

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259547165>

ENFOQUE INTEGRAL PARA LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO (CAPRA): INICIATIVA INTERNACIONAL PARA LA EFECTIVIDAD DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE

Dataset · January 2014

CITATION

1

READS

168

5 authors, including:



[Mario Ordaz](#)

Universidad Nacional Autónoma de México

159 PUBLICATIONS 1,551 CITATIONS

SEE PROFILE



[Eduardo Reinoso](#)

Universidad Nacional Autónoma de México

69 PUBLICATIONS 398 CITATIONS

SEE PROFILE



[Luis E. Yamin](#)

Los Andes University (Colombia)

52 PUBLICATIONS 183 CITATIONS

SEE PROFILE



[Alex H. Barbat](#)

Polytechnic University of Catalonia

327 PUBLICATIONS 2,394 CITATIONS

SEE PROFILE

ENFOQUE INTEGRAL PARA LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO (CAPRA): INICIATIVA INTERNACIONAL PARA LA EFECTIVIDAD DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE



O.D. Cardona¹, M.G. Ordaz², E. Reinoso², L.E. Yamín³ y A.H. Barbat³

¹ Universidad Nacional de Colombia, Manizales. odcardona@unal.edu.co

² Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México D.C.

³ Universidad de los Andes, CEDERI, Bogotá, Colombia

⁴ Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España alex_barbat@upc.edu

RESUMEN

El entendimiento del riesgo de desastre debido a eventos naturales, como los terremotos, crea poderosos incentivos para que los países desarrollen opciones y herramientas de planeación para reducir los daños potenciales. Esta ha sido la razón por la que el modelo de evaluación de riesgo CAPRA fue desarrollado, con el apoyo técnico y financiero del Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo y la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres. CAPRA es una metodología y una plataforma de información técnico-científica, que la integran una serie de herramientas para la evaluación y comunicación de riesgo en diferentes niveles territoriales. Este modelo permite la evaluación de pérdidas en elementos expuestos utilizando métricas probabilistas tales como la curva de probabilidad de excedencia, la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable; medidas útiles para análisis del riesgo multiamenaza. La plataforma está conceptualmente orientada para facilitar el proceso de toma de decisiones; utilizando CAPRA es posible diseñar instrumentos de transferencia de riesgo y realizar la evaluación de relaciones probabilistas de beneficio-costos, facilitando una herramienta innovadora para los tomadores de decisiones y para analizar los beneficios de las estrategias de mitigación del riesgo, como el reforzamiento de edificaciones existentes. Este modelo es útil para planeación urbana, para realizar escenarios de pérdida para planes de emergencia, para sistemas de alerta, para mecanismos de evaluación de pérdidas en tiempo real y para la evaluación holística de riesgo de desastre utilizando indicadores, lo que facilita la gestión integral del riesgo por parte de los diferentes actores de la toma de decisiones para la reducción de riesgo. CAPRA ha sido utilizado en Colombia, México, Perú, Bolivia, Ecuador, Guyana, Jamaica, los países de Centro América, España, Nepal y sus experiencias son una contribución para el actual desarrollo del Global Earthquake Model (GEM). Ejemplos de la aplicación del modelo en diferentes países, descripciones de *wiki* y herramientas de visualización disponibles fueron creados para ilustrar las capacidades de esta innovadora plataforma de arquitectura y código fuente abierto. Se ilustra la aplicación del CAPRA en el caso sísmico; sin embargo también se han realizado aplicaciones para tsunamis, huracanes, inundaciones, deslizamientos y volcanes.

Palabras clave: Riesgo sísmico, daño de edificios, aseguramiento, reducción del riesgo, análisis costo beneficio, escenarios de pérdidas.

ABSTRACT

Understanding disaster risk due to hazard events, such as earthquakes, creates powerful incentives for countries to develop planning options and tools to reduce potential damages. This has been the reason why CAPRA, the risk evaluation model described in this paper, was developed with the technical and financial support of the World Bank, the Inter-American Development Bank (IDB) and the International Strategy of United Nations for Disaster Reduction (ISDR). CAPRA is a techno-scientific methodology and information platform,

composed of tools for the evaluation and communication of risk at various territorial levels. This model allows the evaluation of probabilistic losses on exposed elements using probabilistic metrics, such as the exceedance probability curve, expected annual loss and probable maximum loss, useful for multi-hazard/risk analyses. The platform is conceptually oriented to facilitate decision making; using CAPRA is possible to design risk transfer instruments, the evaluation of probabilistic cost-benefit ratio, providing an innovative tool for decision makers to analyze the net benefits of the risk mitigation strategies, such as building retrofitting. This model is useful for land use planning, loss scenarios for emergency response, early warning, on-line loss assessment mechanisms, and for the holistic evaluation of disaster risk based on indicators that facilitates the integrated risk management by the different stakeholders involved in risk reduction decision-making. CAPRA has been used in Colombia, Mexico, Peru, Bolivia, Ecuador, Guyana, the Central American countries, Spain, Nepal, and its experiences are a contribution for the current development of the Global Earthquake Model (GEM). Examples of application of the model in the different countries, descriptions of the wiki and visualization tools available are made to illustrate the capabilities of this innovative open architecture and open source platform using as example earthquakes, nevertheless similar application can be made for tsunamis, hurricanes, floods, landslides and volcanoes.

