

ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD Y EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

PLANIFICACION FISICA Y URBANA EN AREAS PROPENSAS

Omar Dario Cardona Arboleda *

RESUMEN

A través de la experiencia obtenida de las investigaciones en el campo de la Ingeniería Sísmica y de la evaluación de los efectos desastrosos producidos por los terremotos se ha puesto de manifiesto la necesidad de llevar a cabo medidas preventivas contra dichas consecuencias en las etapas de elaboración de los planes de desarrollo urbano de poblaciones y ciudades en áreas propensas. La planificación urbana puede mitigar los efectos de los terremotos o de otros riesgos naturales y reducir el nivel de riesgo existente mediante el desarrollo de técnicas que incluyen los principios básicos de la Ingeniería Sísmica y la Sismología.

INTRODUCCION

Colombia por su posición geográfica está expuesta a la manifestación de eventos naturales, tales como movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, avalanchas, inundaciones, etc. Los volcanes sobre la Cordillera de Los Andes, desde el sur hasta el norte de nuestro continente son, debido a la deriva continental, consecuencia del efecto de subducción que se manifiesta entre las placas tectónicas del Océano Pacífico y el Continente Americano. Igual motivo por el cual, fundamentalmente, se presentan movimientos sísmicos en el territorio nacional. Por esta razón es importante notar, tal como lo consigna el Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes, las zonas de alto riesgo sísmico del país, las cuales identifican una amplia parte de nuestro territorio como susceptible a sismos de gran magnitud. En estas zonas, no sólo se encuentran centros urbanos como Manizales, Pereira y Armenia que siempre se han asociado con el alto riesgo sísmico, sino, como mucha gente lo desconoce o subestima, ciudades tales como Cali, Bucaramanga, Popayán, Pasto, Neiva, Cúcuta y en un grado no muy menor de este alto riesgo ciudades como Bogotá, Medellín, Ibagué, Montería, Tunja y Villavicencio.

Siendo así, y sabiendo que resulta muy complejo el conocer en donde se encuentran los terremotos tanto en el tiempo como en el espacio, fenómenos que pueden generar riesgos como la inestabilidad del suelo, el derrumbamiento de edificaciones y en general pérdidas que pueden llegar a ser un significativo porcentaje del producto nacional bruto. Es difícil explicarse el porqué se le entrega a una institución como Ingeominas a veces la responsabilidad total de la evaluación del riesgo, en la cual

* Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia - Cursos de Posgrado en Diseño Sismoresistente y Estudios de Vulnerabilidad en el IZIIIS Yugoslavica - Miembro Comité AIS-100 - Miembro Comité ACI-118 - Miembro EERI - Profesor de Ingeniería Civil Universidad Nacional - Jefe División de Ingeniería PRODATOS S.A. Manizales.

deberían trabajar en conjunto planificadores físicos, sociólogos, administradores, ingenieros, profesionales de la salud, geofísicos, sismólogos y obviamente geólogos, o el porqué en vez de crear un Centro de Investigaciones de Riesgos Naturales o un organismo similar con su capítulo volcánicas, se pretende crear un Centro de Investigaciones Volcánicas que por definición excluye el estudio de otros riesgos como el sísmico, el cual definitivamente nos depara graves manifestaciones en el futuro.

Cada vez que ocurre un desastre se inician una serie de labores con el fin de aliviar los problemas generados por el mismo y en algunas ocasiones, como en el caso de la catástrofe del Ruiz, se crean unas organizaciones que por defecto son eminentemente coyunturales. Sin perder de vista las labores, sobre todo de buena voluntad, que se desarrollan en estas organizaciones de acuerdo con las prioridades establecidas por la emergencia, es lamentable la falta en muchos casos de idoneidad para manejar la problemática del riesgo y las labores que deben emprenderse a mediano y largo plazo, únicas que podrían mejorar las condiciones actuales no sólo de los damnificados sino de la gran cantidad de población concentrada en los diferentes centros urbanos del territorio nacional.

El país no está en capacidad de perder como ocurrió en Popayán, \$ 400 millones de dólares en 18 segundos escasamente hace tres años, o una cifra aún incalculable en la tragedia del Ruiz, cuyos costos directos y obviamente indirectos pueden llegar a un inmenso porcentaje del Producto Nacional Bruto. Si ha esto se le agregan las pérdidas recientes por terremoto en Manizales, Pereira, Armenia, Tumaco, Cúcuta y Popayán; las pérdidas por errores de carácter técnico en el Guavio y Chivor y las pérdidas en la Costa Norte y los Llanos Orientales debido a las inundaciones, perfectamente se podría decir que Colombia tiene un significativo porcentaje promedio anual de pérdidas por desastres naturales con respecto a su Producto Nacional Bruto. Esto como es obvio se traduce en empobrecimiento de la población, puesto que implica llevar a cabo gastos no previstos que afectan el desarrollo económico del país.

Las medidas de prevención contra los efectos desastrosos deben tomarse siempre en el estado de elaboración de los planes de desarrollo urbano, con el fin de reducir el nivel de riesgo existente. El país debe enfrentar la importancia de llevar a cabo medidas preventivas versus la recuperación posterior a los desastres. e incorporar los análisis de riesgo a sus aspectos sociales y económicos.

Con el fin de establecer un criterio justificadamente adecuado desde el punto de vista técnico y económico para la mitigación o reducción del riesgo sísmico es necesario intensificar la actualización a nivel del estado actual del arte de los profesionales involucrados y la investigación y el desarrollo de una metodología, adecuada para nuestro medio, que evalúe la vulnerabilidad y el nivel de riesgo aceptable no sólo a través de análisis individuales de los elementos sometidos sino a través de funciones completas sobre las áreas urbanas.

