centros de investigación deben propender por estudiar y proponer las funciones de vulnerabilidad de cada país para cada uno de los componentes críticos de obras de infraestructura expuestos a riesgos.

2 Comportamiento de estructuras ante eventos extremos

2.1 Vulnerabilidad sísmica

La función de vulnerabilidad define la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico, para lo cual es necesario definir las curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno amenazante.

El daño se mide usualmente en términos de la relación media del daño RMD (MDR, Mean Damage Ratio en inglés) y corresponde en general al costo de reparación de la estructura para llevarla a un estado equivalente al que tenía antes de la ocurrencia del evento, medida como porcentaje de su valor de reposición total. Por otro lado, la intensidad sísmica puede ser la aceleración, velocidad, desplazamiento o cualquier otra, la que mejor correlación presente frente al nivel de daño del componente a considerar.

En el desarrollo metodológico que se presenta a continuación, la intensidad sísmica se mide principalmente a través de aceleración espectral, desplazamiento espectral y en deriva de entepiso. En la metodología se han tenido en cuenta diversos parámetros de intensidad sísmica que resultan adecuados para correlacionar con el daño de cada uno de los tipos estructurales característicos. Por ejemplo para edificaciones muy rígidas y/o frágiles, para muros, taludes, componentes estructurales específicos resulta conveniente utilizar la aceleración máxima del terreno. En otros casos resulta de mayor sensibilidad bien sea la velocidad máxima del terreno o la deriva espectral de una edificación en particular.

2.1.1 Funciones de vulnerabilidad para sismos

La función de vulnerabilidad de las construcciones se expresa mediante curvas que relacionan la Relación Media de Daño, RMD, también llamada β , y una medida de intensidad del evento y por otro lado, la medida de desviación estándar del parámetro anterior también como función de la intensidad del evento (Miranda, 1999) y se construyen siguiendo por ejemplo la metodología presentada anteriormente.

Los estudios de amenaza permiten obtener los parámetros de intensidad demandados a la estructura. Estos están dados en general en términos de aceleración, velocidad o desplazamientos máximos del terreno o incluso en valores espectrales, es decir para diferentes periodos estructurales dominantes de vibración. Los valores espectrales están dados en general en términos de respuesta elástica de las estructuras para un amortiguamiento dado, generalmente el 5%.

Desde el punto de vista de la función de vulnerabilidad, la medida de intensidad que se selecciona corresponde en general al parámetro que mejor se ajuste a la representación de

daño de cada construcción en particular. En general se utilizan las siguientes representaciones:

- (a) Estructuras rígidas, de poca altura, en mampostería estructural, adobe y materiales similares, el daño se correlaciona normalmente en términos de la aceleración espectral inelástica. Para el caso de estructuras muy rígidas, el parámetro que se utiliza normalmente es la aceleración máxima del terreno.
- (b) Estructuras de altura en sistemas rígidos o flexibles tales como sistemas aporticados, combinados o sistemas de muros estructurales en edificios de varios pisos, el daño se correlaciona normalmente con la deriva espectral inelástica de la edificación.

La Figura 2-1 presenta dos ejemplos de funciones de vulnerabilidad, uno en términos de aceleración espectral inelástica y otra en términos de deriva espectral inelástica.

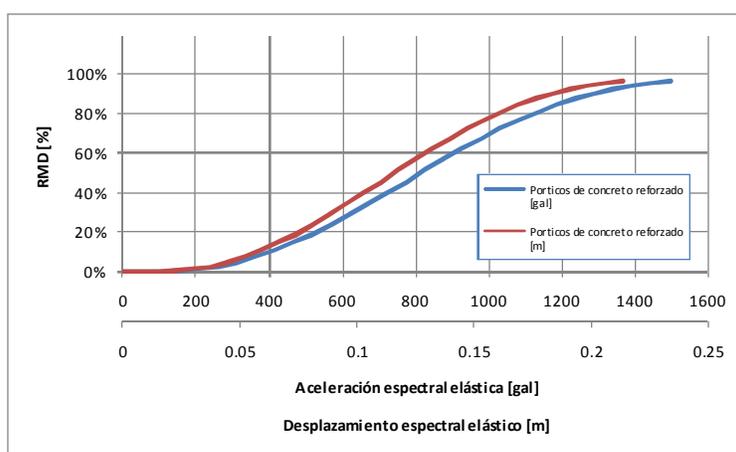


Figura 2-1

Función de vulnerabilidad para pórticos de concreto reforzado para diferentes intensidades

Para garantizar la compatibilidad de los parámetros de intensidad en las funciones de vulnerabilidad y en la representación de la amenaza correspondiente, es necesario modificar los parámetros de intensidad en las funciones de vulnerabilidad. En el presente caso, las modificaciones en la intensidad se limitan a las funciones de vulnerabilidad, dejando inalteradas las curvas o datos de amenaza. Por esta razón, se plantean coeficientes de modificación de los parámetros de intensidad que permitan pasar de valores inelásticos a elásticos equivalentes de manera que al entrar en una función de vulnerabilidad modificada con un parámetro de intensidad elástico obtenido a partir del análisis de amenaza, el resultado del nivel de daño sea el equivalente al haber entrado a la función original con el parámetro de intensidad inelástico.

Lo anterior obliga a que prácticamente cada tipo de componente tenga una función de vulnerabilidad diferente ya que si el comportamiento inelástico varía de una a otra, por ejemplo por el número de pisos, irregularidad o cualquier otro factor, esto generará una función diferente.

Por ejemplo cuando una función de vulnerabilidad está planteada en términos de respuesta inelástica de la estructura (normalmente la deriva inelástica de entrepiso), se hace necesario modificar la función de vulnerabilidad y expresarla en términos de derivadas elásticas de entrepiso. La especificación de la amenaza correspondiente debe ser compatible con la función seleccionada.

La selección de funciones de vulnerabilidad debe hacerse teniendo en cuenta las siguientes precauciones:

- (a) La Relación Media de Daño, RMD, asignada a un elemento estructural individual no es la misma a nivel de toda una estructura. Se hace necesario entonces establecer cuál es la RMD global a partir de RMD de componentes o elementos individuales.
- (b) El comportamiento global de la estructura puede variar significativamente con respecto al comportamiento de un elemento estructural dado, aún si este elemento es uno de los elementos principales de la estructura. En general es necesario realizar un análisis no lineal de la estructura global, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal de algunos elementos estructurales claves dentro de la estructura. Los niveles de daño deben asignarse para toda la estructura.
- (c) La medida de intensidad de entrada a la función de vulnerabilidad puede establecerse en términos de valores espectrales (aceleración o desplazamiento) o en términos de valores de referencia como aceleración o velocidad máxima del terreno. En este caso es necesario realizar las transformaciones necesarias y garantizar que la información de amenaza es compatible con la intensidad de entrada a la función de vulnerabilidad.
- (d) En muchos casos el parámetro de entrada a la función de vulnerabilidad corresponde por ejemplo a la deriva inelástica máxima demandada. Considerando que la amenaza está expresada en general en términos de la deriva elástica máxima, es necesario transformar las funciones de vulnerabilidad para que queden expresadas en términos del parámetro requerido por la amenaza. Esto implica que para su estimación debe considerarse el comportamiento inelástico de la estructura para lo cual debe recurrirse a algún método aproximado de cálculo inelástico de respuesta sísmica estructural.

2.1.2 Curvas de capacidad y curvas en formato Sa-Sd

La curva de capacidad (conocida como curva de “pushover”) y las correspondientes curvas en formato Sa-Sd ante cargas horizontales de un sistema estructural cualquiera representa una adecuada estimación de su comportamiento esperado tanto en el rango elástico como en el inelástico ante cargas sísmicas horizontales. Los métodos para calcular estas curvas se presentan en ATC-13 (1985). El análisis no lineal simplificado propuesto se basa en estimar el punto de comportamiento sobre esta curva ante una demanda sísmica determinada, la cual está dada por espectros inelásticos definidos para el sitio bajo análisis. El análisis considera las variaciones en la rigidez, en el periodo estructural y en el amortiguamiento para niveles progresivos de deformación de entrepiso.

La Figura 2-2 ilustra la representación típica de una curva de capacidad de una edificación cualquiera. Esta se expresa normalmente en términos del cortante basal y el desplazamiento correspondiente a nivel de cubierta.

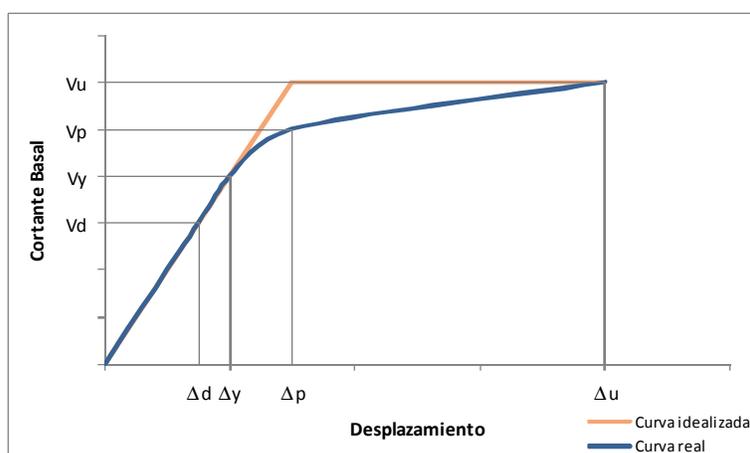


Figura 2-2
Curva de capacidad

Es posible modificar esta curva para expresarla en el formato Sa-Sd (ATC-40, 1996) en el cual en el eje de las abscisas queda el desplazamiento espectral mientras que en el eje de las ordenadas queda el coeficiente sísmico espectral, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$S_a = \frac{V/M}{\alpha_1} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$S_d = \Delta \cdot \alpha_2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\alpha_1 = \frac{(\sum m_i \phi_i)^2}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{FPM} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$FPM = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Los factores α_1 y α_2 corresponden al factor de participación de masa, ó fracción del peso del edificio en el primer modo de vibración, y al inverso del factor de participación modal FPM , ó fracción de la altura del edificio para el punto de observación del desplazamiento. Los términos m_i y ϕ_i corresponden a la masa total y desplazamiento en cada uno de los niveles de la edificación para el primer modo de vibración.

Las curvas de capacidad en formato Sa-Sd pueden representarse de manera conveniente utilizando una serie de coeficientes y unas funciones características que dependen de los siguientes factores (HAZUS, 2003):

- Cs, Coeficiente de esfuerzo sísmico
- Te, periodo estructural elástico
- α_1 , fracción del peso efectivo en el “pushover”
- α_2 , fracción de la altura total en el punto de observación del desplazamiento
- γ , relación entre el esfuerzo de fluencia y el de diseño
- λ , relación entre el esfuerzo último y el de fluencia
- μ , relación entre el desplazamiento último y λ veces el desplazamiento de fluencia

La Figura 2-3 ilustra la curva de capacidad en términos de los anteriores parámetros.