Keywords: Seismic risk, building damage, insurance, risk reduction, cost-benefit analysis, loss scenarios.

MODELO PROBABILISTA DE RIESGO

La frecuencia de eventos sísmicos catastróficos es particularmente baja y por lo tanto la disponibilidad de datos históricos es limitada. Considerando la posibilidad de futuros eventos altamente destructivos, la estimación del riesgo se debe enfocar en modelos probabilistas que puedan utilizar la limitada información disponible para predecir, de la mejor manera, futuros escenarios y para considerar la alta incertidumbre involucrada en el análisis. Por lo tanto, la estimación del riesgo debe ser prospectiva, anticipando eventos científicamente creíbles que podrían ocurrir en el futuro. Los fundamentos sismológicos y de ingeniería son necesarios para desarrollar modelos de predicción de terremotos que permitan evaluar el riesgo de que se presenten pérdidas como resultado de un evento catastrófico. Dado que existen grandes incertidumbres inherentes en los modelos, relacionados con las características de severidad y frecuencia de los eventos, y por lo tanto en las pérdidas causadas como consecuencia de estos eventos, el modelo de riesgo sísmico debe estar basado en formulaciones probabilistas que incorporen esta incertidumbre en la estimación del riesgo. El modelo probabilista del riesgo que está construido con base en una serie de módulos, cuantifica las pérdidas potenciales causadas por sismos como se ilustra en la Figura 1.

MÓDULO DE AMENAZA SÍSMICA

El módulo de amenaza define la frecuencia y severidad de la peligrosidad en un lugar específico. El estudio se complementa mediante el análisis de las frecuencias históricas de los eventos y revisando los estudios científicos sobre la severidad y frecuencia realizados en la zona de interés. Una vez que se han establecido los parámetros de la amenaza, se generan series de eventos estocásticos para definir la frecuencia y severidad de miles de eventos estocásticos. En el caso de sismos, este módulo analiza la intensidad en un lugar una vez que ocurre un evento de la serie estocástica, mediante la modelación de la atenuación del evento desde donde se produce hasta el sitio en consideración; y evalúa qué tan propensas son las condiciones de sitio locales para la amplificación o la reducción del impacto. La amenaza sísmica se expresa en términos de tasas de excedencia de valores de intensidad sísmica (a). Los cálculos consideran la contribución de los efectos de todas las fuentes sísmicas localizadas en cierta área de influencia.

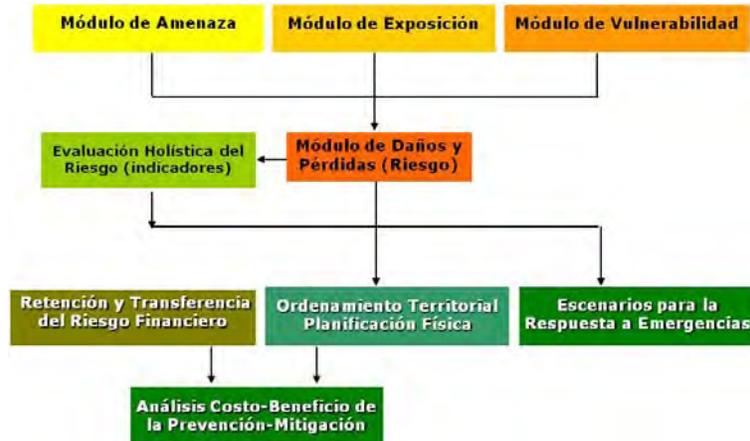


Figura 1. Modelo probabilista de riesgo y aplicaciones para la gestión del riesgo de desastre.

Una vez identificadas las fuentes sísmicas, se asigna un modelo de ocurrencia de los sismos que se presentan en dicha zona. En la mayoría de los casos todas las fuentes sísmicas se modelan siguiendo un proceso de Poisson en donde $\lambda(M)$ representa las tasas de actividad para cada sistema de fallas. Dado que las fuentes sísmicas son volúmenes, el epicentro no sólo puede ocurrir en el centro de las fuentes, sino que pueden también ocurrir, con igual probabilidad, en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Por lo tanto, para la simulación de los grupos de eventos, se definen subfuentes mediante la subdivisión de las fuentes sísmicas, dependiendo de la distancia hipocentral (R_0) en diversas formas geométricas. Para cada subdivisión, la sismicidad de las fuentes se considera concentrada en sus centros de gravedad. Adicionalmente el modelo considera los efectos de atenuación de las ondas sísmicas mediante las leyes de atenuación probabilistas y espectrales, que incluyen diferentes tipos de fuente y los efectos locales de amplificación basados en los estudios de microzonificación y otra información complementaria disponible. Dado que la intensidad calculada se considera como una variable aleatoria con una distribución lognormal, el valor de incertidumbre correspondiente (σ_{Lna}) es tenido en cuenta para incluir la variabilidad asociada. Suponiendo que la variable de intensidad tiene una distribución lognormal, dada la magnitud (M) y la distancia (R_0), la probabilidad de una intensidad sísmica dada (a), $\Pr(A > a | M, R_0)$ se calcula de la siguiente forma:

$$\Pr(A > a | M, R_0) = \Phi\left(\frac{1}{\sigma_{\ln a}} \ln \frac{MED(A | M, R_0)}{a}\right) \quad (1)$$

Donde $\Phi(\cdot)$ es la distribución normal estándar, $MED(A | M, R_0)$ es el valor de medio de la variable de intensidad (dado por la ley de atenuación correspondiente) y σ_{Lna} es la desviación estándar del logaritmo natural de la intensidad (a). Esta metodología basada en (Esteve, 1970; Ordaz, 2000) genera eventos sísmicos estocásticos como ubicaciones aleatorias dentro de las fuentes sísmicas modeladas, calcula la función de densidad de probabilidad de la intensidad sísmica (a) para un lugar específico, y, si se requiere agrega las contribuciones de todas las fuentes y magnitudes para calcular la tasa de excedencia de intensidad, como se ilustra en la figura 2. De estas tasas de excedencia de la intensidad, es posible determinar el espectro de amenaza uniforme para un sitio específico basado en el valor calculado de la intensidad (e.g. aceleración pico del suelo, aceleración espectral, etc.) asociado a un período de retorno definido. Por lo tanto, un espectro de amenaza uniforme se puede determinar al unir los puntos de intensidad calculados de la figura 2 para una tasa de excedencia dada (inverso del período de retorno).

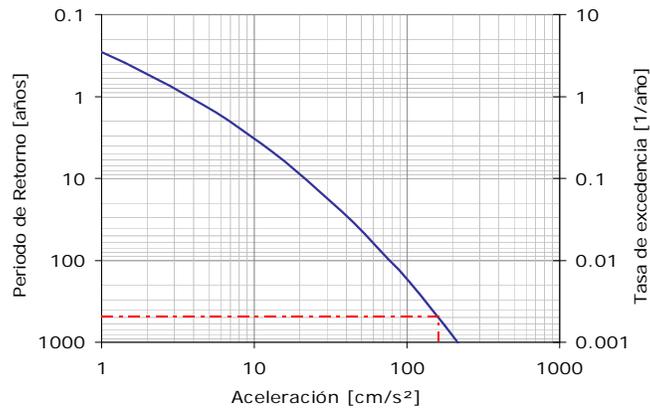


Figura 2. Tasas de excedencia para el parámetro de intensidad de amenaza sísmica en roca

Si el procedimiento descrito se realiza para diferentes sitios dentro de una ciudad, y la variable de intensidad seleccionada es calculada para un período de retorno de 475 años de período de retorno, es posible construir mapas de la ciudad para diferentes intensidades sísmicas a nivel de suelo incluyendo los efectos de sitio de la microzonificación sísmica de la ciudad.

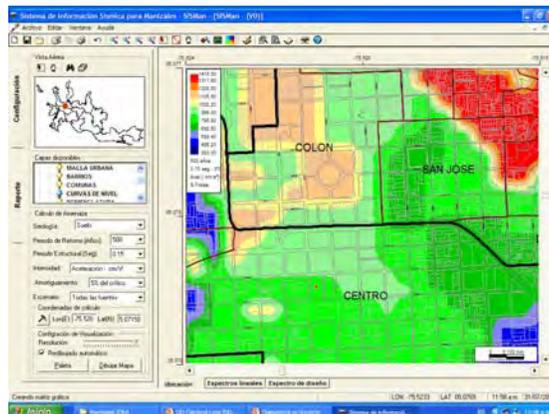


Figura 3. Mapa de microzonificación de amenaza sísmica usando el código abierto de modelación multi-amenaza/riesgo de la plataforma CAPRA

MÓDULO DE EXPOSICIÓN

Los valores de exposición de los “activos en riesgo” se obtienen de fuentes secundarias de datos disponibles como bases de datos existentes o como resultado de aplicar procedimientos simplificados basados en información macroeconómica y social general, como la densidad de población, estadísticas de construcción o información más específica. Este “proxy” se utiliza cuando no existen datos disponibles sitio por sitio.

Con base en la información disponible se construye una base de datos basada en un SIG y se completa con la información específica requerida, usando por ejemplo las herramientas de internet para búsqueda de datos. La exposición también se puede construir usando imágenes de teledetección remota y digitalización de polígonos, líneas, puntos, usando herramientas de dibujo como se ilustra en la figura 4.