DEFINICION DEL RIESGO

En la terminología técnica, como lo define el reporte "Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad" del grupo de expertos de UNDR0, reunido para el efecto en 1979, se distinguen dos conceptos del riesgo cualitativamente diferentes pero en ocasiones equivocadamente considerados como sinónimos:

a) La Amenaza o propensividad a la manifestación del fenómeno (H, Hazard), definida como una probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo; la cual no es modificable, y

b) El Riesgo propiamente dicho (R, Risk), que es una probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales y técnicas en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo, el cual puede reducirse o mitigarse puesto que no sólo depende de la amenaza (H) sino, también, de la vulnerabilidad del elemento o los elementos expuestos; la cual es modificable.

De acuerdo con estos conceptos la Amenaza Sísmica H esta definida como una probabilidad de que la Intensidad Sísmica I sea excedida en un período de T años. Donde bajo el término de intensidad se ha definido, como una medida del fenómeno, cualquier parámetro cualitativo o cuantitativo relacionado con la magnitud M de los eventos, tales como la intensidad de la escala modificada de Mercalli, la aceleración pico del suelo, la respuesta espectral, etc. Para un sitio determinado la Amenaza es una función de la sísmicidad o probabilidad de ocurrencia $p(M)$ y de la atenuación o pérdida de la energía sísmica con la distancia $p(I/M)$,

$$H = p(I) = \int p(I/M) \cdot p(M) \cdot dM$$

y el Riesgo Sísmico Específico S es función de la Amenaza Sísmica H y de la Vulnerabilidad específica $p(D/I)$, que es el nivel de daño D esperado que puede presentarse sobre un elemento expuesto E como consecuencia de la manifestación de un evento dado,

$$S = p(D) = \int p(D/I) \cdot p(I) \cdot dI$$

por lo tanto, el Riesgo Sísmico Total R es la cuantificación de las pérdidas, conocida la vulnerabilidad de todos los elementos expuestos $p(P/D)$, o vulnerabilidad urbana, y el Riesgo Sísmico Específico de cada uno de los elementos individualmente,

$$R = p(P) = \int p(P/D) \cdot p(D) \cdot dD$$

$p(P)$ debe entenderse ampliamente como la cuantificación de las pérdidas o como la cuantificación de la inversión realizada con anterioridad al evento

con el fin de mitigar la pérdida total que causaría el desastre.

En general se puede adoptar el uso de un índice de vulnerabilidad como un valor simple derivado de un eficiente procedimiento de inspección de los elementos expuestos. En este caso, considerando solamente la intensidad, el daño y el índice de vulnerabilidad, las cuales son variables aleatorias puesto que se pueden considerar continuas en su rango de definición, la probabilidad del daño o pérdida puede expresarse como

$$p(\bar{P}) = \int_0^P \int_0^{V_{\max}} \int_0^{I_{\max}} p(P/V, I) \cdot p(V) \cdot p(I) dI dV dP$$

donde $p(\bar{P})$ es el valor de la distribución acumulada de la pérdida para $P=\bar{P}$; $p(P:V, I)$ es la función de densidad condicional del daño bajo el índice de vulnerabilidad y la intensidad; y $p(V)$ y $p(I)$ son respectivamente las funciones de densidad para el índice de vulnerabilidad y la intensidad. Estas dos variables son estadísticamente independientes.

Para el desarrollo de mapas que ilustren las probabilidades de daño esperado la ecuación anterior podría discretizarse en diferentes rangos de nivel de daño. La ecuación tendría que ser evaluada para los dos extremos de cada rango utilizando una expresión en forma discretizada mediante el uso de sumatorias

$$p(P_i < P < P_{i+1}) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m p(P_i < P < P_{i+1} / V_j < V < V_{j+1} \quad I_k < I < I_{k+1}) \\ p(V_j < V < V_{j+1}) \cdot p(I_k < I < I_{k+1})$$

Para evaluar el Riesgo Sísmico deben seguirse, entonces, en su orden las siguientes etapas:

- Evaluación de la Amenaza Sísmica a nivel global y local.
- Identificación de los elementos expuestos o amenazados.
- Definición de funciones de vulnerabilidad que relacionen las pérdidas específicas con la amenaza sísmica para los elementos expuestos.
- Evaluar las pérdidas específicas de cada elemento expuesto y determinar su factor de participación en el efecto total de los bienes existentes.
- Evaluar la totalidad del Riesgo Sísmico para la región considerada.

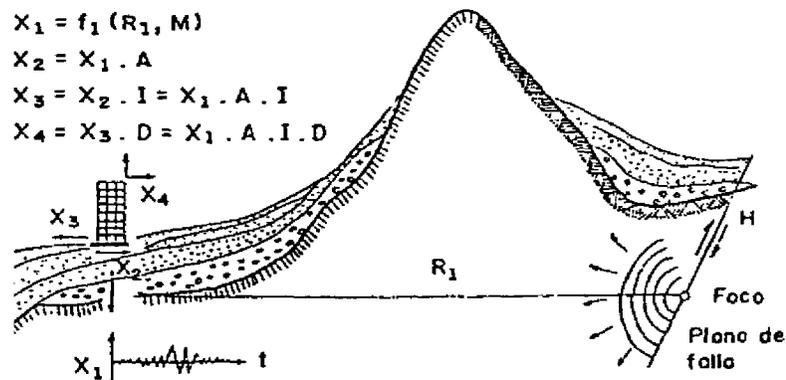
La vulnerabilidad, es decir la pérdida potencial específica de los elementos expuestos y el volumen de dichos elementos son las únicas variables que pueden ser modificadas por el hombre, y una vez modificadas se puede afectar o reducir el nivel de riesgo existente. Programas preventivos pueden mitigar o controlar el riesgo definiéndose un nivel de intervención que modifique el grado de vulnerabilidad de los elementos amenazados una vez desarrollado un modelo de pérdidas que califique su

nivel de exposición.