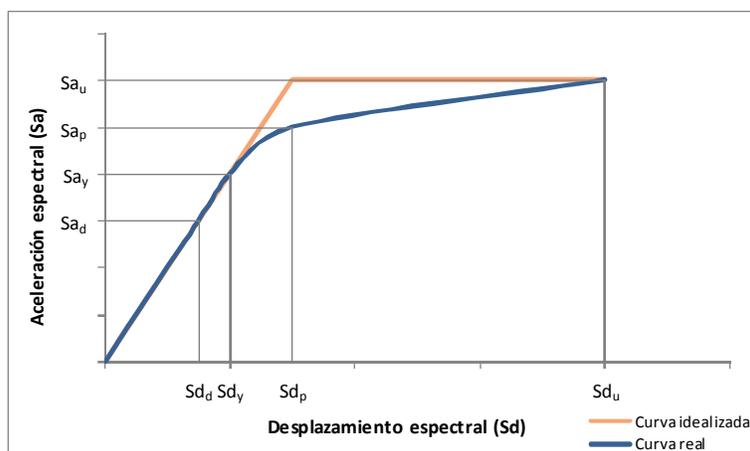


Figura 2-3
Curva de capacidad y curva en formato Sa-Sd

2.1.3 Definición de niveles de daño

Para generar la función de vulnerabilidad a partir de la curva de capacidad en formato Sa-Sd es necesario definir una serie de niveles de daño. Se propone asignar niveles de daño para los puntos correspondientes a los estados de comportamiento siguientes (ver Figura 2-3 arriba):

- Punto de fluencia del sistema (Sd_y, Sa_y): daños nulos
- Punto de Comportamiento plástico (Sd_p, Sa_p): daños hasta del 20% típicamente
- Punto de comportamiento último (Sd_u, Sa_u): daños cercanos al 80% y el 100% típicamente

La asignación de niveles de daño en estos puntos permite la conformación de la función de vulnerabilidad en términos del daño esperado y de la desviación estándar. El ajuste final de la curva se realiza cambiando las curvaturas correspondientes a los dos tramos de curvas controlados en los anteriores puntos fijos.

La Figura 2-4 ilustra un ejemplo de definición de la función de vulnerabilidad con esta metodología.

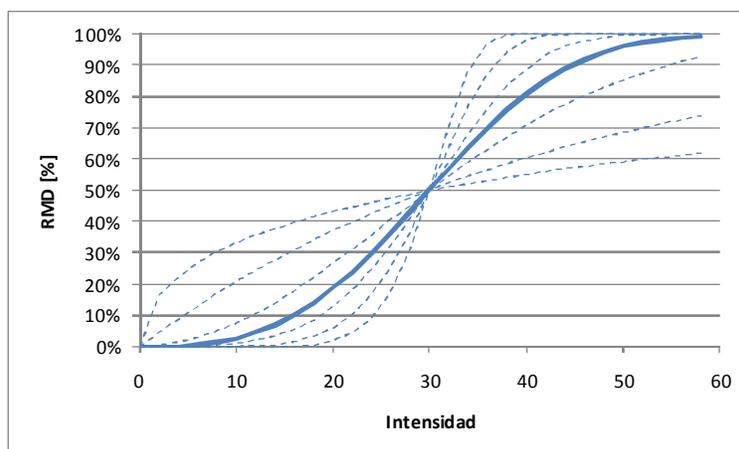


Figura 2-4
Grupo de curvas con diferentes curvaturas

2.1.4 Estimación de la demanda inelástica

La estimación de la demanda inelástica de la edificación consiste en calcular bien ya sea la deformación horizontal piso a piso, la deriva máxima piso a piso o bien la aceleración máxima horizontal de respuesta de la edificación. Existen varios métodos propuestos para el cálculo aproximado de la demanda inelástica de edificaciones tales como el explicado en el ATC-40 (1996) el cual es utilizado por sistemas como el HAZUS (2003) y otros. En la presente metodología se utiliza el método de Miranda (1999) que se explica brevemente a continuación.

Para un valor dado de intensidad sísmica, γ_i , el valor esperado de β se puede calcular empleando la siguiente expresión (Miranda, 1999; Ordaz, 2000).

$$E(\beta | \gamma_i) = 1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right] \quad (\text{Ec. 6})$$

Para efectos de los países de América Central, se han definido una serie de tipos constructivos característicos los cuales representan el comportamiento esperado de las construcciones más frecuentes que pueden encontrarse en los diferentes tipos de construcciones de estos países.

Las edificaciones típicas de varios pisos incluyen construcciones en varios sistemas estructurales como son pórticos resistentes a momentos, sistemas combinados o duales, sistemas de edificaciones con muros estructurales, sistemas prefabricados y otros y en general comparten la característica de que el daño principal que puede llegar a ocurrir en el mismo depende principalmente del la deformación relativa piso a piso.

El nivel de daño para edificaciones típicas se puede estimar tomando la deriva de entrepiso como parámetro de referencia, el cual se calcula como el desplazamiento relativo entre dos niveles contiguos, dividido entre la altura del piso. Existe un número importante de estudios que concluyen que dicho parámetro de la respuesta estructural presenta la mejor correlación con el daño estructural registrado. (Bertero et al., 1991; Priestley, 1997; Sozen, 1997). Contrario a la mayoría de metodologías empleadas que basan la estimación del daño en la Intensidad de Mercalli Modificada, el método que se emplea está basado en un parámetro que presenta una muy buena correlación con el daño producido por la acción de sismos intensos.

A partir de la aceleración espectral es posible determinar la máxima distorsión de entrepiso (demanda inelástica) con la siguiente expresión:

$$\gamma_i = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \left(\eta N^\rho \right)^2}{4 \pi^2 N h} S_a (T) \quad (\text{Ec. 7})$$

β_1 es la relación entre el máximo desplazamiento lateral en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral, considerando un modelo de comportamiento elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos de la estructura. Se calcula a partir de la solución de la ecuación diferencial que describe el comportamiento de un sistema acoplado, compuesto por una viga continua de cortante y otra de flexión, sometido a carga lateral que varía con la altura. El grado de participación de las deformaciones laterales de corte y de flexión en el sistema es función de un parámetro α que depende del sistema estructural. Por ejemplo, en un edificio flexible construido a base de pórticos de concreto (sin muros estructurales ni arriostramiento) dominan las deformaciones laterales de corte, mientras que en una construcción con muros de concreto reforzado, las deformaciones de flexión son las predominantes. Mayor información sobre cómo estimar este parámetro se encuentra en Miranda (1997), donde se presentan resultados en la estimación de desplazamientos laterales máximos utilizando este enfoque.

β_2 describe la relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura, que se define como el máximo desplazamiento lateral en la azotea dividido por la altura total. β_2 depende del grado de participación de las deformaciones laterales de corte y flexión, y del tipo estructural. Tiene en cuenta el hecho que en general las deformaciones laterales durante un sismo intenso no se distribuyen uniformemente con la altura de la edificación, pero que hay una tendencia a concentrar grandes deformaciones de entrepiso en algunos niveles (ver Miranda, 1997).

β_3 expresa la relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo de comportamiento inelástico, y el desplazamiento máximo del modelo elástico lineal. Este factor depende de la demanda de ductilidad al desplazamiento, el periodo fundamental de vibración de la estructura y el tipo de suelo que la soporta. Se calcula con funciones que han sido calibradas con estudios estadísticos de relaciones entre el máximo desplazamiento

lateral de osciladores de un grado de libertad con comportamiento inelástico, y sus contrapartes en comportamiento elástico. Dichas calibraciones han sido realizadas para osciladores sometidos a cientos de acelerogramas registrados en diferentes tipos de suelo durante más de 25 sismos ocurridos a nivel mundial. Para estructuras sobre suelos blandos, β_3 no sólo depende del periodo fundamental de vibración de la estructura sino más bien de la relación entre este y el periodo dominante del suelo. Para más información sobre este parámetro véase Miranda 1991; Miranda 1993; y Miranda 1997. La demanda de ductilidad global de la estructura se estima con la aceleración espectral asociada al periodo de vibración de la estructura, la resistencia ante cargas laterales de la misma, y el factor de reducción de las cargas aplicadas. La resistencia lateral de la estructura depende de la ubicación y la edad de la misma, lo que hace posible clasificar las estructuras en términos de normativas y códigos de construcción vigentes en el momento de ser construidas.

β_4 es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico. Este factor tiene en cuenta que la distribución de la carga lateral con la altura es diferente en el modelo elástico y en el inelástico. En el caso de comportamiento inelástico se produce una gran concentración de fuerza. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la demanda de ductilidad al desplazamiento. Para más información al respecto véase Miranda (1997).

η y ρ son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos, N :

$$T = \eta N^\rho \quad (\text{Ec. 8})$$

Estos factores dependen de la ubicación de la estructura, el tipo estructural, el tipo de suelo y el año de construcción. Tienen en cuenta el hecho de que la rigidez lateral de las estructuras localizadas en zonas de alta sismicidad es mayor que el de estructuras ubicadas en zonas de baja sismicidad. También consideran que las estructuras construidas sobre suelos blandos son más flexibles que las construidas en suelos firmes debido a la flexibilidad de la cimentación. Estos parámetros han sido calibrados con modelos analíticos, resultados experimentales y diferentes consideraciones siguiendo los requerimientos que se presentan en las normas. Debe anotarse que se asigna un nivel de incertidumbre en la determinación del período fundamental de la estructura T , y es tomada en cuenta dentro del análisis.

h es la altura de cada piso de la estructura, que depende del tipo estructural, la ubicación geográfica y la fecha de construcción.

$S_a(T)$ es la aceleración espectral, que depende del periodo fundamental de vibración, el amortiguamiento de la estructura y la amenaza sísmica en el sitio. Se obtiene directamente a partir del archivo tipo AME y con el periodo estructural estimado.

Una vez se determina la máxima distorsión de entrepiso de la estructura, su vulnerabilidad puede ser incrementada por varios factores. Algunos de estos factores son los siguientes:

irregularidades en planta o en altura, golpeteo con edificaciones vecinas, daños previos no reparados, columnas cortas, etc.

El valor esperado del daño de la estructura, dado un valor de intensidad sísmica cualquiera (en particular aceleración máxima del terreno o distorsión máxima de entrepiso calculada a partir de la ecuación Ec. 2), se calcula de la siguiente forma:

$$E(\beta | \gamma_i) = K_1 K_2 K_3 K_4 \left(1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right] \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

donde β es la pérdida bruta, γ_0 y ε son parámetros de vulnerabilidad estructural que dependen del sistema estructural y la fecha de construcción, y $E(\)$ es el valor esperado de la variable. Nótese que por definición, β es la proporción entre el costo de reparación y el costo total, y su valor está entre 0 y 1.

Alternativamente el valor esperado del daño se calcula como:

$$E(\beta | \gamma_i) = K_1 K_2 K_3 K_4 (F(\gamma_i)) \quad (\text{Ec. 10})$$

Cuando el formato de la función de vulnerabilidad este dado como una tabla de valores, $F(\gamma)$.

Los parámetros K_1, K_2, K_3, K_4 se definen de acuerdo con lo siguiente:

K_1 = factor de modificación por irregularidades en planta

K_2 = factor de modificación por irregularidades en altura

K_3 = factor de modificación por golpeteo con edificaciones vecinas

K_4 = factor de modificación por daños previos no reparados, columnas cortas, otros.