Adicionalmente, la base de datos de exposición se puede crear usando la información catastral, cuando está disponible. Las rutinas especiales permiten la visualización de la información de la base de datos. La figura 5 presenta ejemplos de mapas de una base de datos de una ciudad de Colombia usada para el análisis de todas las edificaciones en el área urbana, construyendo un modelo de más de un millón de ítems.



Figura 4. Modelación de la exposición usando herramientas de CAPRA y Google Earth

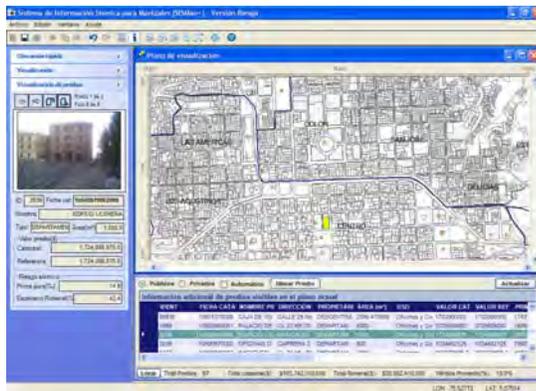


Figura 5. Visualizador de exposición de CAPRA mostrando información de los edificios de la ciudad obtenida de la base de datos catastral.

Para calcular los efectos en la población, también se utiliza información relacionada con la ocupación de los edificios. Igualmente se definen la máxima ocupación y el porcentaje de ocupación a diferentes horas del día con el fin de obtener diferentes escenarios en el tiempo de la ocurrencia de eventos. Cuando no se dispone de la información específica de ocupación, se usa la densidad de ocupación aproximada para cada tipo estructural para completarla.

MÓDULO DE VULNERABILIDAD

La pérdida (L) se define como una variable aleatoria, las funciones de vulnerabilidad describen la variación de momentos estadísticos de pérdida para diferentes valores de demanda sísmica. Se asume usualmente que la distribución de probabilidad de pérdida es una Beta, donde los momentos estadísticos corresponden a la media (usualmente se refiere a la Relación Media de Daño, RMD) y la desviación estándar. La distribución Beta $p_{L|S}(L)$ se define como sigue:

$$p_{L|S}(L) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} L^{a-1} (1-L)^{b-1} \quad (2)$$

donde Γ es la función Gamma y los parámetros a y b son:

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(L|S))E(L|S)}{c^2(L|S)} \quad (3)$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(L|S)}{E(L|S)} \quad (4)$$

donde $E(L/S)$ es la pérdida media o el valor esperado y $c(L/S)$ es el coeficiente de variación de la pérdida dada una demanda sísmica, S (nótese que $c(L/S)=SD(L/S)/E(L/S)$ donde $SD(L/S)$ es la desviación estándar de la pérdida dada una demanda sísmica S).

Las funciones de probabilidad proporcionan toda la información necesaria para calcular la probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida, dada una demanda sísmica. La pérdida se define usando escalas numéricas en lugar de escalas cualitativas como para los estados de daño (e.g. la relación entre el costo de reparación y el valor de reemplazo del inmueble) que permite su uso directo en los cálculos probabilistas de riesgo y pérdida. La probabilidad de alcanzar o exceder un valor de pérdida se calcula como sigue:

$$\Pr(L \geq l | S) = \int_l^{\infty} p_{L|S}(L) dL \quad (5)$$

donde l es un valor de pérdida en el dominio de la variable aleatoria L , y S es la demanda sísmica.

Este módulo cuantifica el daño causado en cada tipo de activo por la ocurrencia de un evento de cierta intensidad (Miranda 1999). La clasificación de los activos se basa en la combinación de los materiales de construcción, el tipo de construcción (es decir, combinación muro y cubierta), uso de la edificación, número de pisos y edad. La estimación del daño se mide en términos de la Relación Media de Daño, RMD, que es la relación entre el costo esperado de reparación y el costo de reemplazo de la estructura. Una curva de vulnerabilidad se puede obtener de relacionar el RMD y la intensidad sísmica que se puede expresar en términos de la aceleración máxima (e.g. para edificaciones de 1 y 2 pisos), la aceleración espectral, la velocidad, la deriva o el desplazamiento (para edificaciones de más de 2 pisos) en cada sitio. Dado un valor de intensidad sísmica para un tipo estructural específico, el RMD se calcula con la Ecuación 6 (Miranda, 1999, Ordaz, 2000):

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

donde β es la pérdida, γ_0 y γ_i son los parámetros de vulnerabilidad estructural que depende de la tipología estructural y del año de construcción y $E(.)$ es el valor esperado. Por definición, β es la relación entre el costo de reparación y el costo total del edificio, un valor entre 0 a 1. Utilizando la aceleración espectral es posible determinar la deriva máxima no lineal de la siguiente forma (Miranda, 1997):

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

donde β_1 es la relación entre el desplazamiento lateral máximo en el nivel superior de la estructura y el desplazamiento espectral; β_2 es la relación entre la distorsión máxima entre pisos y la distorsión global de la estructura, β_3 es la relación entre el desplazamiento máximo lateral inelástico y el desplazamiento máximo del modelo elástico, β_4 es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico, ρ y n son factores para estimar el periodo fundamental de la estructura a partir del número de pisos, N ; h es la altura de capa piso, que depende de la tipología estructural, la localización geográfica y el año de construcción, $S_a(T)$ es la aceleración espectral que depende del periodo de vibración fundamental de la estructura, el amortiguamiento estructural y la amenaza sísmica en el sitio. Varios tipos de construcción están incluidos en el sistema para diferentes tipos de intensidades. La figura 6 presenta un ejemplo de una curva de vulnerabilidad.