EVALUACION DE LA AMENAZA SISMICA

En los últimos veinte años la Ingeniería Sísmica ha desarrollado una serie de metodologías mediante las cuales se ha pretendido determinar la intensidad máxima que, en un período de tiempo, podría llegar a presentar un movimiento sísmico en una región sísmicamente activa. Estas metodologías se han refinado en los últimos años con el fin de recomendar acertadamente la aplicación de estrictos criterios de diseño sísmoresistente en la construcción de las nuevas edificaciones, de acuerdo con el nivel de amenaza o intensidad máxima esperada a la que se encuentran sometidas. Actualmente, sin perder de vista el objetivo de llevar a cabo una protección sísmica basada en la construcción de estructuras cuyos daños sean mínimos, en lo posible, y que no comprometan la vida de sus ocupantes, la Ingeniería Sísmica ha dirigido sus esfuerzos a la determinación del riesgo sísmico, el cual implica igualmente determinar el grado de exposición o amenaza al que se encuentran sometidas no sólo las nuevas edificaciones sino las ya existentes, normalmente no sísmoresistentes.

FACTORES INVOLUCRADOS EN LA PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA SISMICA



MOVIMIENTO DEL FRENTE DE ONDA
TERREMOTO DE MAGNITUD "M"

- X₁. Sismo en la roca.
- X₂. Sismo en la superficie afectado por la estratificación.
- X₃. Sismo afectado por la interacción suelo-estructura.
- X₄. Sismo afectado por las propiedades de la estructura

La amenaza sísmica representa un peligro potencial que puede expresarse como una probabilidad de que la intensidad de un evento no sea excedida durante un periodo de tiempo. Esta amenaza puede determinarse para diferentes periodos de retorno relacionados con la vida útil económica de los elementos sometidos a riesgo. Teniendo en cuenta la naturaleza aleatoria de los terremotos resulta bastante complejo llevar a cabo una modelación sin una detallada investigación de sus características y sin la aplicación de una serie de hipótesis a cerca de su mecanismo de ocurrencia.

Debido a que no puede predecirse con certeza la manifestación de futuros terremotos, no puede modelarse el fenómeno sísmico en una forma simple y determinística. Sin embargo, con base en análisis estadísticos de terremotos en el pasado y su aceleración estimada para diferentes sitios, puede obtenerse la probabilidad de ocurrencia de ciertas aceleraciones en el futuro. Reconociendo que muchos aspectos de los terremotos y su ocurrencia son desconocidos, podría considerarse este fenómeno como un proceso discreto estocástico en el tiempo. Igualmente, la aceleración del suelo causada por los terremotos podría entenderse como un proceso similar y por lo tanto concluirse que puede aplicarse un análisis estadístico. Para este análisis es necesario contar con un catálogo de eventos en el pasado con el fin de definir la distribución de aceleraciones. Normalmente no se cuenta con un amplio inventario de registros de dichas aceleraciones por lo cual es prácticamente imposible conocer las mismas para cada sitio. La metodologías más utilizadas incluyen los siguientes etapas para evaluar la amenaza sísmica:

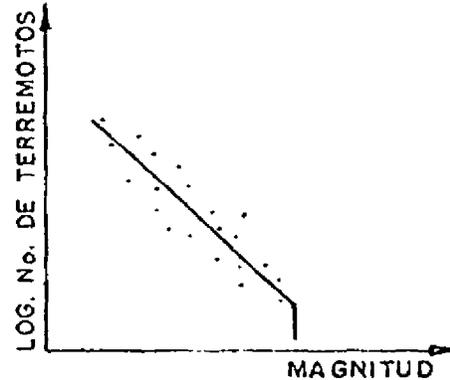
- **Definición de Zonas Sísmicas.** Evidentemente no todos los sitios están caracterizados por tener una alta sismicidad. El primer paso en el proceso de análisis es definir las zonas potenciales donde se pueden generar fuertes terremotos. Actualmente es ampliamente aceptado que la ocurrencia de los terremotos y la localización de sus epicentros está relacionada con la propiedades tectónicas y el sistema de fallas geológicas de la región. Para la definición de las zonas es necesario llevar a cabo la recolección de los datos existentes a cerca de las características sísmicas y tectónicas del sitio considerado.
- **Modelación Geométrica de las Fuentes Sísmicas.** La fuente de origen de los terremotos puede considerarse como un volumen dentro de la tierra, sin embargo en muchos casos una de sus tres dimensiones puede ser bastante mayor como en la mayoría de las fallas. Los modelos de las fuentes de origen que se utilizan para el análisis normalmente son (Cornell 1968) el punto, la línea, el círculo y el área. Esta modelación se justifica como una primera aproximación puesto que el error en sus resultados es comparable con el causado por la insuficiente cantidad de información y por la limitada definición de los parámetros de origen de los eventos.
- **Modelación de la Ocurrencia Sísmica.** El fenómeno sísmico, tal como se mencionó, es un proceso discreto estocástico no estacionario en el tiempo, el cual resulta muy complejo. Normalmente este fenómeno es modelado como un proceso discreto estocástico simple, tal como las pruebas de Bernoulli, los procesos de Poisson o los procesos de Markov en dos estados. Uno de los modelos más utilizados es el proceso estacionario estocástico de Poisson.