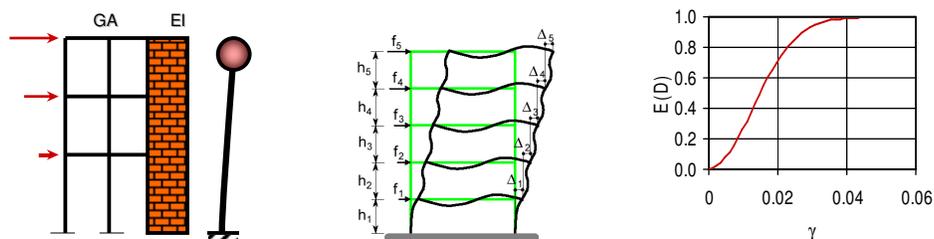


Figura 2-5
Procedimiento de cálculo de las curvas de vulnerabilidad

2.1.5 Modificaciones para obtener funciones de vulnerabilidad

De acuerdo con lo planteado anteriormente, se hace necesario modificar o transformar el eje de las abscisas de las funciones de vulnerabilidad con el fin de compatibilizar el parámetro de intensidad con el dado por la evaluación de amenaza (usualmente en términos de respuesta elástica).

Dicha conversión consiste en transformar el eje de las abscisas de las funciones de vulnerabilidad por un factor, de tal manera que estas queden expresadas en términos de la demanda elástica obtenida del mapa de amenaza disponible, y el resultado sería el equivalente que si se introduce la respuesta inelástica de la misma construcción.

También deben poderse realizar modificaciones de los ejes en la demanda por ejemplo cuando se desea considerar las pérdidas en los contenidos con distribuciones de pérdidas diferentes. En ese caso es necesario hacer ponderaciones del daño con respecto a los valores globales de las estructuras y de los contenidos respectivamente para definir una función de vulnerabilidad única.

La Figura 2-6 presenta varios ejemplos en una misma función de vulnerabilidad para un edificio determinado, se representan en términos de diferentes variables, todas ellas equivalentes.

| | | | | |
|----------------------------|--|--------|------------------------------|----------|
| Edificación: | Pórticos de concreto estructural (5 pisos) | | | |
| Parámetros básicos: | Altura: | 15.2 m | Te: | 0.75 seg |
| | Cs: | 0.13 | γ: | 1.25 |
| | μ: | 5.3 | λ: | 3 |

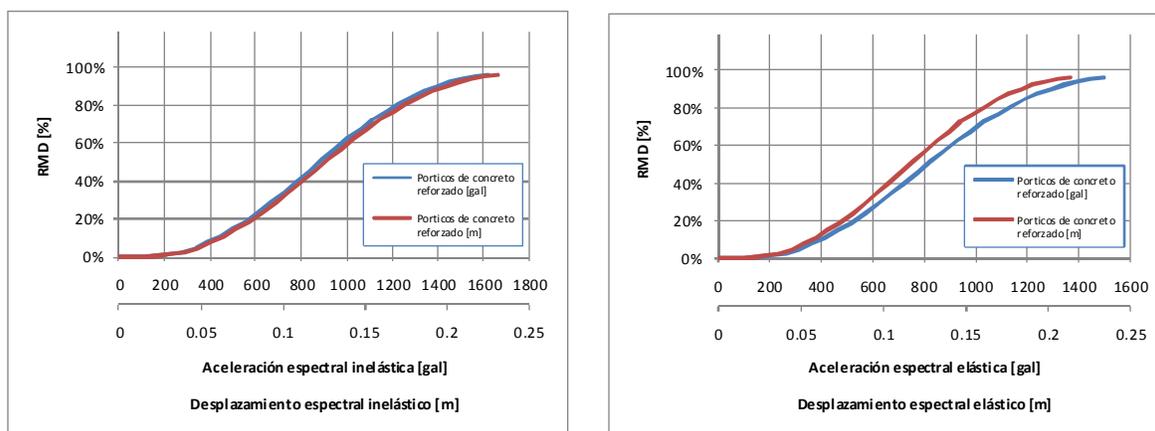
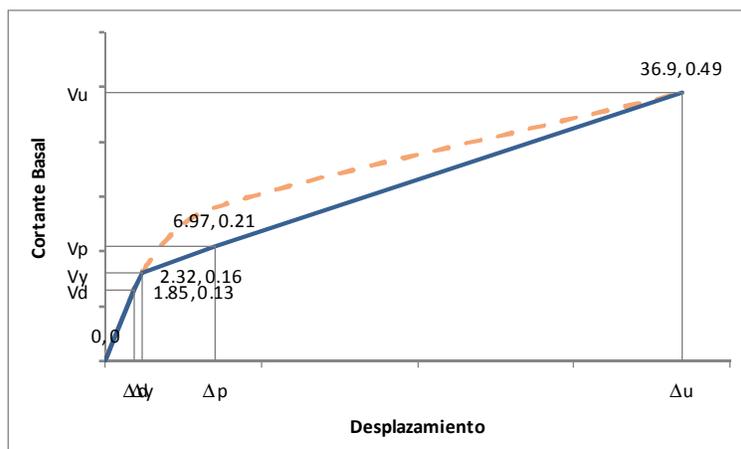


Figura 2-6
Función de vulnerabilidad para diferentes variables

2.1.6 Desviación estándar del daño

En forma complementaria a la estimación del valor esperado del daño como función del parámetro de intensidad de entrada, se debe plantear la desviación estándar de esta función. Para efectos de esta estimación se propone la utilización de la función que se presenta en la Figura 2-7, la cual relaciona la desviación estándar del daño con la misma medida de intensidad planteada anteriormente.

La densidad de probabilidades del daño se considera de tipo Beta y está dada por la siguiente ecuación:

$$p_{\beta|\gamma_i}(\beta) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \beta^{a-1} (1-\beta)^{b-1} \quad (\text{Ec. 11})$$

donde: a y b son parámetros que pueden calcularse a partir de la media y el coeficiente de variación del daño, $C(\beta)$, de la siguiente manera

$$a = \frac{1 - E(\beta|\gamma_i) - E(\beta|\gamma_i) C^2(\beta)}{C^2(\beta)} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$b = a \left[\frac{1 - E(\beta|\gamma_i)}{E(\beta|\gamma_i)} \right] \quad (\text{Ec. 13})$$

$C^2(\beta)$ se calcula como

$$C^2(\beta) = \frac{\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i)}{E(\beta|\gamma_i)} \quad (\text{Ec. 14})$$

donde $\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i)$ es la varianza de la pérdida.

Existe poca información para determinar la varianza (o el coeficiente de variación) del daño bruto. Se sabe, sin embargo, que cuando el valor esperado de la pérdida es nulo la dispersión también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es total, la dispersión es también nula. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida.

Para fijar la variación de la varianza de la pérdida se ha utilizado la expresión de la distribución de probabilidad asignada en el estudio clásico del informe ATC-13 (ATC-13, 1985) cuya varianza tiene la siguiente forma funcional:

$$\sigma_{\beta}^2(\beta|\gamma_i) = Q \left(E(\beta|\gamma_i) \right)^{r-1} \left(1 - E(\beta|\gamma_i) \right)^{s-1} \quad (\text{Ec. 15})$$

donde

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1} (1 - D_0)^{s-1}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2 \quad (\text{Ec. 17})$$

V_{max} , D_0 y r son parámetros que dependen del tipo estructural. V_{max} es la varianza máxima, D_0 es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima y r ha sido tomado igual a tres.

Una vez determinados el valor esperado y la varianza de la pérdida queda completamente definida la distribución de probabilidades del daño bruto dado un valor de intensidad sísmica.

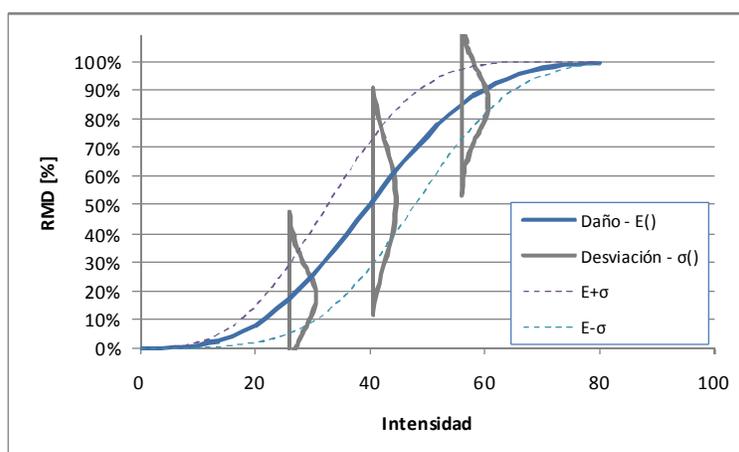


Figura 2-7
Desviación estándar típica del daño

2.2 Vulnerabilidad ante huracanes (vientos y mareas)

2.2.1 Introducción

Los daños ocasionados por los vientos fuertes y la marea ocasionada por un huracán rara vez son reportados en los estudios de evaluación de daños que se realizan. Los reportes realizados en la mayoría de los casos no establecen una correlación entre los daños y los vientos que los causaron. Así, las experiencias de huracanes en las zonas de análisis no se documentan de manera adecuada, con lo cual se dificulta la utilización de estas experiencias para descifrar el comportamiento de estos fenómenos y mejorar la preparación para los futuros eventos.

En los reportes de efectos y daños de este tipo de eventos casi nunca se hace referencia a la variación espacial y temporal del campo de vientos y de manera intuitiva todos los daños son asignados a la velocidad máxima sostenida con la que se caracterizó al huracán. Un ejemplo al respecto es el del huracán Gilbert (septiembre de 1988) que fue catalogado como el huracán del siglo. Así pues, muchos de los extensos daños que causó en el sureste y el noreste de México quedan en la memoria de la sociedad como cosas que muy

probablemente no se volverán a repetir en el transcurso de una o varias generaciones. Sin embargo, grandes extensiones dañadas fueron afectadas por vientos equivalentes apenas a los de un huracán de categoría 1, los que se pueden repetir frecuentemente en la vida de una misma persona. Por tal motivo es importante establecer, así sea en forma aproximada, qué vientos producen qué tipo de daños.

La modelación del daño ante vientos huracanados se establece mediante funciones de vulnerabilidad entre la velocidad de viento pico para ráfagas de 5 segundos y la Relación Media de Daño, RMD, para las edificaciones, los contenidos y la eventual pérdida de funcionalidad. Para la evaluación de la vulnerabilidad de la edificación ante vientos fuertes se requiere entonces información relativa al sistema estructural, elementos de fachada, tipo de cubierta, el tipo de acabados, materiales y conexiones susceptibles a sufrir daño.

El viento puede tener tanto flujo laminar como turbulento, por lo que sus efectos sobre los componentes de infraestructura pueden ser muy diferentes dependiendo de las características geométricas de éstas y en particular de su tamaño y geometría.

Una estructura dentro de un campo de viento está sujeta a fuerzas aerodinámicas, las cuales se distribuyen sobre y a través de la estructura dependiendo de sus características. Estas fuerzas aerodinámicas ocasionan presiones y succiones sobre los elementos que recubren la estructura. Estos elementos transfieren las fuerzas a los elementos estructurales resistentes. El viento genera una presión directa sobre la fachada anterior. Por otro lado las ráfagas de viento se desvían por ambos costados y por el techo, ocasionando fuerzas de succión en el techo, las dos paredes laterales y en la fachada posterior.

Si el viento logra romper las ventanas y puertas de la fachada anterior, entrará violentamente al interior de la edificación, incrementando las fuerzas de succión en las paredes y techo del inmueble, ocasionando que éste se dañe de manera severa con posibilidades que se llegue al colapso o destrucción total de la estructura.

