

ENFOQUE METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO SÍSMICO

Omar Darío 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 regional y urbano de poblaciones y ciudades en áreas propensas. La planificación puede mitigar los efectos de los terremotos o de otros riesgos naturales y reducir el nivel de riesgo existente mediante la aplicación de técnicas que incluyen los principios básicos de la Ingeniería Sísmica y la Sismología.

El riesgo puede reducirse si se entiende como el resultado de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un evento, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, o factor interno de selectividad de la severidad de los efectos sobre dichos elementos. Medidas estructurales, como la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones y medidas no estructurales, como la regulación de usos del suelo pueden mitigar las consecuencias de un evento sobre una región o población. Para el efecto es necesario evaluar el escenario probable de efectos directos e indirectos de la región expuesta con el fin de definir el nivel de riesgo existente y las medidas para su mitigación, la eficiencia de las mismas y su orden de prioridades.

INTRODUCCION

Fenómenos naturales de origen geológico, hidrológico y atmosférico tales como terremotos, erupciones volcánicas, movimientos en masa, maremotos, inundaciones, huracanes, etc. o posibles eventos desastrosos originados por tecnologías peligrosas tales como accidentes provocados por el hombre o por fallas técnicas, son eventos que representan un peligro latente que bien puede considerarse como una amenaza para el desarrollo social y económico de una región o un país.

Entre este tipo de eventos que ofrecen alto riesgo a las regiones expuestas sobresale por su peligrosidad en el continente: el riesgo sísmico. Varios países del área no solamente tienen zonas con un alto grado de amenaza

* Asesor Oficina Nacional para la Atención de Desastres ONAD Presidencia de la República Colombia
Ingeniero Civil Universidad Nacional - Cursos de Posgrado en Diseño Sismoresistente y Estudios de Vulnerabilidad en el IZIIIS Yugoslavia - Miembro Asociación de Ingeniería Sísmica Comité AIS-100
Miembro Earthquake Engineering Research Institute EERI - Miembro American Concrete Institute ACI
Comité ACI-118. Correspondencia: Apartado Aéreo 92838 Bogotá, Colombia.

sísmica, o probabilidad de ocurrencia de terremotos de gran magnitud, sino también grandes centros urbanos densamente poblados localizados en dichas zonas, que ofrecen por sus características de desarrollo urbano y sus tipos de vivienda e infraestructura un alto grado de vulnerabilidad.

Países de desarrollo lento no están en capacidad de perder como ya ha ocurrido en el pasado, cientos de millones de dólares en 20 o 30 segundos. Cifras en muchos casos incalculables en eventos cuyos costos directos y obviamente indirectos pueden llegar a un inmenso porcentaje del Producto Interno Bruto. Varios países del continente pueden tener en general 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 la balanza de pagos y en general el desarrollo económico de los mismos.

Las medidas de prevención contra los efectos desastrosos deben tomarse siempre en el estado de elaboración de los planes de desarrollo integral a nivel regional y urbano con a fin de reducir el nivel de riesgo existente. Dado que eventos de esta naturaleza pueden causar grave impacto en el desarrollo de comunidades expuestas, es necesario enfrentar la ejecución de medidas preventivas versus la recuperación posterior a los desastres, e incorporar los análisis de riesgo a los aspectos sociales y económicos de cada región o país.

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 del conocimiento de los profesionales involucrados y la investigación y el desarrollo de una metodología, adecuada para el 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.

Este documento ilustra una metodología que permite cuantificar el riesgo sísmico una vez se determinen los parámetros que valoran la amenaza sísmica en una región y se conozca el grado de vulnerabilidad de los elementos expuestos, los cuales corresponden a los tipos de edificaciones, las líneas vitales, la infraestructura y en general a los bienes de la comunidad expuesta.

El conocimiento del escenario de efectos en función de la vulnerabilidad de los elementos que lo componen permite determinar para varios eventos probables con diferentes periodos de retorno el valor del daño probable y la cuantificación de las pérdidas para cada evento; lo que permite determinar la relación costo beneficio de las medidas que se determinen para la prevención y mitigación del riesgo. Adicionalmente, otras actividades de prevención como la preparación y organización para la atención y rescate pueden ser beneficiadas por el conocimiento del escenario, el cual puede aportar la cuantificación de probables pérdidas humanas y la forma más eficiente para llevar a cabo la atención de la población una vez haya ocurrido el evento.