PASOS GENERALES PARA LA EVALUACION DE LA AMENAZA SISMICA

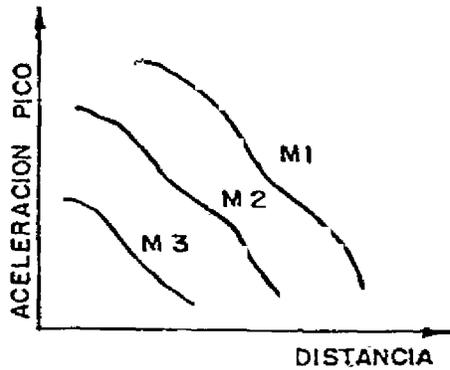
Tomada de Shah & Dong 1984



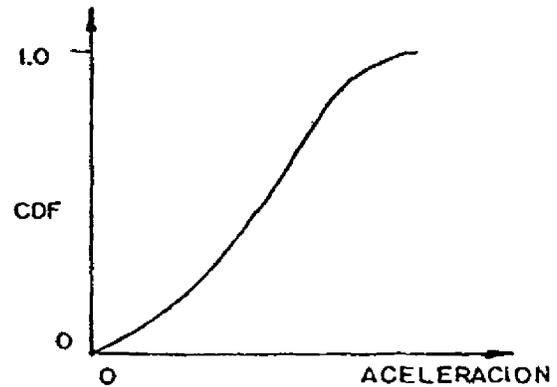
Paso 1
FUENTES



Paso 2
RECURRENCIA



Paso 3
ATENUACION



Paso 4
PROBABILIDAD DE NO-EXCEDENCIA

Determinación de la Distribución de Magnitudes. Puesto que el nivel de amenaza no sólo depende del número de veces que ocurre el fenómeno sino también de la magnitud del mismo, es necesario conocer la curva de recurrencia de eventos con diferentes magnitudes. Para el efecto se utilizan expresiones empíricas (Richter 1954) de la curva, obtenidas para cada sitio.

Determinación de las Funciones de Atenuación. Es claro que terremotos con diferentes magnitudes producen diferentes aceleraciones en un mismo sitio, así también terremotos con iguales magnitudes pueden producir diferentes aceleraciones a diferentes distancias. Sin embargo, el problema no es muy simple porque las aceleraciones no sólo son afectadas por la magnitud M y la distancia R sino también por otros factores como las propiedades del medio por donde se propagan las ondas sísmicas, las propiedades locales del suelo en el sitio y la topografía. Actualmente se aplican curvas promedio obtenidas del análisis estadístico de los catálogos de eventos que sólo son definidas en términos de la magnitud y la distancia hipocentral.

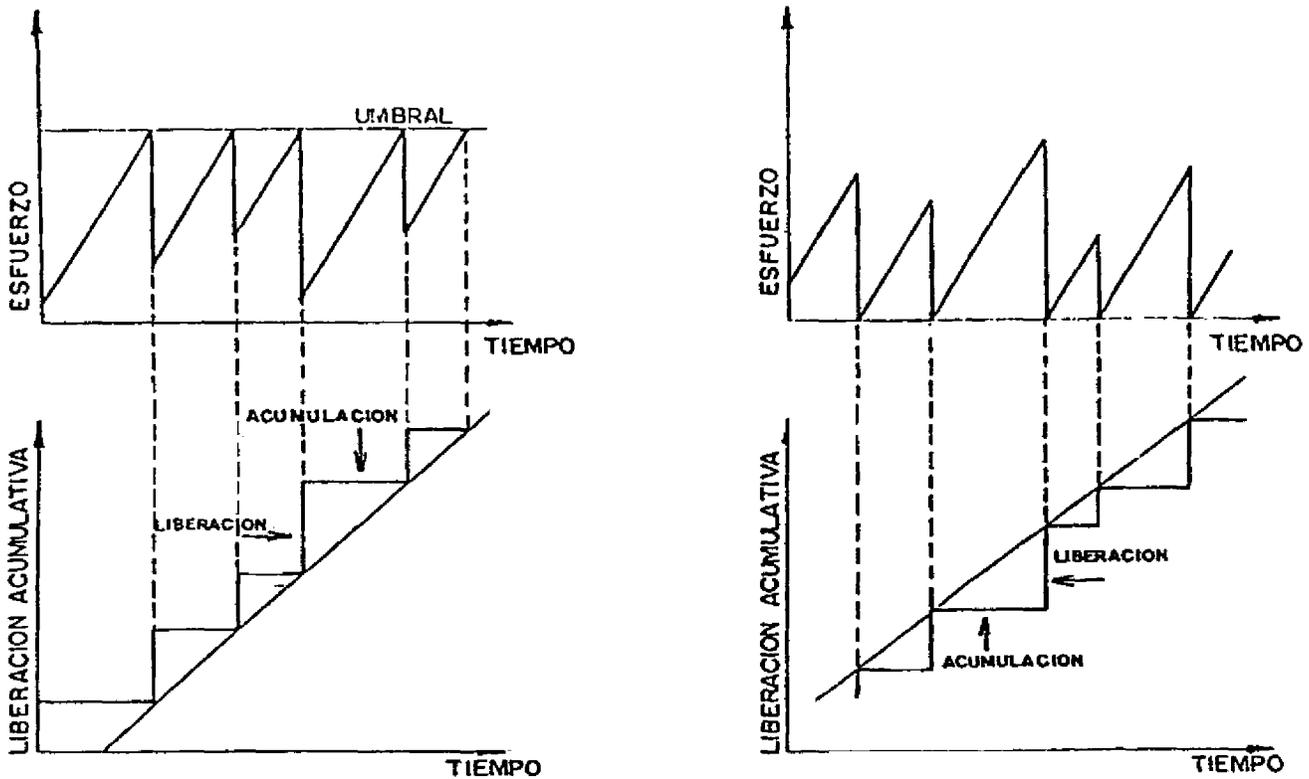
- Evaluación de la Amenaza Sísmica. Los parámetros que definen la amenaza sísmica son la función de distribución acumulativa de probabilidad de los valores máximos del parámetro que expresa el movimiento del suelo, el período de retorno de los terremotos con diferentes intensidades y el nivel de probabilidad del máximo movimiento del suelo relacionado con el período de retorno. Las técnicas más utilizadas (Cornell, Esteva) proveen un método para la integración de las influencias individuales de las fuentes potenciales de terremotos, lejos y cerca, más activas o menos, dentro de la distribución de probabilidad de valores máximos anuales. Una vez desarrollada una red de puntos de análisis en una región puede construirse un mapa que exprese la amenaza como contornos de igual aceleración pico con cierta probabilidad de no excedencia para un período de tiempo determinado o como contornos de igual período de retorno para ciertos niveles máximos de aceleración pico del suelo.