Los daños que típicamente presenta la infraestructura afectada por las altas velocidades del viento de los huracanes, son los siguientes:

- Caída de recubrimientos ligeros en edificios.
- Rotura de ventanas.
- Daños a los grandes vitrales en la fachada de construcciones.
- Pérdida de techos ligeros y domos, lo cual ocasiona daños al interior de las construcciones.
- Daño a plafones y muros de material ligero en interiores.
- Colapso de techos contruidos con madera y palma (palapas), lo cual ocasiona el daño a contenidos.
- Daño importante en elementos de recubrimiento ligeros en lámina para estructuras de acero
- Colapso de anuncios comerciales, los cuales a su vez afectan construcciones cercanas.
- Socavación de cimentaciones.

2.2.2 Efectos del viento sobre las estructuras

El viento afecta de diferentes maneras las estructuras que encuentra a su paso. La velocidad del viento se encarga en general de producir una presión directa sobre la cara expuesta de la estructura la cual se traduce en un empuje medio. Este genera tanto presión como succión y actúa directamente sobre los elementos de fachada, los cuales trasladan los empujes hasta los elementos estructurales principales. También se generan empujes dinámicos en la dirección del viento que consisten en fuerzas paralelas al flujo causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural. es decir, que en una estructura pueden actuar ráfagas de viento en forma alternada con diferentes duraciones provocando cargas dinámicas. Aparecen también vibraciones transversales al flujo y fenómenos de inestabilidad dinámica, todo lo cual debe estudiarse con miras a comprender en forma global los efectos del viento sobre una construcción determinada. El viento puede producir también fuerzas de arrastre, fenómenos de inestabilidad aeroelástica como en el caso de puentes colgantes muy flexibles.

La velocidad del viento aumenta con la altura a partir del nivel del terreno. La variación con la que se incrementa depende no sólo de las condiciones de rugosidad del terreno circundante, sino también de las ráfagas del viento, es decir, las velocidades asociadas a lapsos definidos de tiempo. El lapso promedio es el intervalo que se selecciona para determinar la velocidad máxima promedio. Conforme ese intervalo disminuye, la velocidad máxima media correspondiente aumenta. Las velocidades de las ráfagas suceden durante lapsos promedio del orden de 3 a 15 segundos y se relacionan con el tamaño de la estructura. Las construcciones esbeltas y flexibles se ven más afectadas por las ráfagas de corta duración, mientras que las bajas y rígidas son más bien afectadas por las velocidades medias asociadas al flujo.

El viento incidente sobre cualquier superficie provoca una presión (fuerza por unidad de área). Si se quiere evaluar la fuerza total que el viento ejerce sobre una estructura o un elemento, se deben sumar las fuerzas individuales sobre cada una de sus superficies. Cada una de estas fuerzas se calcula multiplicando la presión debida al viento por el área afectada:

$$\text{Fuerza} = \text{Presión} \times \text{Área} \times \text{Factor de forma} \quad (\text{Ec. 18})$$

La fuerza que ejerce el viento sobre la estructura depende de la presión, de la proyección del área perpendicular a la dirección del viento y del factor de forma de la estructura. A su vez, la presión del viento depende de la velocidad máxima del mismo, de la altura sobre el nivel del terreno y de la densidad del aire que es función de la altura sobre el nivel del mar.

Las funciones de vulnerabilidad para viento se expresan normalmente en términos de la RMD de la estructura para diferentes niveles de velocidad de viento. Por esta razón en el análisis de la función de vulnerabilidad deben tenerse en cuenta las anteriores variables al

igual que la capacidad de los elementos de fachada y de cubierta y de la estructura misma para resistir las fuerzas impuestas.

2.2.3 Funciones de vulnerabilidad propuestas para viento

2.2.3.1 Forma básica de las funciones de vulnerabilidad

El procedimiento para obtener las funciones de vulnerabilidad por viento para las diferentes clasificaciones de la infraestructura expuesta, consiste en identificar para diferentes velocidades de viento el porcentaje de daño esperado en el inmueble a evaluar.

La estimación de las funciones de vulnerabilidad se ha realizado a través de:

- Modelos matemáticos.
- Reportes y artículos de investigaciones realizadas en este tema a nivel mundial.
- Análisis estadístico de daños que se han reportado después del paso de un huracán.

Las funciones de vulnerabilidad propuestas en este estudio se representan por medio de la siguiente expresión:

$$E[\beta] = E \left[1 - 0.5 \left(\frac{V}{\gamma} \right)^\rho \right] \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde: V : velocidad del viento en km/hr
 ρ y γ : son los parámetros que definen la forma de las funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos estructurales.

En la Figura 2-8 se presenta una propuesta de las funciones de vulnerabilidad para algunos tipos estructurales típicos.

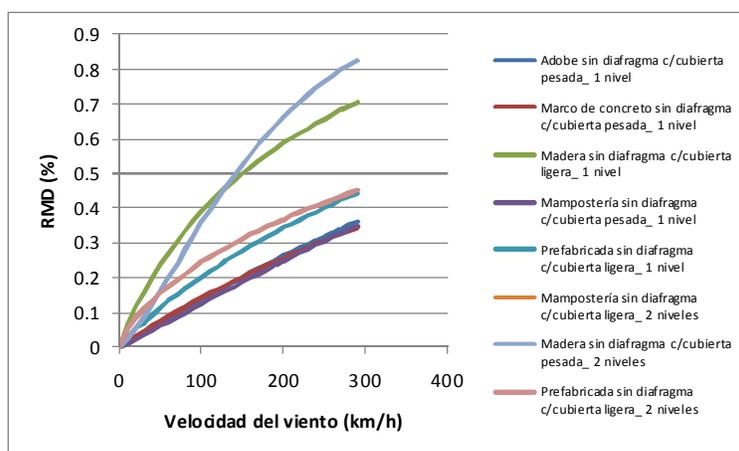


Figura 2-8
 Funciones de vulnerabilidad para algunos tipos estructurales típicos.

Para fines del modelo de estimación de pérdidas en la plataforma CAPRA, estas funciones de vulnerabilidad requieren contar con un modelo de incertidumbre apropiado.

2.2.3.2 *Función de probabilidad de daño*

Las relaciones de vulnerabilidad no son deterministas, por lo que dada una intensidad, el daño bruto β es una variable aleatoria cuyo valor esperado (el valor medio) está dado por la expresión 19. La densidad de probabilidades del daño se considera de tipo Beta y está dada las mismas relaciones dadas para vulnerabilidad sísmica (ver numeral 2.1.6).

2.3 Inundaciones (Marea, Inundación, Tsunami)

2.3.1 *Generalidades*

La función de vulnerabilidad ante una inundación se debe desarrollar para los diferentes tipos constructivos característicos, en función de dos parámetros principales: la profundidad de las aguas de inundación y la velocidad máxima del flujo.

Cuando la inundación se produce por efectos de un flujo torrencial de alta velocidad, es evidente que, adicionalmente a los daños asociados al incremento en el nivel del agua, se generan una serie de daños asociados a la velocidad máxima del flujo de agua, específicamente en las zonas en que el flujo adquiere alta velocidad. Estas áreas están clasificadas como áreas de amenaza por tránsito de flujos torrenciales y para su análisis se requiere de información de amenazas relacionada con la velocidad máxima del flujo. Las observaciones recientes, permiten establecer que, en general, en las áreas de alta velocidad de flujo el daño sobre la infraestructura expuesta es prácticamente total.

Las funciones de vulnerabilidad o daño por inundación se construyen para construcciones con diferentes usos. Estas funciones no 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.

En el Anexo ERN-CAPRA-T1-5-4 se presentan algunos casos específicos en que investigadores proponen funciones de vulnerabilidad para el caso de inundaciones en situaciones específicas de algunos países latinoamericanos y europeos. Estas referencias ilustran la gran variedad de tipos de curvas propuestas por diferentes investigadores y los diferentes enfoques que se le pueden dar al problema.

2.3.2 Funciones propuestas

En este numeral se presentan los resultados de la aplicación de una metodología desarrollada para obtener funciones de vulnerabilidad por inundación a los contenidos y estructuras. Los criterios de esta metodología se basan en forma parcial en las propuestas previas explicadas en el Anexo ERN-CAPRA-T1-5-4. Se proponen diferentes configuraciones y valores de los contenidos y elementos no estructurales para diferentes usos de inmuebles como hoteles, casas habitación, oficinas, y bodegas, entre otros. En la calificación de los valores y de los niveles de daño participaron varios expertos y cada uno propuso valores de daño para los objetos en todos los casos analizados. Los resultados finales se proponen para casas de un solo piso y se utilizan para el efecto valores promedio para su análisis.

La Figura 2-9 presenta algunos ejemplos de los resultados obtenidos en el análisis anteriormente descrito para algunos tipos de estructuras. Las curvas obtenidas con esta metodología corresponden a valores medios y contemplan el daño tanto para contenidos como para estructura. La expresión que representa el daño para estructuras de un nivel es una función polinomial de tercer grado que inicia en cero, como la presentada en la siguiente ecuación.

$$\delta_{NI}(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t \quad (\text{Ec. 20})$$

donde:

t = Profundidad de inundación para el sitio analizado

a, b, c = Constantes que definen el ajuste de la función a los valores promedio

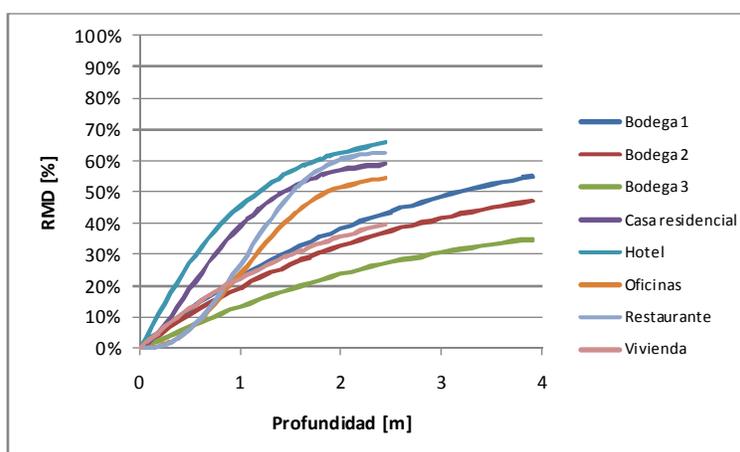


Figura 2-9
Ejemplos de funciones de vulnerabilidad a inundación, incluye el daño a la estructura y a los contenidos

Para varios niveles se extrapoló la función de daño de un nivel, suponiendo que los valores y la densidad de contenidos se mantendrán constantes con el número de niveles. De esta forma se puede plantear una expresión general para cualquier número de niveles y para cualquier profundidad de inundación, la cual se muestra en la siguiente ecuación.

$$\delta = \frac{\delta_{N1\max} \cdot (N_{st} - 1) + \delta_{N1}(\tilde{t})}{N_T} \quad (\text{Ec. 21})$$

donde: $\delta_{N1\max}$ = Daño máximo de la función para un nivel para la profundidad máxima
 $\delta_{N1}(\tilde{t})$ = Daño para una profundidad relativo sobre los niveles completamente inundados

$\tilde{t} = t - h_N \cdot (N_{st} - 1)$, profundidad relativa sobre los niveles inundados

h_N = Altura de entrespiso

$N_{st} = Ent_{SUP}(t/h_N)$, nivel donde se encuentra la superficie de inundación del agua, definido como el valor entero superior de la relación indicada.