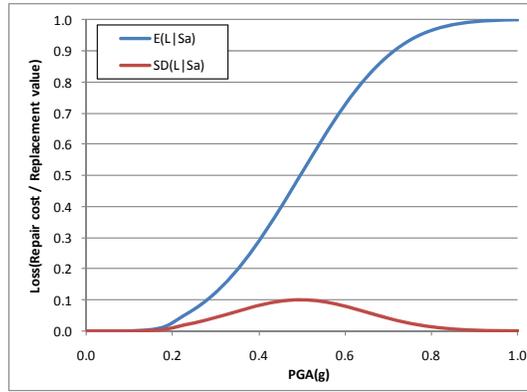


Figura 6. Función de vulnerabilidad usada para un tipo de construcción. Cálculo del daño basado en la aceleración del suelo.

El daño estructural en edificios e infraestructura debido a sismos frecuentemente está representado por funciones de vulnerabilidad que relacionan la probabilidad de alcanzar o exceder cierto estado de daño y la demanda sísmica en términos de intensidades en roca o espectrales. La construcción de funciones o curvas de vulnerabilidad para un sistema estructural dado requiere la definición del parámetro crítico de movimiento del terreno y la identificación de los estados de daño esperados.

Suponga que hay N estados de daño identificados (ds) para un sistema estructural. Luego la probabilidad de alcanzar o exceder el i th estado de daño (P_i), dada la intensidad del movimiento del terreno (S) es:

$$P_i = \Pr(DS \geq ds_i | S) \quad (8)$$

donde DS es una variable aleatoria de daño en el vector de estado de daño $\{ds_0, ds_1, \dots, ds_N\}$. En otras palabras, las curvas de fragilidad definen la probabilidad de que el daño global esperado d de una estructura iguale o exceda un estado de daño dado, ds , como una función de un parámetro cuantificando la severidad de la acción sísmica. Este parámetro puede ser el desplazamiento espectral S_d . Por lo tanto, las curvas de fragilidad están completamente definidas dibujando $P[d > ds]$ en las ordenadas y el desplazamiento espectral S_d en las abscisas. Si se asume que las curvas de vulnerabilidad siguen una distribución de probabilidad lognormal, se pueden definir completamente por sólo dos parámetros, que en este caso, son el desplazamiento medio espectral $\bar{S}_{d,d}$ y la desviación estándar β_{ds} correspondiente. Los estados de daño típicos y las curvas de vulnerabilidad se ilustran en la figura 7.

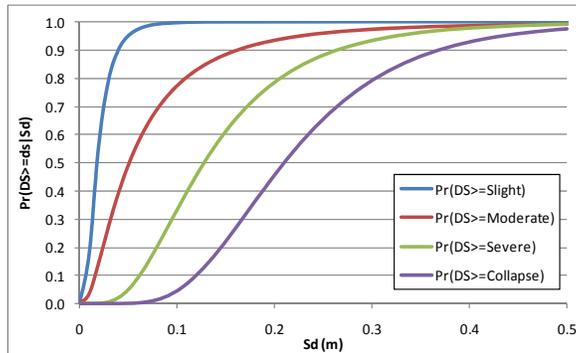


Figura 7. Curvas de fragilidad para un tipo de construcción. El cálculo de probabilidad de daño basado en el desplazamiento espectral.

Las funciones de vulnerabilidad describen la pérdida de una manera apropiada para el cálculo del riesgo. Sin embargo, las curvas de fragilidad y las matrices de probabilidad de daño (MPD) han sido ampliamente utilizadas en todo el mundo debido a la descripción integral del comportamiento estructural de las demandas sísmicas. Relaciones entre estas estimaciones se pueden establecer. Los estados de daño en las curvas de fragilidad y las MPD están frecuentemente definidos para caracterizar un estado físico de la estructura. Los estados físicos son cualitativos y simplemente descriptivos del daño esperado. Para cálculos rigurosos de pérdida, una escala numérica del costo del daño, por ejemplo en términos de la relación del costo de reparación y el costo de reemplazo debe estar relacionado a los estados de daño definidos.