En general la amenaza sísmica se podría expresar en términos de la aceleración pico del suelo, la velocidad pico, el espectro de respuesta, la duración de la excitación, el contenido frecuencial, y todos aquellos parámetros que pueden afectar las estructuras después de cierto nivel. Uno de los parámetros más utilizados ha sido la intensidad en la Escala Modificada de Mercalli debido a que con ésta es posible asignar una intensidad a eventos históricos bien documentados e incluirlos en el catálogo de eventos ocurridos. Los métodos más frecuentemente utilizados para evaluar la amenaza han sido los desarrollados por Cornell (1968,1971) y Esteva (1964), los cuales permiten obtener las relaciones entre el parámetro representativo del movimiento del suelo y su período de retorno promedio para el sitio, considerando relaciones geográficas arbitrarias entre el sitio de análisis y la fuente potencial del movimiento.

Desafortunadamente, debido a la descripción limitada del fenómeno, la insuficiente cantidad de registros a cerca de los eventos y a las incertidumbres inherentes a las hipótesis utilizadas para la modelación se ha llegado a concluir (Vere-Jones, 1983) que en algunos casos podrían llegar presentarse errores en la estimación de las probabilidades en un factor de 4 a 5 para sismos moderados y dos veces, quizá, estas cantidades para movimientos más fuertes. Por esta razón, en la actualidad se han propuesto modelos con "memoria en el tiempo" basados en las cadenas de Markov para resolver el problema que representa la modelación tradicional del fenómeno considerando independencia de los eventos en el tiempo y el espacio. También, se han propuesto modelos basados en probabilidad Bayesiana que permiten combinar de una manera más adecuada la información histórica, los registros actuales y la información geológica. Otras dificultades como la imprecisión en la determinación de la intensidad, estimada de la información obtenida del daño en las edificaciones sin tener en cuenta el tipo de edificación, y la utilización de la aceleración del suelo como un único parámetro representativo del movimiento ha conducido, actualmente, al refinamiento de técnicas para obtener parámetros más representativos (Milutinović, Kameda, 1983), como la Aceleración Equivalente EQA y el Espectro de Respuesta Efectivo ERS que incluye factores equivalentes a la duración del evento, al contenido frecuencial y al comportamiento inelástico. Estos últimos desarrollos del estado del arte conducirán a determinar con mayor precisión la amenaza a nivel global y local en regiones y asentamientos urbanos a través de estudios generales

y de microzonificación sísmica que incluyan, adicionalmente, los efectos locales del suelo. Debe enfatizarse que en la medida en que la amenaza sísmica sea evaluada de una forma más confiable igualmente confiable será la evaluación del riesgo sísmico, el cual está relacionado directamente con los parámetros descriptivos de la amenaza.