N_T = Es el número total de niveles

Con la aplicación de la ecuación anterior se pueden obtener las curvas de daño para cualquier número de niveles en función de las curvas obtenidas para un nivel. En la Figura 2-10 se muestra un ejemplo de la aplicación de esta ecuación.

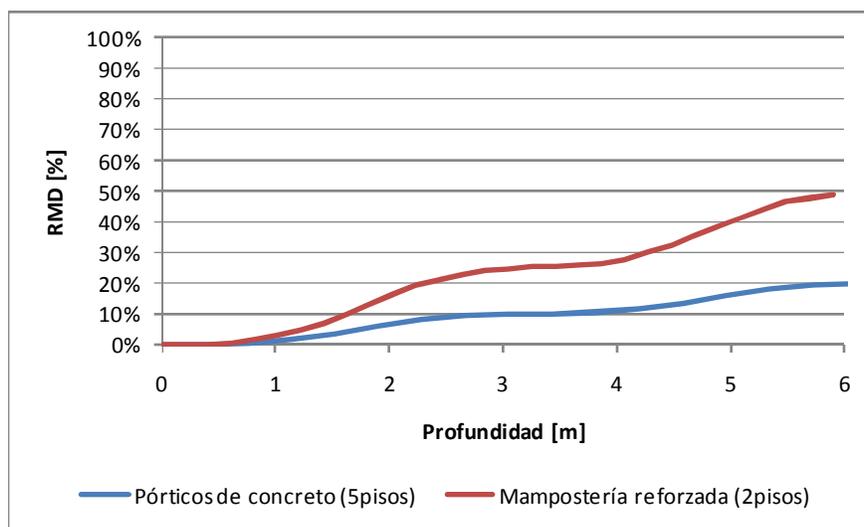


Figura 2-10
Ejemplos de funciones de vulnerabilidad ante las inundaciones para edificios de uno o varios niveles.

2.4 Vulnerabilidad estructural ante deslizamientos

2.4.1 Vulnerabilidad de las construcciones ante deslizamientos

Tal se explicó en detalle en el capítulo de amenaza, la amenaza de deslizamiento se calcula únicamente con base en dos mecanismos detonantes principales que son el movimiento del terreno producido por terremotos intensos, y la profundidad del nivel freático generado por las lluvias intensas. Para esto es necesario disponer de un modelo general que represente en forma aproximada las condiciones actuales de estabilidad en la zona de estudio de manera que al introducir la amenaza “catastrófica” a evaluar (bien sea detonada por sismo o lluvia intensa), se genere un escenario para evaluación asociado al mecanismo detonante seleccionado. Cada escenario que se analice estará asociado entonces a una frecuencia de ocurrencia definida de acuerdo con la frecuencia del evento detonante seleccionado para cada análisis. La presencia de dicho factor detonante generará mediante el modelo de amenazas correspondiente, un mapa general con la distribución geográfica de los valores de factores de inseguridad (el inverso de los factores de seguridad mínimos) que resulten del análisis punto a punto en el sistema de información geográfico.

El parámetro de intensidad propuesto para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos corresponde al inverso del factor de seguridad, el cual variará normalmente entre 0 y 2. Los valores del parámetro de intensidad mayores que 1 corresponderán a situaciones de alta susceptibilidad a deslizamientos (factores de seguridad inferiores a la unidad) mientras que los valores inferiores a 1 representarán situaciones de relativa seguridad, o sea bajo nivel de daños potenciales.

La función de vulnerabilidad ante deslizamientos para diferentes tipos constructivos se define como curvas que relacionan la Relación Media de Daño, RMD, con la susceptibilidad al deslizamiento medido mediante el factor de inseguridad calculado. Se generará así un mapa de riesgo de deslizamiento asociado a la frecuencia de ocurrencia del evento detonante seleccionado.

En general se considerará que cualquier elemento expuesto localizado en un sitio de alta susceptibilidad al deslizamiento (bajo factor de seguridad, inferior a 1) sufrirá un daño considerable, mientras que un activo localizado en un sitio de baja susceptibilidad (alto factor de seguridad, normalmente por encima de 1.5 o más) sufrirá un daño nulo o muy bajo. Para este caso no se considerará en general las pérdidas asociadas a contenidos por cuanto en general dichos elementos son rescatables en los eventos que no presenten altas velocidades de falla y que hayan tenido en general avisos previos de inestabilidad.

La forma característica para las funciones de vulnerabilidad ante deslizamiento se representa mediante la siguiente ecuación:

$$E(\beta | \gamma_i) = 1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right] \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde γ corresponde al factor de inseguridad para un daño del 50% y β es la pérdida.

La vulnerabilidad básica asociada a los deslizamientos se califica mediante curvas características como la de la Figura 2-11.

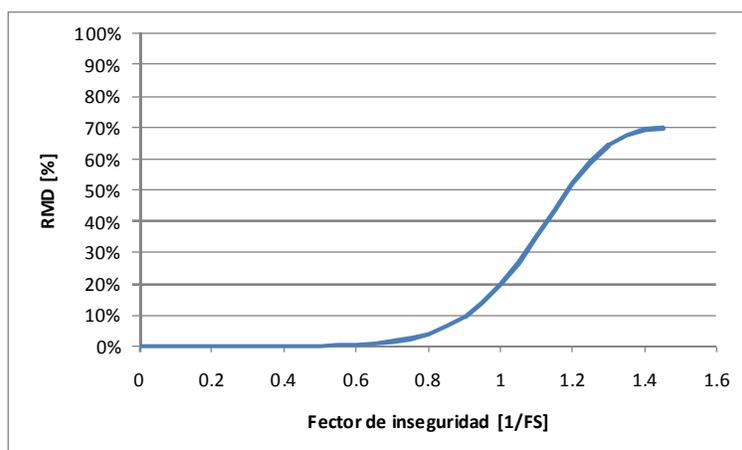


Figura 2-11
Función de vulnerabilidad característica para deslizamientos

La calificación de la varianza asociada a las pérdidas esperadas se realiza de manera equivalente a la explicada anteriormente para el caso de sismo o de inundación.

2.4.2 Vulnerabilidad de contenidos en casos de deslizamientos

Las funciones de vulnerabilidad de los contenidos ante la ocurrencia de deslizamientos depende de las siguientes variables:

- Daños directos en la construcción
- Velocidad misma del deslizamiento

En particular, la velocidad del deslizamiento resulta de difícil cuantificación por lo cual la estimación de las pérdidas en los contenidos ante fenómenos de deslizamientos resulta bastante incierta. Para el presente caso, el usuario asignará la forma de función de vulnerabilidad que más se adecue a la zona y tipo de construcciones que está analizando, y podrá incluir los contenidos en forma proporcional a la pérdida directa según lo considere necesario o conveniente.

2.5 Vulnerabilidad ante erupciones volcánicas

Para la definición de funciones de vulnerabilidad se hace diferencia entre el fenómeno de caída de ceniza y los demás tipos de productos (flujos piroclásticos y flujos de lava) los

cuales se representan mediante mapas de amenaza con cierta probabilidad de ocurrencia, pero cuya zona de afectación implica directamente la pérdida total del bien expuesto.

Para el caso de caída de ceniza, la intensidad seleccionada para cuantificar la amenaza es el espesor total de ceniza esperada para el evento que se está analizando. Este será el parámetro clave para la evaluación del daño esperado que se obtiene de una función de vulnerabilidad en la cual se relacionan estos dos parámetros. Las funciones de vulnerabilidad varían en este caso en función del tipo de edificación y del tipo de placa de cubierta.

En la Figura 2-12 se presentan en forma tentativa algunas funciones de vulnerabilidad para edificaciones menores con cubiertas inclinadas y tejas flexibles y para el caso de edificaciones menores con cubiertas planas conformadas por una placa de concreto o similar.

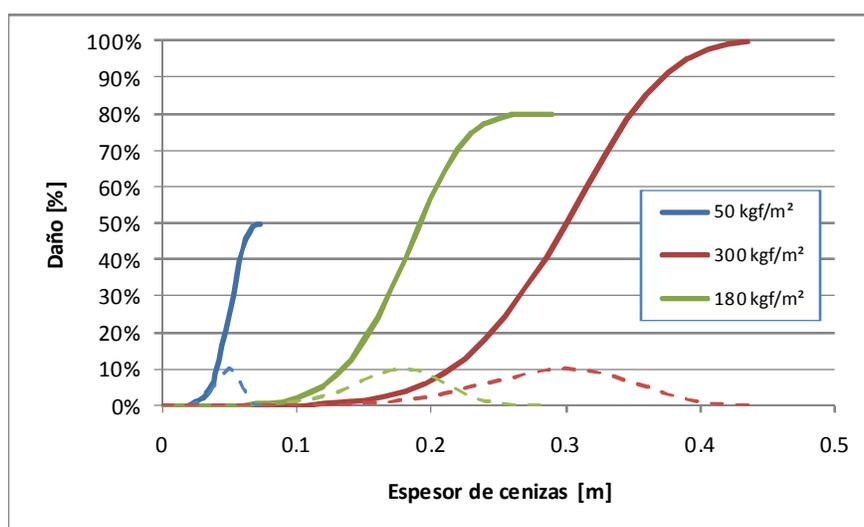


Figura 2-12
Funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de cubierta (carga de diseño)

Para productos volcánicos con alto poder destructivo como los flujos piroclásticos y los flujos de lava, las funciones de vulnerabilidad se modelan normalmente como una relación simple en la cual si el activo en estudio está localizado en una zona de alta probabilidad de impacto por cualquiera de los productos volcánicos amenazantes, entonces el daño se calificará como 1 (o sea el 100% del daño, o daño total), mientras que si el activo está por fuera del área de afectación el daño será nulo.

La Figura 2-13 presenta una función de vulnerabilidad característica para estas situaciones aplicable a cualquier tipo estructural.

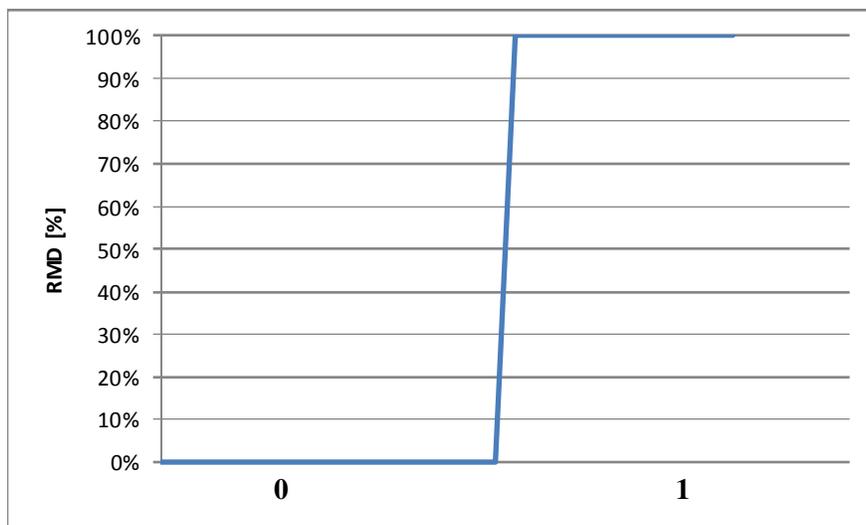


Figura 2-13
Función de vulnerabilidad

3 Vulnerabilidad humana ante eventos extremos

3.1 Sismos (movimiento del terreno)

3.1.1 *Introducción*

El análisis de riesgo permite realizar una estimación de la afectación a la población en términos de personas que de alguna u otra manera sufrirían algún tipo de afectación a sus viviendas, personas que sufrirían afectaciones físicas que requieren atención hospitalaria y personas que pudieran perder la vida luego de la ocurrencia del evento. Para realizar estos estimativos se plantean las funciones de vulnerabilidad humana, que de manera similar a las funciones de vulnerabilidad física, establecen el número de personas afectadas en función de algún parámetro de intensidad o del porcentaje de daño físico obtenido. Estas curvas se calibran el forma aproximada con estadísticas de eventos pasados.