Suponiendo que hay N estados de daño identificados (ds) para un sistema estructural. Para cada estado de daño, un valor de pérdida (L) es asignado. En otras palabras, cuando la estructura alcanza un estado de daño ds el propietario tendrá que pagar el costo de reparación L . Por lo tanto, los momentos estadísticos de pérdida se pueden calcular de la siguiente manera:

$$E(L | S) = \sum_{i=0}^N L_i \Pr(DS = ds_i | S) \quad (9)$$

$$SD^2(L | S) = \sum_{i=0}^N (L_i - E(L | S))^2 \Pr(DS = ds_i | S) \quad (10)$$

donde $E(L/S)$ es la pérdida promedio y $SD(L/S)$ y la desviación estándar de la pérdida dada una demanda sísmica S , y $\Pr(DS=ds_i/S)$ es la probabilidad discreta de alcanzar un estado de daño ds .

El sistema también permite el uso de modelos de vulnerabilidad existentes en diferentes formatos (Figura 8). Se pueden definir curvas de vulnerabilidad específicas para los contenidos y para los costos de interrupción de actividades.

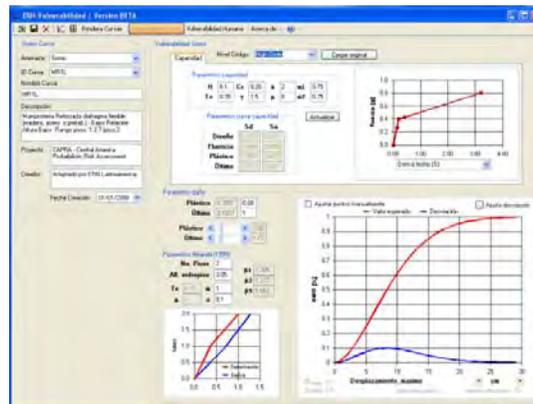


Figura 8. Diferentes formatos usados por CAPRA. Incluyen curvas de capacidad (pushover), curvas de fragilidad y funciones de vulnerabilidad.

MODULO DE DAÑO Y PÉRDIDA

Como es conocido, normalmente el riesgo se calcula utilizando la tasa de excedencia de los valores de pérdida, $v(p)$. Esta cantidad es el número esperado de sismos por unidad de tiempo, que producirá pérdidas iguales o mayores que p . Esto se calcula usando el teorema de la probabilidad total.

$$v(p) = \sum_{i=1}^{Events} \Pr(P > p | Event i) F_A(Event i) \quad (11)$$

donde $\Pr(P > p | Event i)$ es la probabilidad de excedencia de pérdida dado que ocurre el evento i y $F_A(Evento i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i . Las funciones de vulnerabilidad son usadas para calcular $\Pr(P > p | Event i)$. Normalmente, un evento sería específico en términos, de, al menos, su magnitud y su ubicación hipocentral. Por lo tanto, con el fin de calcular $\Pr(P > p | Event i)$ se hacen las siguientes consideraciones:

Se asume que dada la ocurrencia del evento i , con magnitud y ubicación hipocentral conocidas, la intensidad en el sitio donde se encuentra la estructura es una variable aleatoria lognormal con mediana y desviación estándar logarítmica que en general depende de la magnitud y de la distancia entre la fuente y el sitio. Bajo esta suposición, la probabilidad requerida $\Pr(P > p | Event i)$ es calculada encadenando dos distribuciones condicionales:

$$\Pr(P > p | Event) = \int_0^{\infty} \Pr(P > p | Sa) p_{SA}(Sa | M, R) dSa \quad (12)$$

donde $p_{SA}(Sa/M, R)$ es la función de densidad de probabilidad de intensidad Sa dado que un sismo de una intensidad dada sucede a una distancia R desde la fuente al sitio. Como se mencionó $Sa/M, R$ frecuentemente se asume que tiene una distribución lognormal, con mediana y desviación estándar logarítmica que depende de M y R , y se calculan usando el modelo de predicción del movimiento del terreno seleccionado por el analista. El primer término de la integral es, obviamente, calculado usando la relación de vulnerabilidad que describe el comportamiento de la estructura bajo análisis. Las ecuaciones anteriores dan un indicador claro de cómo las incertidumbres en la vulnerabilidad se propagan a través del análisis del riesgo.

En este módulo entonces, para calcular las pérdidas, la relación del daño obtenido en el módulo de vulnerabilidad se traduce a pérdida económica multiplicando la proporción de daño por el valor en riesgo. Esto se hace para cada clase de activo en cada ubicación. Luego las pérdidas son agregadas como se requiere (Ordaz et al., 1998; 2000). El módulo de pérdida estima las pérdidas netas. Pueden ser útiles para información de seguros teniendo en cuenta por ejemplo el deducible, la suma asegurada, etc. Las métricas de riesgo producidas por el modelo proporcionan a los encargados del riesgo y a los tomadores de decisiones información esencial requerida para manejar los futuros riesgos. Las principales métricas para la estimación del riesgo son las siguientes:

Pérdida Anual Promedio: La PAP es la pérdida anual esperada. Matemáticamente, la PAP es la suma de los productos de las pérdidas esperadas por evento y la probabilidad de ocurrencia anual de dicho evento para todos los eventos estocásticos considerados en el modelo de pérdida. En términos probabilistas, la PAP es la esperanza matemática de la pérdida anual. La pérdida anual esperada, también es conocida como prima pura cuando esta se expresa como la tasa del valor de reemplazo del activo, definida como la pérdida que podría ocurrir en un año, suponiendo que el proceso de ocurrencia de amenazas es estacionario y que las estructuras afectadas son inmediatamente restauradas después del evento. Se puede calcular como se muestra a continuación (Ordaz, et al, 1998; Ordaz, 1999):

$$PAP = \sum_{i=1}^{Events} E(P | Event i) F_A(Event i) \quad (13)$$

donde PAP es la pérdida anual promedio, $E(P | Event i)$ es el valor de la pérdida esperada del evento i , y $F_A(Evento i)$ es la frecuencia de ocurrencia anual del evento i . La frecuencia anual

de ocurrencia de los eventos depende de los resultados de la estimación de la amenaza. El valor esperado de la pérdida, dada la ocurrencia de un evento particular, depende de la vulnerabilidad del elemento expuesto.

Curva de excedencia de pérdidas. La CEP representa la frecuencia anual con la cual la pérdida de una cantidad monetaria específica será excedida. Ésta es la métrica más importante del riesgo catastrófico para los encargados del riesgo, dado que estima la cantidad de fondos necesarios para alcanzar los objetivos de la gestión del riesgo. La CEP se puede calcular para el evento mayor en un año o para todos los eventos (acumulados) en un año. Para los propósitos de la gestión del riesgo, la última estimación es la preferida, dado que incluye la posibilidad de uno o más eventos severos.

Pérdida Máxima Probable, (PML en inglés): La PMP representa la cantidad de pérdida para una frecuencia anual de excedencia dada, o su inverso, el período de retorno. La curva de PMP por otro lado está generalmente definida como la PMP en valor económico o en porcentaje con relación al período de retorno. La PMP de una base expuesta es una tasa de la cantidad de pérdidas máximas que podrían razonablemente suceder en el conjunto de elementos expuestos durante la ocurrencia de un evento. Usualmente se usan datos fundamentales para determinar el tamaño de las reservas que las compañías de seguros deben mantener con el fin de evitar pérdidas excesivas que pueda sobrepasar su capacidad. En el modelo se define como la pérdida promedio que podría ocurrir para un periodo de retorno dado. Por lo tanto, es necesario calcular las tasas de excedencia de las pérdidas netas del portafolio. Dichas tasas de excedencia no son más que el número de veces en el año que se espera que un cierto valor de pérdida sea alcanzado o excedido. La tasa de excedencia de un valor de pérdida dado, p , es calculado como:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{Event} \Pr(P > p | Event i) F_A(Event i) \quad (12)$$

donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida, p , $\Pr(P > p | Event i)$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , cuando ocurre el evento i , y F_A es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i . La figura 9 presenta la curva de PMP (PMP para un portafolio de edificios en una ciudad de Colombia (CEDERI 2005; ERN 2005).

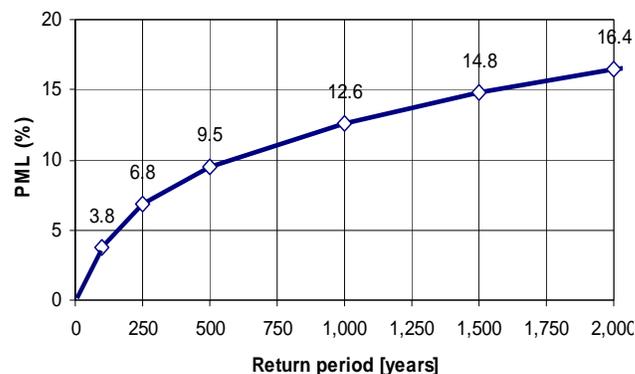


Figura 9. Ejemplo de una curva de PMP con los resultados de varios periodos de retorno.

Dependiendo de la tolerancia del riesgo de los interesados, el encargado del riesgo puede decidir manejar las pérdidas para un cierto período de retorno (por ejemplo 1 en 300 años). Para ese interesado (por ejemplo una entidad pública o privada), la PMP es la pérdida de 300 años. Para otro, podría ser 150 años o para otros la de 500 años. Es importante señalar que es frecuente establecer un programa de insolvencia en un nivel entre uno en 150 años a uno en 200 años, que aproximadamente corresponde al nivel de solvencia requerido

por las compañías BBB+ valoradas por S&P. Sin embargo, otros actores involucrados (e.g. gobiernos o entidades reguladoras) han escogido períodos de retorno mucho mayores como la Comisión Mexicana de Aseguramiento, que usa un período de retorno de 1500 años para definir los márgenes de solvencia de las compañías aseguradoras en México.