MODELOS DE OCURRENCIA CON DEPENDENCIA EN EL TIEMPO



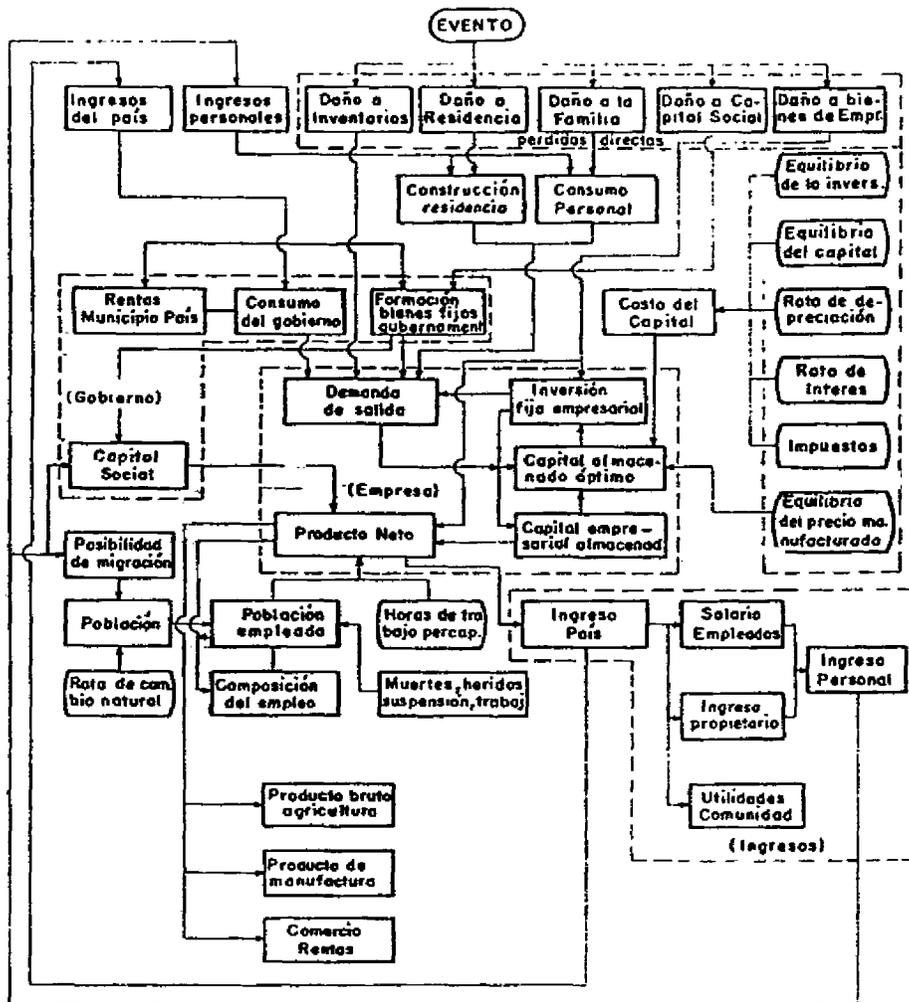
Tomada de Shah & Dong 1984

IDENTIFICACION DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS

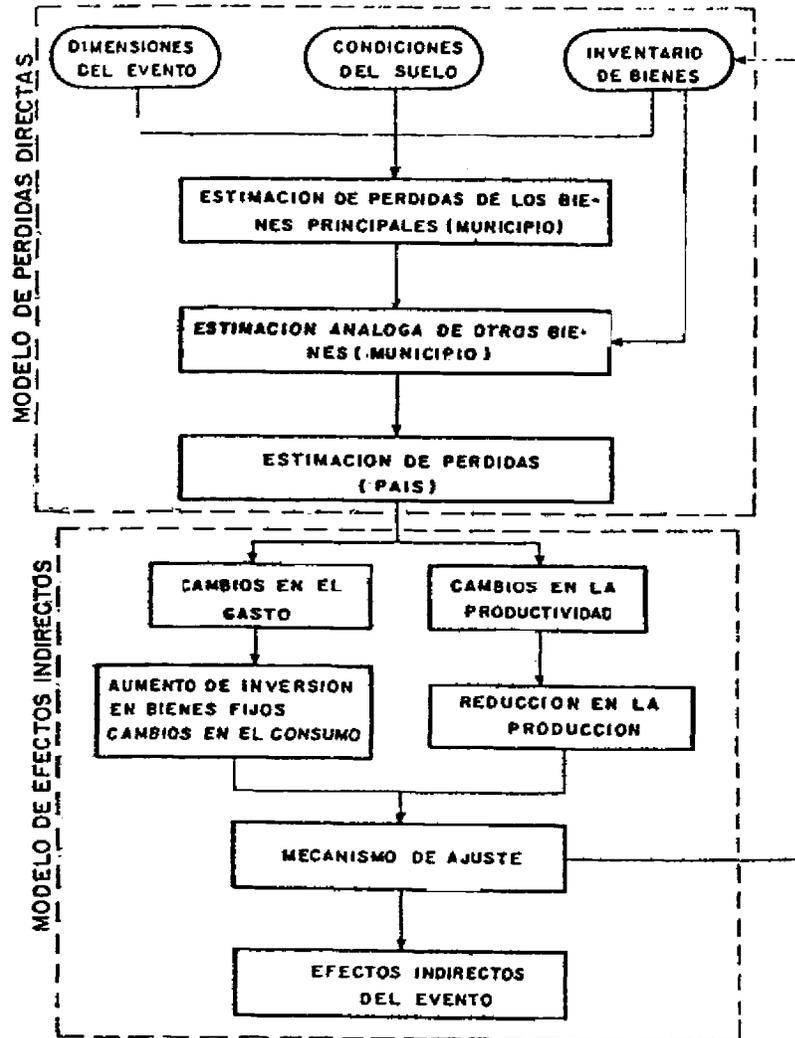
Una vez conocido el nivel de amenaza sísmica es necesario identificar los elementos sometidos a riesgo en la región considerada. Dicha identificación es, en otras palabras, la definición de un modelo de pérdidas o efectos para la región.

Las pérdidas pueden ser directas e indirectas. El modelo de pérdidas directas está relacionado con el daño físico, expresado en víctimas, daños en la infraestructura de servicios, en la vivienda, en las empresas, etc. Los efectos o pérdidas indirectas generalmente pueden clasificarse en efectos sociales tales como la interrupción del transporte, de los servicios públicos, de los medios de información y la desfavorable imagen que toma la región con respecto a otras; y en pérdidas económicas indirectas que representan los efectos en el comercio y la industria como consecuencia de la baja en la producción, la desmotivación de la inversión y los gastos de rehabilitación.

MODELO DE EFECTOS INDIRECTOS



ESTRUCTURA DEL MODELO DE PERDIDAS DIRECTAS
Y DEL MODELO DE EFECTOS
INDIRECTOS



Para estimar el tipo de desastre posible o la inversión necesaria para mitigar las consecuencias es necesario formular un modelo de pérdidas y efectos a largo plazo que interrelacione los efectos indirectos y el nivel de pérdidas directas, con el fin de proveer un mecanismo de ajuste entre demanda acelerada de inversiones por reparación y reconstrucción y la desaceleración en la producción como consecuencia del evento.

EVALUACION DEL DAÑO Y FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Para poder definir el modelo de pérdidas y efectos sobre la región considerada es necesario realizar una evaluación del daño causado sobre los elementos expuestos en eventos anteriores. Esta evaluación debe llevarse a cabo utilizando un procedimiento unificado sobre la región, que permita construir una base de datos consistente de los daños, y así realizar una estimación confiable de las pérdidas y una adecuada toma de decisiones a cerca de las medidas pre y posdesastre.