Más allá de las pérdidas económicas que los sismos ocasionan es prioritario proteger a las personas tanto de sufrir accidentes como de morir durante estos eventos, labor que debe estar a cargo tanto por parte de los gobiernos como por parte de la sociedad civil y sus individuos. De esta manera, para escenarios de análisis de riesgo definidos, se adelanta la estimación del número de afectados, heridos y muertos teniendo en cuenta las características de los escenarios sísmicos de análisis y de los tipos estructurales que determinan la ocurrencia de este tipo de afectación según el daño esperado.

Debido a la combinación e interacción de varios factores dichas estimaciones presentan grandes incertidumbres. Se deben tener en cuenta no sólo los factores relacionados con la determinación del daño en los edificios sino también la distribución de la población y la hora de ocurrencia del evento sísmico entre otros factores de índole social, cultural y económico. Así pues se emplea una metodología aproximada que tiene en cuenta el número de heridos y muertos debido al colapso parcial o total de las edificaciones con base en factores de calificación que dependen del daño esperado y el tipo de edificio. Aspectos tales como la incidencia de la hora de ocurrencia del evento puede ser tenida en cuenta por el usuario mediante una asignación alternativa de ocupación en la base de datos de exposición.

Las funciones de vulnerabilidad humana se plantean en términos del número esperado de víctimas mortales medidas en porcentaje con respecto al nivel de ocupación del componente y su desviación estándar correspondiente para diferentes niveles de intensidad del evento.

A partir de la estimación del número esperado de víctimas potenciales es posible estimar diferentes medidas de impacto social del evento incluyendo los siguientes:

- Número de heridos: también depende de un gran número de variables difíciles de cuantificar. En general presenta una cierta correlación con el número de víctimas por lo cual se puede trabajar de esta manera. También se puede utilizar la función de vulnerabilidad humana, pero relacionada con el número esperado de heridos.
- Número de personas sin trabajo: corresponden al número de personas que ocupan los predios del tipo comercial, industrial e institucional y cuya afectación al sitio de trabajo es superior al 30% o al porcentaje que el usuario defina.
- Número de personas afectadas: corresponden en general al número de personas o familias que pierden sus viviendas y que requieren por lo tanto ser reubicadas en viviendas temporales o definitivas. Se evalúan con base en el número de edificaciones y su ocupación para el escenario planteado, para porcentajes de daño directo de la construcción o al porcentaje que el usuario defina.

Estos análisis deberá hacerlos el usuario de manera independiente de los análisis de riesgo principales para lo cual deberá realizar una serie de suposiciones y calibraciones. Para este análisis se utilizarán los resultados de la evaluación del número esperado de víctimas, edificación por edificación. En el Anexo ERN-CAPRA-T1-5-2 se presenta una metodología general propuesta para estimar el número esperado de víctimas y/o heridos después de un evento sísmico para diferentes tipos constructivos.

3.1.2 Metodología propuesta de cálculo

Para la estimación de las funciones de vulnerabilidad humana en términos del número esperado de víctimas, se propone la metodología que se explica a continuación.

De acuerdo con la información que se presenta en el Anexo ERN-CAPRA-T1-5-2, ante la ocurrencia de un evento sísmico, el número de víctimas, NVi , para el edificio i ubicado en la región afectada por un terremoto j se puede calcular como:

$$NVi = \text{Ocupantes } i \times \text{Atrapados } (\%) \times \text{Fatalidad } (\%) \times FC j \quad (\text{Ec. 23})$$

En esta expresión las variables planteadas tienen la siguiente definición:

- (a) Ocupantes: es el número total de personas que están presentes en el edificio i a la hora que ocurre el sismo j ; este dato se calcula para cada escenario con base en el área construida de la edificación y la densidad promedio de habitantes por metros cuadrado de construcción para cada región. Se podrán considerar escenarios de ocupación a diferentes horas del día. Este parámetro está definido en la bases de datos de exposición de cada uno de los elementos expuestos.

- (b) Atrapados: es el porcentaje de ocupantes del edificio que quedan atrapadas con vida debajo de los escombros de la edificación, este factor depende del tipo estructural. En la Figura 3-1 tomada del Anexo ERN-CAPRA-T1-5-2 se proponen algunos valores representativos para algunos tipos estructurales característicos.
- (c) Fatalidad: relación porcentual del número estimado de atrapados que eventualmente mueren por el colapso o los daños en la edificación. En la Tabla 3-1 tomada del Anexo ERN-CAPRA-T1-5-2 se proponen algunos valores representativos para algunos tipos estructurales característicos.
- (d) FC_j: es el Factor de Colapso, de cero a uno, obtenido a partir del cálculo del riesgo sísmico dado por un terremoto *j*; es una estimación de la probabilidad de colapso de la estructura a partir del daño de ésta. Para estimar la probabilidad de colapso de cualquier estructura se propone la siguiente función:

$$FC = 1 - 0.5^{\theta} \quad (\text{Ec. 24})$$

En donde

$$\theta = \left(\frac{\text{Pérdida del edificio} [\%]}{30\%} \right)^{3.5} \quad (\text{Ec. 25})$$

En la Figura 3-1 se muestra el cálculo de FC en función de la pérdida arrojada por el estudio de riesgo sísmico.

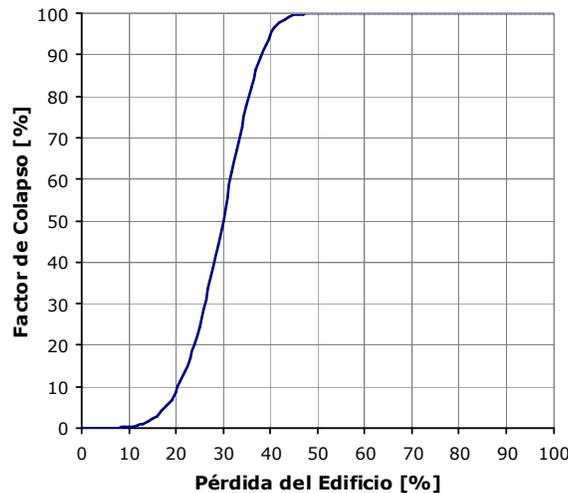


Figura 3-1

Cálculo del Factor de Colapso (FC) dada la pérdida obtenida del estudio de riesgo sísmico

Tabla 3-1
Factores de atrapados y fatalidad para diferentes tipos estructurales

| Cod | Descripcion | Atrapados [%] | Fatalidad [%] |
|------|--|---------------|---------------|
| A1 | Adobe / tapia | 2 | 10 |
| A2 | Bahareque | 5 | 15 |
| MS1 | Mampostería simple sin diafragma | 5 | 15 |
| MS2B | Mampostería simple con diafragma rígido - Bajos | 5 | 15 |
| MS2M | Mampostería simple con diafragma rígido - Medios | 5 | 15 |
| MSC1 | Mampostería semi confinada sin diafragma | 5 | 15 |
| MSC1 | Mampostería semi confinada con diafragma rígido | 5 | 15 |
| MC2B | Mampostería confinada sin diafragma - Bajos | 5 | 15 |
| MC3B | Mampostería confinada con diafragma - Bajos | 5 | 15 |
| MC3M | Mampostería confinada con diafragma - Medios | 5 | 15 |
| MR1L | Mampostería Reforzada diafragma flexible (madera, acero o prefab.) - Bajos | 5 | 15 |
| MR1M | Mampostería Reforzada diafragma flexible (madera, acero o prefab.) - Medios | 5 | 15 |
| MR2L | Mampostería Reforzada Diafragma "rígido" - Bajos | 5 | 15 |
| MR2M | Mampostería Reforzada Diafragma "rígido" - Medios | 5 | 15 |
| MR2H | Mampostería Reforzada Diafragma "rígido" - Altos | 5 | 15 |
| W1 | Madera Pórticos Livianos | 7 | 20 |
| W2 | Madera Comercial-Industrial | 7 | 20 |
| S1L | Acero-Pórticos Resistentes a Momento - Bajos | 2 | 10 |
| S1M | Acero-Pórticos Resistentes a Momento - Medios | 2 | 10 |
| S1H | Acero-Pórticos Resistentes a Momento - Altos | 2 | 10 |
| S2L | Acero-Pórticos arriostrados - Bajos | 7 | 25 |
| S2M | Acero-Pórticos arriostrados - Medios | 7 | 25 |
| S2H | Acero-Pórticos arriostrados - Altos | 7 | 25 |
| S3 | Marcos de acero livianos | 7 | 25 |
| S4L | Pórticos de acero con muros mampostería simple - Bajos | 30 | 50 |
| S4M | Pórticos de acero con muros mampostería simple - Medios | 30 | 50 |
| S4H | Pórticos de acero con muros mampostería simple - Altos | 30 | 50 |
| C1L | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados flexibles - Bajos | 30 | 50 |
| C1M | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados flexibles - Medios | 30 | 50 |
| C1H | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados flexibles - Altos | 30 | 50 |
| C2L | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados frágiles - Bajos | 30 | 50 |
| C2M | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados frágiles - Medios | 30 | 50 |
| C2H | Concreto-Pórticos resistentes a momentos Acabados frágiles - Altos | 30 | 50 |
| C3L | Concreto- Muros mampostería - Bajos | 30 | 50 |
| C3M | Concreto- Muros mampostería - Medios | 30 | 50 |
| C3H | Concreto- Muros mampostería - Altos | 30 | 50 |
| CP1 | Concreto prefabricado - Tilt-up | 10 | 15 |
| CP2L | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Bajos | 15 | 30 |
| CP2M | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Medios | 15 | 30 |
| CP2H | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Altos | 15 | 30 |
| CLC | Sistema losa-columna (Reticular celulado) | 50 | 50 |
| BAC | Bodega - cerchas sobre estructura metálica con cerramiento ligero | 7 | 20 |
| BAL | Bodega - cerchas sobre estructura metálica con cerramiento ligero | 7 | 20 |
| BCC | Bodega - cercha sobre columnas y vigas concreto con muros mampostería | 7 | 20 |
| BCL | Bodega - cercha sobre columnas y vigas concreto con muros mampostería | 7 | 20 |
| I | Iglesias en mampostería simple | 20 | 40 |

La metodología para el cálculo de funciones de vulnerabilidad humana en términos del número esperado de víctimas se resume en forma esquemática en la Figura 3-2.