DEFINICION DE RIESGO

En la terminología técnica, actualmente se distinguen dos conceptos cualitativamente diferentes pero en ocasiones equivocadamente considerados como sinónimos:

La Amenaza o Peligro (H, Hazard), definida como una probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un sitio específico y en un período de tiempo determinado. Se representa por un peligro latente asociado con la ocurrencia de un fenómeno físico (factor de riesgo externo) que puede causar efectos adversos en los elementos expuestos, y

El Riesgo (R, Risk), definido como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias socio-económicas en un sitio específico y dentro de un período de tiempo determinado, el cual puede reducirse o mitigarse puesto que no sólo depende de la amenaza (H) sino, también, de la vulnerabilidad de 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. Aquí 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 sismicidad o probabilidad de ocurrencia $p(M)$ y de la atenuación o pérdida de la energía sísmica con la distancia $p(I/M)$,

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

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,

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

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,

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

$p(P)$ 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 el desastre causarfa.

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

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

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.

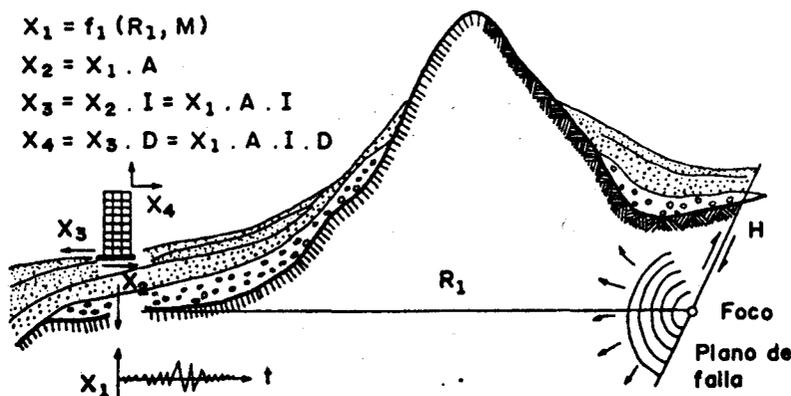
La vulnerabilidad, es decir la pérdida potencial específica de los elementos expuestos y el volumen de dichos elementos son las únicas variables que pueden ser modificadas por el hombre, y una vez modificadas se puede afectar o reducir el nivel de riesgo existente. Programas preventivos pueden mitigar 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 sísmo resistentes.

FACTORES INVOLUCRADOS EN LA PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA SISMICA



MOVIMIENTO DEL FRENTE DE ONDA
TERREMOTO DE MAGNITUD M

- X_1 . Sismo en la roca
- X_2 . Sismo en la superficie afectado por la topografía y la estratificación
- X_3 . Sismo afectado por la interacción suelo-estructura
- X_4 . Sismo afectado por las propiedades de la estructura

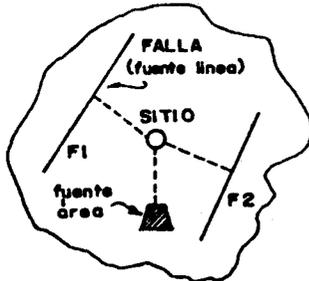
La amenaza sísmica representa un peligro potencial que puede expresarse como una probabilidad de que la intensidad de un evento no sea excedida durante un periodo de tiempo. Esta amenaza puede determinarse para diferentes periodos de retorno relacionados con la vida útil económica de los elementos sometidos 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 las 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:

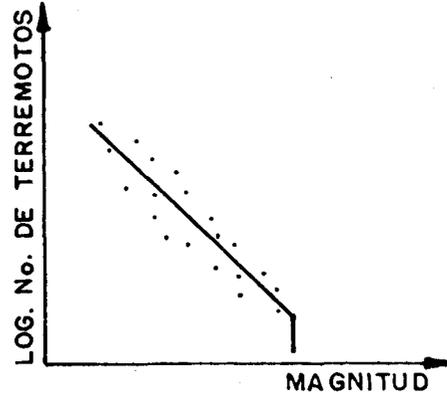
- **Definición de Zonas Sísmicas.** Evidentemente no todos los sitios están caracterizados por tener una alta sísmicidad. El primer paso en el proceso de análisis es definir las zonas potenciales donde se pueden generar fuertes terremotos. Actualmente es ampliamente aceptado que la ocurrencia de los 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