Para cada tipo de elemento sometido a riesgo pueden determinarse, conocido el inventario de daños, relaciones entre el parámetro descriptivo de la intensidad y el nivel de daño ocurrido. Estas relaciones conocidas como funciones de vulnerabilidad empírica u observada expresan las pérdidas específicas para un rango de amenaza sísmica considerado.

Uno de los objetivos de llevar a cabo la evaluación de los daños bajo una metodología única y consistente es la obtención de las funciones de vulnerabilidad empírica de una amplia y confiable base de información estadística. Ahora bien, si se pretenden llevar a cabo estudios de costo/beneficio a cerca de la efectividad relativa de intervenciones definidas por diferentes medidas posibles de mitigación del riesgo no sólo es necesario conocer las funciones de vulnerabilidad empírica sino las funciones de vulnerabilidad teórica o esperada, las cuales son obtenidas de la modelación del comportamiento estructural de acuerdo con el estado actual del conocimiento en el tema.

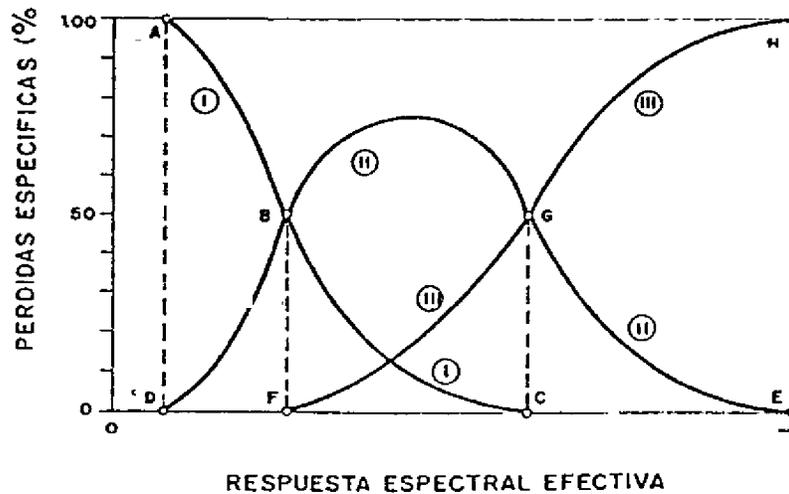
Conocido el comportamiento de varios tipos de estructuras expuestas a diferentes intensidades de excitación del suelo podría realizarse una proyección o predicción de los daños esperados que pueden ocurrir en tales estructuras en futuros eventos. Por esta razón las funciones de vulnerabilidad derivadas para la estimación de las pérdidas específicas de los elementos existentes sometidos a riesgo pueden utilizarse como información básica para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo en general, pues conocida la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras, y de otros componentes equivalentes a los elementos sometidos, por convolución de estas dos variables podría determinarse el riesgo sísmico.

Los análisis de vulnerabilidad involucran tres etapas: a) la caracterización del movimiento del suelo; b) la caracterización de los efectos de la acción sísmica (grado del daño) en las estructuras consideradas; y c) la definición y caracterización de los elementos o tipos de estructuras consideradas.

La acción sísmica comúnmente se describe con un solo parámetro, tal como se mencionó en otro aparte de este documento. En la actualidad se ha tratado de utilizar parámetros que permitan describir en la forma más completa posible la acción de los terremotos, tales como la Aceleración Efectiva y el Espectro Efectivo (Milutinović, Petrovski 1985). La caracterización de los efectos, es decir el daño sísmico, usualmente se describe en términos del costo de reparación, del porcentaje del daño o de un valor que califique el nivel de la pérdida específica. Finalmente, la definición de los elementos o tipos de estructuras en general se refiere a una amplia clasificación de tipologías. Un ejemplo podría ser a) Edificaciones en mampostería simple; b) Edificaciones en mampostería confinada; c) Edificaciones con pórticos en concreto reforzado; d) Otras edificaciones; todas con otras posibles subdivisiones tales como: con diafragmas flexibles, con diafragmas rígidos, con muros de cortante, etc.

También, con el fin de incluir los efectos locales, se desarrollan las funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de suelos, por ejemplo: Sobre roca, Sobre arcillas volcánicas, Sobre suelos aluviales, etc.

FUNCIONES DE VULNERABILIDAD EMPIRICA PARA CATEGORIAS ADOPTADAS DE DAÑO/FUNCIONABILIDAD



Torada de Petrovski 1984

La figura ilustra el concepto general empleado para derivar las funciones de vulnerabilidad empírica. Las tres curvas identificadas con la notación I, II y III hacen referencia a la relación de daños según la siguiente formulación:

$$RD_I = \frac{\text{Número de Edificaciones que No Reportan Daño}}{\text{Número Total de Edificaciones}} = \frac{NED_I}{NE}$$

$$RD_{II} = \frac{\text{Número de Edificaciones que Reportan Daño}}{\text{Número Total de Edificaciones}} = \frac{NED_{II}}{NE}$$

$$RD_{III} = \frac{\text{Número de Edificaciones Destruídas}}{\text{Número Total de Edificaciones}} = \frac{NED_{III}}{NE}$$

En otras palabras, NED_I es el número de edificaciones sin o con un leve daño en los elementos no estructurales y con un daño despreciable en los elementos estructurales; NED_{II} es el número de edificaciones que reportan un intenso daño en los elementos no estructurales y un daño moderado en los elementos de la estructura; NED_{III} es el número de edificaciones que sufrieron colapso, que no se justifica ni económica ni técnicamente tratar de repararlas o reforzarlas y NE es el número total de las edificaciones para la región considerada.