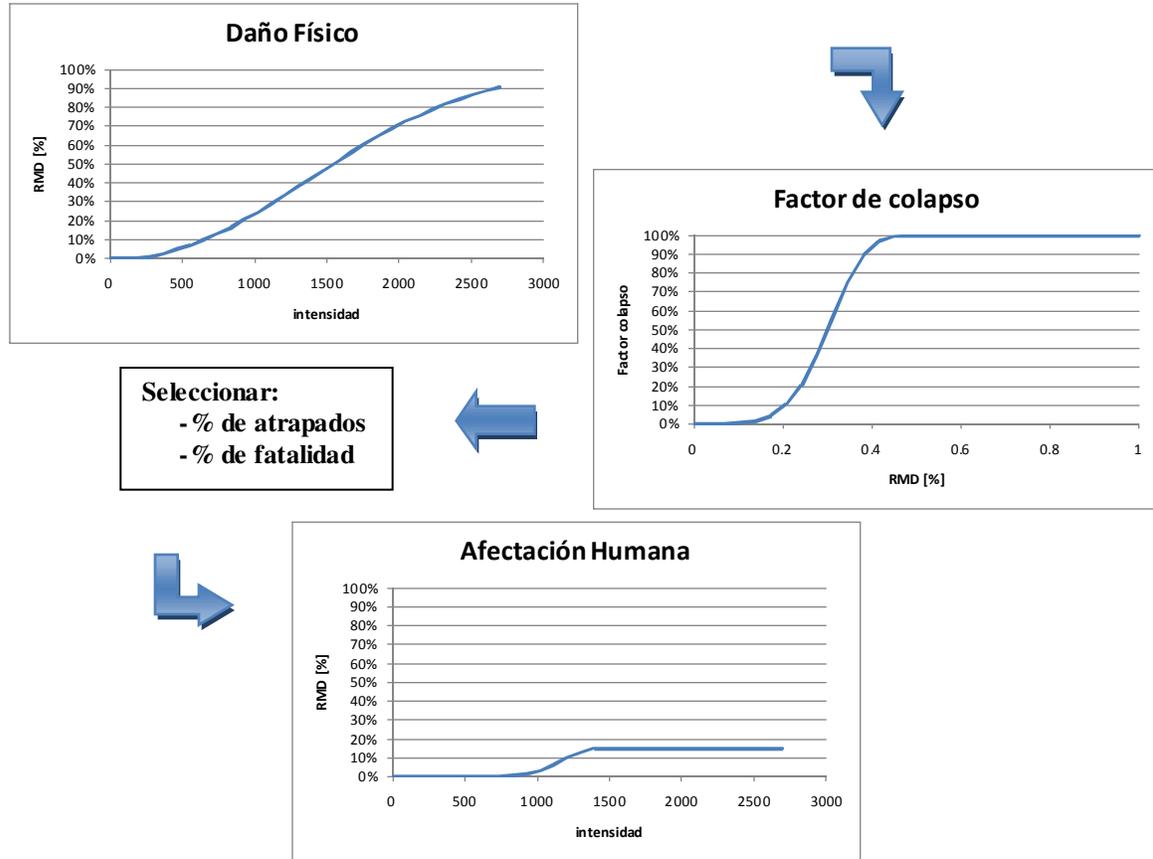


Figura 3-2
Metodología para el cálculo de funciones de vulnerabilidad humana

El cálculo de las víctimas con la metodología anterior se basa en las siguientes suposiciones básicas:

- No habrá incendios que aumenten el número de víctimas.
- Se considera que el clima será templado, sin heladas ni calores excesivos que aumenten el número de víctimas.
- Se considera que las labores de emergencia no se verán rebasadas y que siempre habrá atención inmediata y hospitales suficientes.
- No se consideran explícitamente muertos por causas de pánico (infartos, caídas, suicidio) ni muertos por impacto de los contenidos de las edificaciones.

- No se tienen en cuenta posibles daños ni víctimas por la ocurrencia de deslizamientos u otros fenómenos que se generen como consecuencia del terremoto.
- El alcance se limita a cuantificar el número y tipo de afectados de acuerdo sólo a los daños causados por el colapso de estructuras individuales.

3.1.3 Resultados representativos

La Figura 3-3 presenta algunas funciones de vulnerabilidad humana en términos del valor esperado de víctimas en porcentaje con respecto a la ocupación y su varianza correspondiente para algunos tipos estructurales representativos.

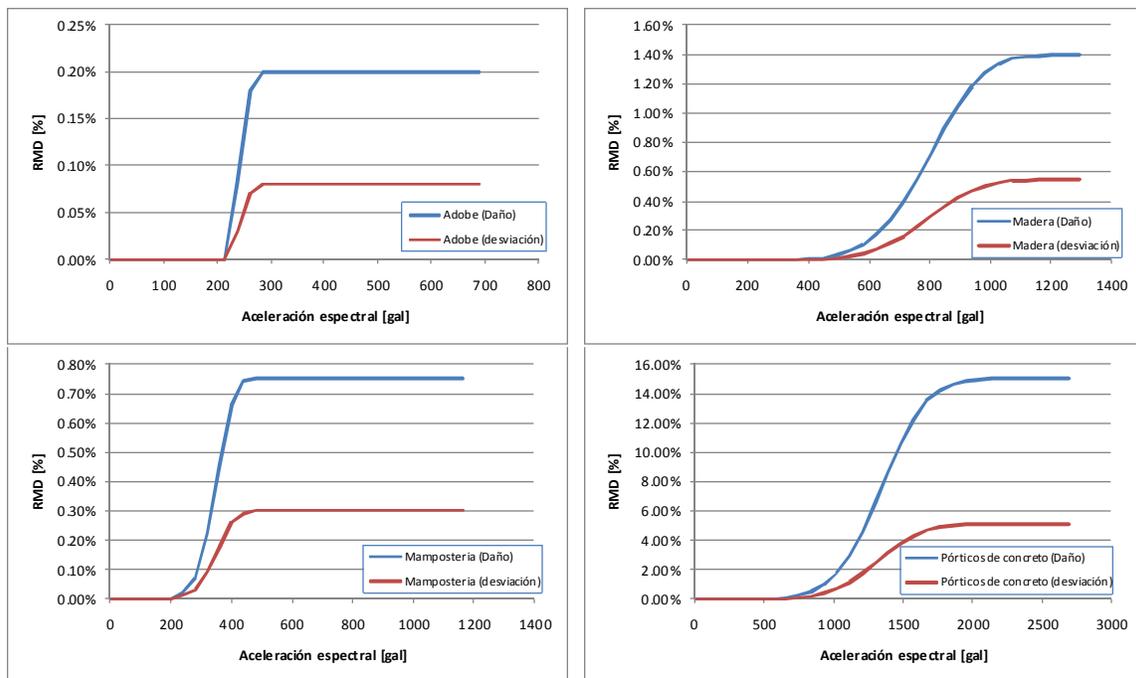


Figura 3-3

Funciones de vulnerabilidad humana para tipos estructurales representativos

3.2 Viento de huracán

No se ha encontrado información relacionada con vulnerabilidad humana por viento de huracán. Se utilizan curvas empíricas basadas en estimativos de número total de víctimas en eventos recientes. La Figura 3-4 ilustra una función de vulnerabilidad representativa para mampostería.

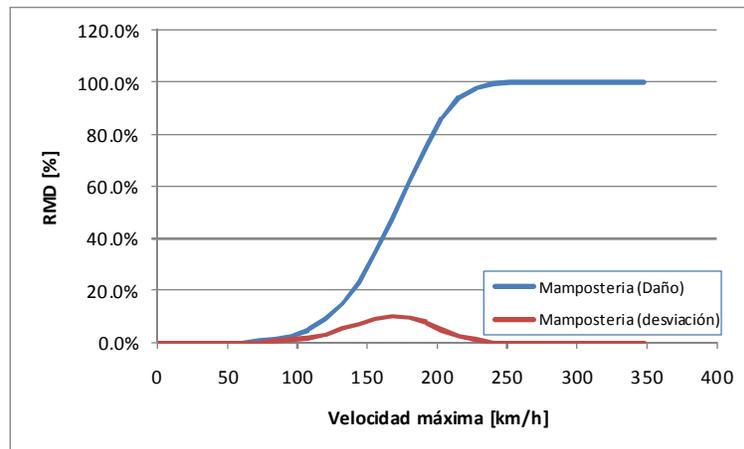


Figura 3-4

Función de vulnerabilidad humana para estructuras de mampostería

3.3 Inundaciones (huracán, marea o precipitación)

No se ha encontrado información relacionada con vulnerabilidad humana por inundación. Se utilizan curvas empíricas basadas en estimativos de número total de víctimas en eventos recientes. La Figura 3-5 ilustra una función de vulnerabilidad representativa para mampostería.

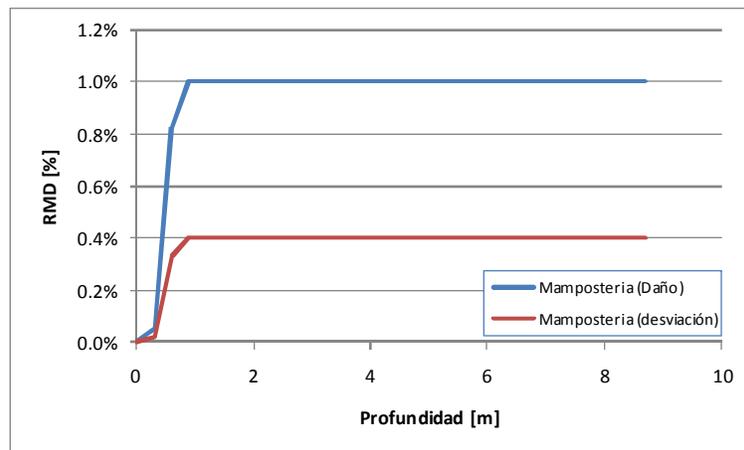


Figura 3-5

Función de vulnerabilidad humana para estructuras de mampostería

3.4 Deslizamientos

No se ha encontrado información relacionada con vulnerabilidad humana por deslizamiento. Se utilizan curvas empíricas basadas en estimativos de número total de

víctimas en eventos recientes. La Figura 3-6 ilustra una función de vulnerabilidad representativa para el caso de deslizamiento.

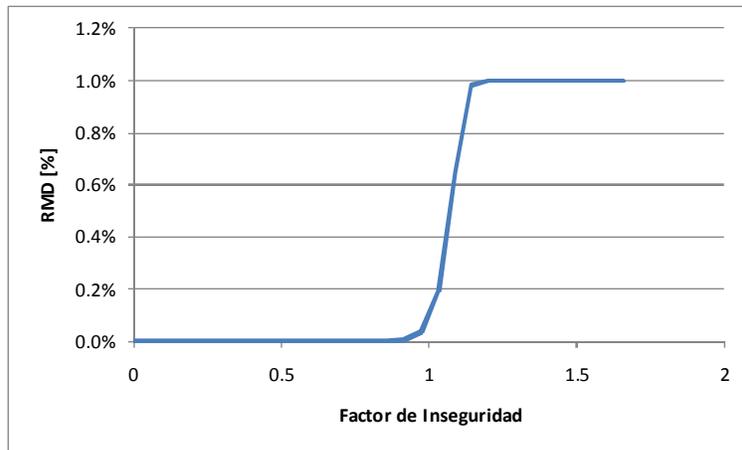


Figura 3-6

Función de vulnerabilidad humana para el caso de deslizamiento

3.5 Erupciones volcánicas

No se ha encontrado información relacionada con vulnerabilidad humana por erupción volcánica. Se utilizan curvas empíricas basadas en estimativos de número total de víctimas en eventos recientes.

La Figura 3-7 ilustra una función de vulnerabilidad representativa para el caso de lluvia de cenizas.