Las curvas equivalentes a aquellas de excedencia de pérdidas también pueden ser generadas para otros parámetros de medición del riesgo como el número máximo probable de víctimas o heridos en función del período de retorno. Por otro lado, además de los valores económicos probabilistas también es relevante para el manejo de desastres y la reducción de la vulnerabilidad contar con escenarios de pérdida por sismos desde una perspectiva determinista, considerando algunos terremotos históricos o eventos futuros. Esto es particularmente útil para la formulación de un plan de respuesta a emergencia de una ciudad y para la identificación de edificios y manzanas con concentración de daño potencial. La figura 10 presenta el mapa de daño de la ciudad de Manizales, en Colombia, usando el módulo de daño y pérdida.



Figura 10. Ejemplo del escenario determinista de daño para un terremoto en una fuente sísmica específica, calculado usando el CAPRA.

Considerando la posibilidad de eventos altamente destructivos en el futuro, la estimación del riesgo se debe enfocar en modelos que puedan usar la información disponible limitada para predecir de la mejor manera posible los escenarios futuros y para considerar la alta incertidumbre involucrada en el análisis. Como conclusión, dadas las grandes incertidumbres inherentes en los modelos con relación a las características de la severidad y frecuencia del evento, y por lo tanto a las pérdidas causadas por tales eventos, el modelo de riesgo de CAPRA está basado en formulaciones que incorporan esta incertidumbre dentro de la estimación de la amenaza y el riesgo.

CONCLUSIONES

La iniciativa CAPRA proporciona a los diferentes tipos de usuarios con herramientas, habilidades, información y datos para evaluar el riesgo de desastre. Las aplicaciones de CAPRA incluyen un conjunto de diversos módulos para los diferentes tipos de amenazas considerados, un formato estándar para la exposición de los diferentes componentes de la infraestructura, un módulo de vulnerabilidad con una librería de curvas de vulnerabilidad y un sistema de información geográfico para el mapeo de la exposición, la amenaza y el riesgo. Las técnicas probabilistas de CAPRA emplean análisis estadísticos de series de datos históricas para simular las intensidades y frecuencias de la amenaza a través de todo el territorio de un país. Esta información de la amenaza se puede combinar con los datos de exposición y vulnerabilidad, y se puede analizar espacialmente para estimar el daño potencial resultante. Esta medida se puede expresar en métricas de riesgo cuantificables como la

pérdida máxima probable para un período de retorno dado o como la pérdida anual promedio. Dado que el riesgo se cuantifica de acuerdo a una metodología rigurosa, los usuarios pueden tener un mismo lenguaje para la medición y comparar o agregar las pérdidas esperadas de varias amenazas, incluso en el caso de riesgos climáticos futuros asociados con los escenarios de cambio climático. La arquitectura de la plataforma se ha desarrollado para que sea modular, ampliable y abierta, permitiendo la posibilidad de aprovechar varios aportes y contribuciones. Este enfoque permite que CAPRA sea un instrumento vivo en continuo desarrollo. La innovación de CAPRA se extiende más allá de la plataforma de modelación del riesgo; una comunidad de usuarios de la evaluación del riesgo de desastre está creciendo actualmente en los países, existe capacitación y talleres y se está llevando a cabo una estrategia completa para futuros desarrollos.

REFERENCES

- Cardona O.D., Hurtado J.E (2000) Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center, in Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland.
- Cardona, O.D. Ordaz, M.G., Arámbula, S., Yamín, L.E., Mahul, O. and Ghesquiere, F. (2006) "Detailed earthquake loss estimation model for comprehensive risk management", Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, European Association of Earthquake Engineering EAEE, Geneva.
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Marulanda, M.C., & Barbat, A.H. (2008). Estimation of Probabilistic Seismic Losses and the Public Economic Resilience: An Approach for a Macroeconomic Impact Evaluation, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2) 1-11, Taylor & Francis, Philadelphia.
- ERN-Colombia, (2005) *Definición de la Responsabilidad del Estado, su Exposición ante Desastres Naturales y Diseño de Mecanismos para la Cobertura de los Riesgos Residuales del Estado*, Reports for DNP, ACCI, the World Bank, Bogotá.
- ERN-AL (2010) CAPRA, www.ecapra.org
- Esteva, L. (1970) *Regionalización sísmica para fines de ingeniería*; serie azul, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Miranda, E. (1999) Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings, *Journal of Structural Engineering* 125:4, 417-425.
- Ordaz, M; Miranda, E; Reinoso, E and Pérez-Rocha, L.E. (1998) *Seismic Loss Estimation Model for México City*, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Ordaz, M. (2000) *Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremoto*, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- CEDERI (2005) *Estrategia para Transferencia, Retención, Mitigación del Riesgo Sísmico en Edificaciones Indispensables y de Atención a la Comunidad del Distrito Capital*, Universidad de Los Andes, Reports for DNP, ACCI, the World Bank, Bogotá.