Es importante resaltar que existe una interrelación en esta formulación entre la clasificación del daño y las categorías de uso o funcionalidad de las edificaciones así: I, edificaciones utilizables; II, edificaciones temporalmente utilizables; y III, edificaciones inutilizables, inmediatamente después del evento.

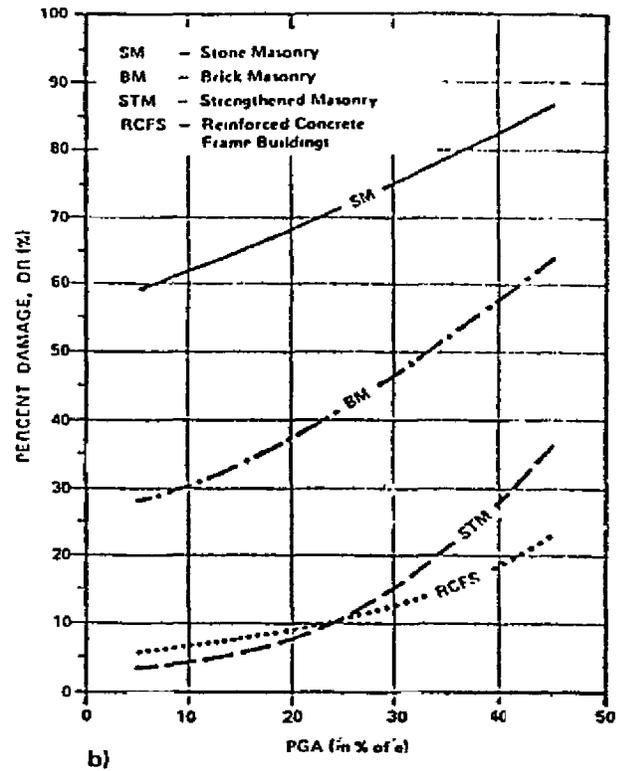
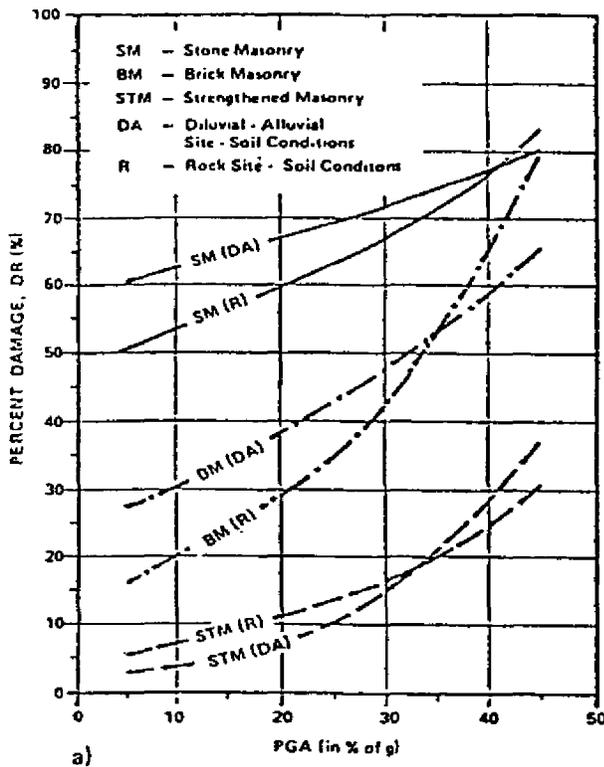
Es claro que de acuerdo con esta definición las funciones de vulnerabilidad para la región considerada suman el 100%:

$$ED_I + ED_{II} + ED_{III} = 1$$

de esta manera puede evaluarse la cantidad de edificaciones en cada categoría o el área correspondiente de edificaciones utilizables, temporalmente utilizables y inutilizables para un futuro evento en la zona.

Modelos similares a éste son usados por técnicos y especialistas en la evaluación del riesgo sísmico en diversas partes del mundo. En la actualidad existe un número significativo de estas metodologías, sin embargo, con algunas excepciones, no se han desarrollado técnicas de amplia aplicación que permitan la reutilización o adecuación de las funciones de vulnerabilidad en otras regiones diferentes que para las que fueron desarrolladas. Esto se debe, fundamentalmente, a la significativa variación de las tipologías de las edificaciones de una región a otra. Por otra parte, también existe un gran número de procedimientos para la evaluación de los daños causados por terremotos, base fundamental para obtener la funciones de vulnerabilidad empírica, los cuales pueden clasificarse básicamente en dos grupos: procedimientos generales y procedimientos detallados. Los primeros son más imprecisos pero menos costosos y los segundos pueden llegar a dar mejores resultados puesto que consideran un amplio número de variables tanto de la edificación, del suelo, de la geología, etc., pero resultan más complejos y por lo tanto más costosos.

FUNCIONES DE VULNERABILIDAD



Vulnerability Functions for D/U-C-(II+III)

a) Site - Dependent Functions ; b) Generalized Functions.

Tomada de Milutinović &
Petrovski 1985

Tal como ya se mencionó, es necesario utilizar una metodología única para la evaluación de los daños sísmicos con el fin de obtener resultados confiables en la estimación de la vulnerabilidad. En la actualidad, para cumplir con este requisito, se han desarrollado varias técnicas que permiten llevar a cabo las evaluaciones a través de formularios de inspección de daños elaborados con base en criterios bien definidos por especialistas. Programas de computador han sido desarrollados para acceder y procesar la información con el fin de obtener el nivel de pérdidas específicas de los elementos y posteriormente la convolución de la amenaza sísmica con la vulnerabilidad. También, sistemas expertos basados en las nuevas concepciones de la inteligencia artificial hoy se perfilan como excelentes herramientas para llevar a cabo el diagnóstico unificado de los daños y la evaluación del riesgo sísmico en general.