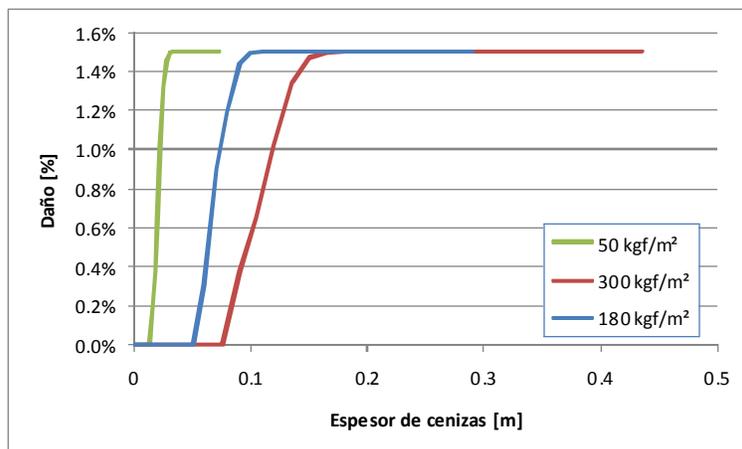


Figura 3-7

Función de vulnerabilidad humana para el caso de lluvia de cenizas

4 Librería de funciones de vulnerabilidad

4.1 Software *ERN-Vulnerabilidad V1.0*

La visualización y la eventual modificación de funciones de vulnerabilidad o la generación de nuevas funciones con base en las ecuaciones generales propuestas en los formatos requeridos por el CAPRA se puede realizar mediante el software *ERN-Vulnerabilidad V1.0*. Los manuales de referencia técnica y de usuario correspondientes al software se pueden consultar a través del sitio www.ecapra.org.

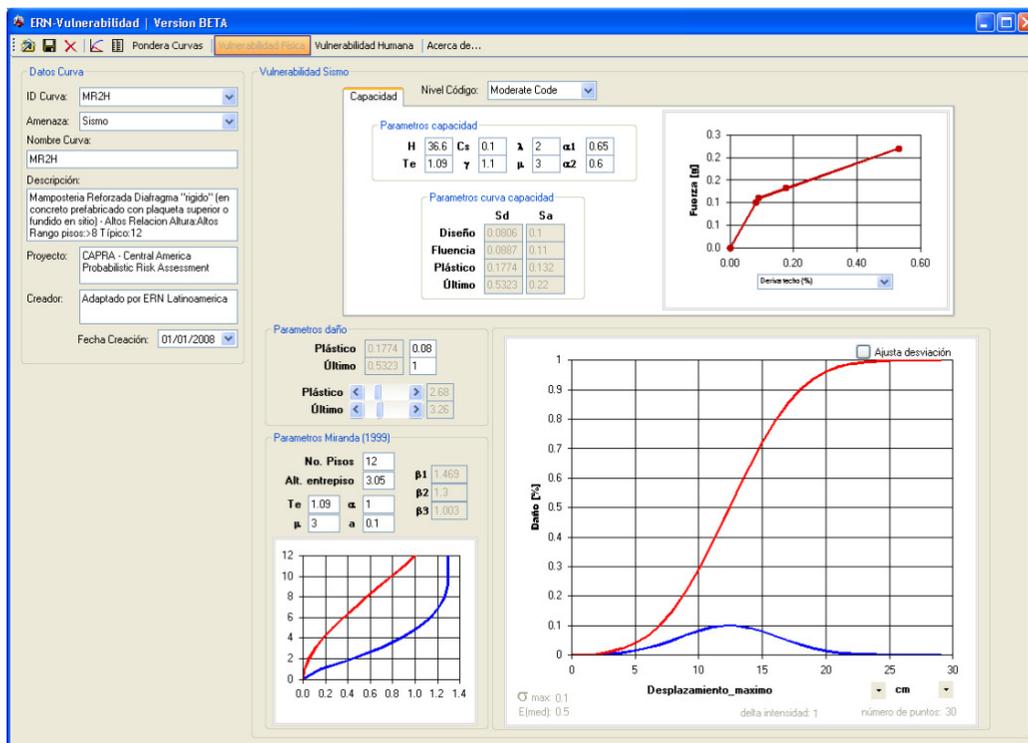


Figura 4-1
Vista general del software ERN-Vulnerabilidad V1.0 para la modificación y generación de funciones de vulnerabilidad

4.2 Funciones de vulnerabilidad sísmica

Se propone la siguiente clasificación general de funciones de vulnerabilidad de acuerdo con tipos constructivos característicos. Dicha clasificación puede detallarse según se identifiquen nuevos tipos constructivos con modificaciones sobre los tipos existentes para lo cual se recomienda utilizar los códigos propuestos con nuevas extensiones.

La Tabla 4-1 resume los tipos constructivos principales propuestos para esta clasificación.

Tabla 4-1
Clasificación general de tipos constructivos para vulnerabilidad sísmica

| Cod | Descripcion |
|------|--|
| MR1L | Mamposteria Reforzada diafragma flexible (madera, acero o prefab.) - Bajos |
| MR1M | Mamposteria Reforzada diafragma flexible (madera, acero o prefab.) - Medios |
| MR2L | Mamposteria Reforzada Diafragma "rigido" (en concreto prefabricado con plaqueta superior o fundido en sitio) - B |
| MR2M | Mamposteria Reforzada Diafragma "rigido" (en concreto prefabricado con plaqueta superior o fundido en sitio) - M |
| MR2H | Mamposteria Reforzada Diafragma "rigido" (en concreto prefabricado con plaqueta superior o fundido en sitio) - A |
| W1 | Madera Porticos Livianos |
| W2 | Madera Comercial-Industrial |
| S1L | Porticos acero resistentes a momento - Bajos |
| S1M | Porticos acero resistentes a momento - Medios |
| S1H | Porticos acero resistentes a momento - Altos |
| S2L | Porticos acero arriostrados - Bajos |
| S2M | Porticos acero arriostrados - Medios |
| S2H | Porticos acero arriostrados - Altos |
| S3 | Porticos acero livianos |
| S4L | Porticos de acero con muros mamposteria simple - Bajos |
| S4M | Porticos de acero con muros mamposteria simple - Medios |
| S4H | Porticos de acero con muros mamposteria simple - Altos |
| C1L | Porticos concreto resistentes a momentos - Acabados flexibles - Bajos |
| C1M | Porticos concreto resistentes a momentos - Acabados flexibles - Medios |
| C1H | Porticos concreto resistentes a momentos - Acabados flexibles - Altos |
| C2L | Porticos concreto + Muros de cortante - Bajos |
| C2M | Porticos concreto + Muros de cortante - Medios |
| C2H | Porticos concreto + Muros de cortante - Altos |
| CP1 | Concreto prefabricado - Tilt-up |
| CP2L | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Bajos |
| CP2M | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Medios |
| CP2H | Concreto prefabricado en porticos con muros estructurales de concreto - Altos |

Para estos tipos constructivos se proponen funciones de vulnerabilidad características compatibles con las curvas de capacidad correspondientes. La Tabla 4-1 define las funciones de vulnerabilidad incluidas en la librería de funciones del software y en el Anexo ERN-CAPRA-T1-5-1 se incluyen fichas técnicas de cada una de estas funciones.

Igualmente pueden utilizarse estos tipos constructivos representativos para generar grupos de funciones de vulnerabilidad para amenazas diferentes a la sísmica, tales como viento, profundidad de inundación, caída de cenizas y otras.

5 Referencias

- ATC-13, (1985) "Earthquake damage evaluation for California", FEMA.
- ATC-40, (1996) "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", FEMA.
- Avelar C. (2006a) "Daños ocasionados por el huracán Wilma en Cancún", Memorias del XV Congreso Nacional de ingeniería Estructural, en CD, Puerto Vallarta Jalisco.
- Bertero, V. V., Anderson, J. C., Krawinkler, H., and Miranda, E. (1991). "Design guidelines for ductility and drift limits." Rep. No. EERC/UCB- 91/15, Earthquake Engrg. Res. Ctr., University of California, Berkeley, Berkeley, Calif. Durkin y Ohashi, 1988
- Billah, K. Yusuf; Scanlan, Robert H. "Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks" American Journal of Physics, Volume 59, Issue 2, pp. 118-124 (1991).
- Filliben J.J., Gurley K., Pinelli J.P. and Simiu E. (2002) "Fragility curves, damage matrices and wind induced loss estimation", National Institute of standards and Technology, U.S.A.
- Huerta, Vega y Avelar, (2006) "Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras". Enviado para su publicación en las memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.
- Meyer and Messner (2005), "National Flood Damage Evaluation Methods A Review of Applied Methods in England, the Netherlands, the Czech Republic and Germany", UFZ-Discussion Papers Department of Economics
- Miranda E. 1991. Seismic and Upgrading of existing structures. Tesis Doctoral. Universidad de California en Berkeley- Berkeley, California, Estados Unidos de América.
- Miranda, E. (1993). "Site-dependent strength-reduction factors." J. Struct. Engrg., ASCE, 119(12), 3503–3519. Miranda, 1997
- Miranda, E., (1997) "Estimation of Maximum Interstory Drift Demands in Displacement-Based Design," Seismic design Methodologies for the Next Generation of Codes, H. Krawinkler and P. Fajfar editor, Balkema, 1997.
- Miranda, E., 1999. "Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings", Journal of Structural Engineering.

- Moehle, J. P. (1992). "Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes." *Earthquake Spectra*, 8(3), 403–428. Moehle, 1996
- Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model, HAZUS-MH MR3 Technical Manual, FEMA, Mitigation Division Washington, D.C., 2003
- Nascimento et al. (2005), Flood-damages curves "Methodological development for the Brazilian context 10th International conference on Urban Drainage", Copenhagen/Denmark 21-26 August.
- NSR-98, (1997) " Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente", AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica,
- Ordaz, M. (1999) "Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros Por Terremoto". 1999.
- Pomonis, A., Sakai, Coburn, A.W., Spence, R.J.S., 1991. "Assessing human casualties caused by building collapse in earthquakes", International Conference on the Impact of Natural Disasters, UCLA.
- Priestley, M.J.N., (1997): "Displacement-Based Seismic Assessment of Reinforced Concrete Buildings," *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 1 No. 1, pp. 157-192, 1997.
- Reese et al. (2003), MERK; "Micro-scale Risk Evaluation of Flood-prone Coastal Lowlands"
- Simiu E. and Scanlan R. (1996) "Wind effects on structures", Third Edition, John Wiley and Sons.
- Sistema Nacional de Protección Civil y CENAPRED (2004), "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligro y Riesgo"
- Sozen, M.A., (1997): "Drift-Driven Design for Earthquake Resistance of Reinforced Concrete," Proc. EERC-CURE Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, Berkeley, California, January, 1997.
- Sterr H, Markau HJ & Reese S (2005), "Analyses of Previous Vulnerability Studies in the Pilot Site German Bight Coast" (TASK 27). FLOODsite Status-Report.
- Stubbs, N. (1996). "Estimation of Building Damage as a Result of Hurricanes in the Caribbean", Organización de Estados Americanos, USAID-OAS Caribbean Disaster Mitigation Project

ANEXO ERN-CAPRA-T1-5-1
Librería de Funciones Genéricas de Vulnerabilidad

ANEXO ERN-CAPRA-T1-5-2
Estimación de Víctimas Durante Terremotos

ANEXO ERN-CAPRA-T1-5-3
Efectos del Viento Sobre las Construcciones

ANEXO ERN-CAPRA-T1-5-4
Metodologías Propuestas para Funciones de Vulnerabilidad
de Inundaciones