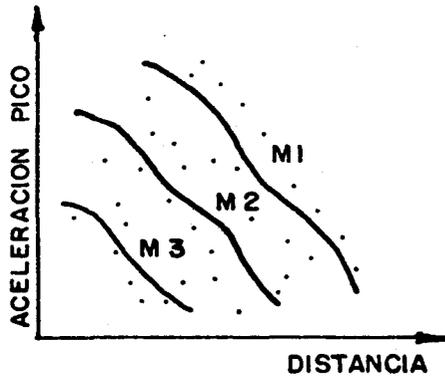
Tomada de Shah & Dong 1984



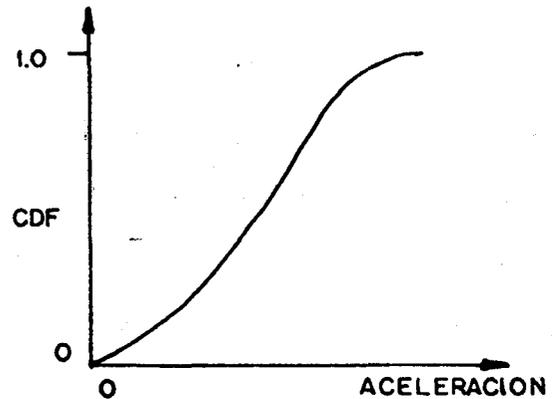
**Paso 1
FUENTES**



**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.

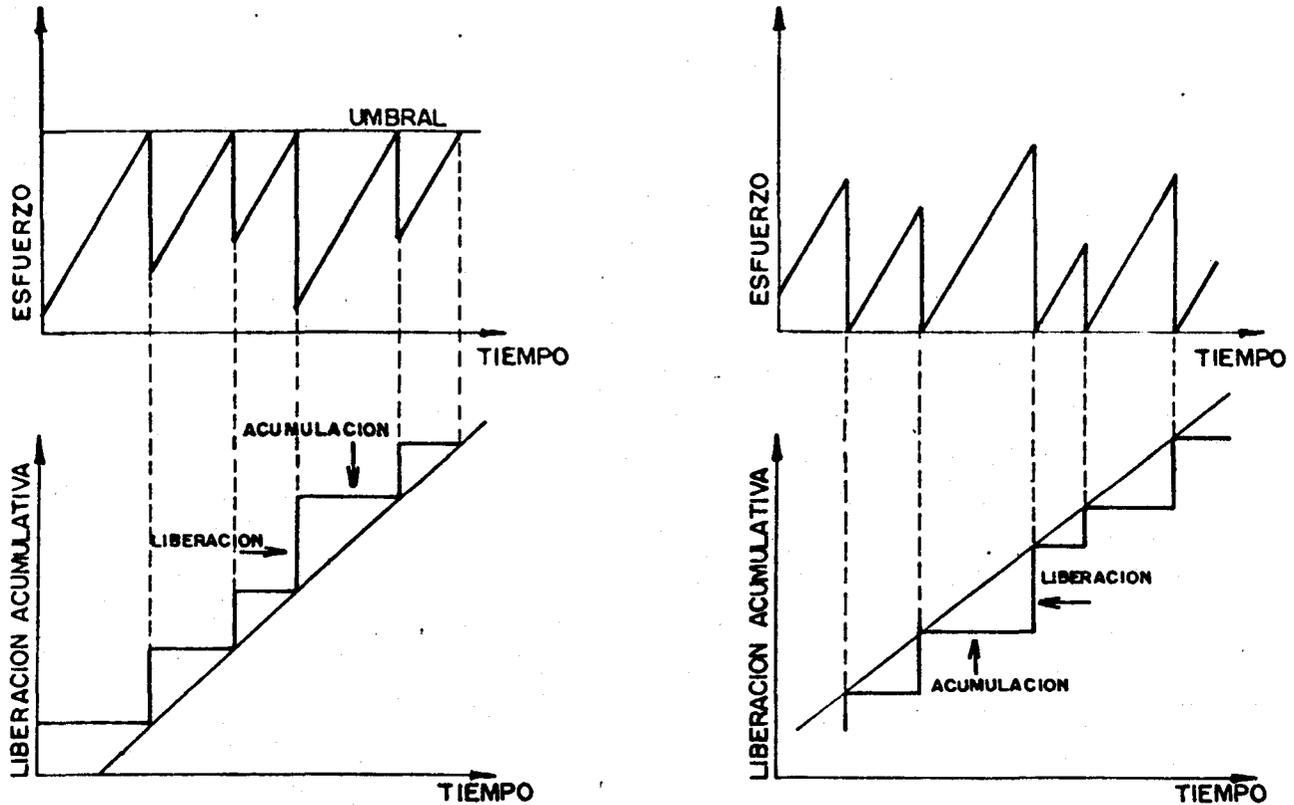
- **Evaluación de la Amenaza Sísmica.** Los parámetros que definen la amenaza sísmica son la función de distribución acumulativa de probabilidad de los valores máximos del parámetro que expresa el movimiento del suelo, el período de retorno de los terremotos con diferentes intensidades y el nivel de 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 acerca 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.

ESTIMACION DE PERDIDAS DIRECTAS

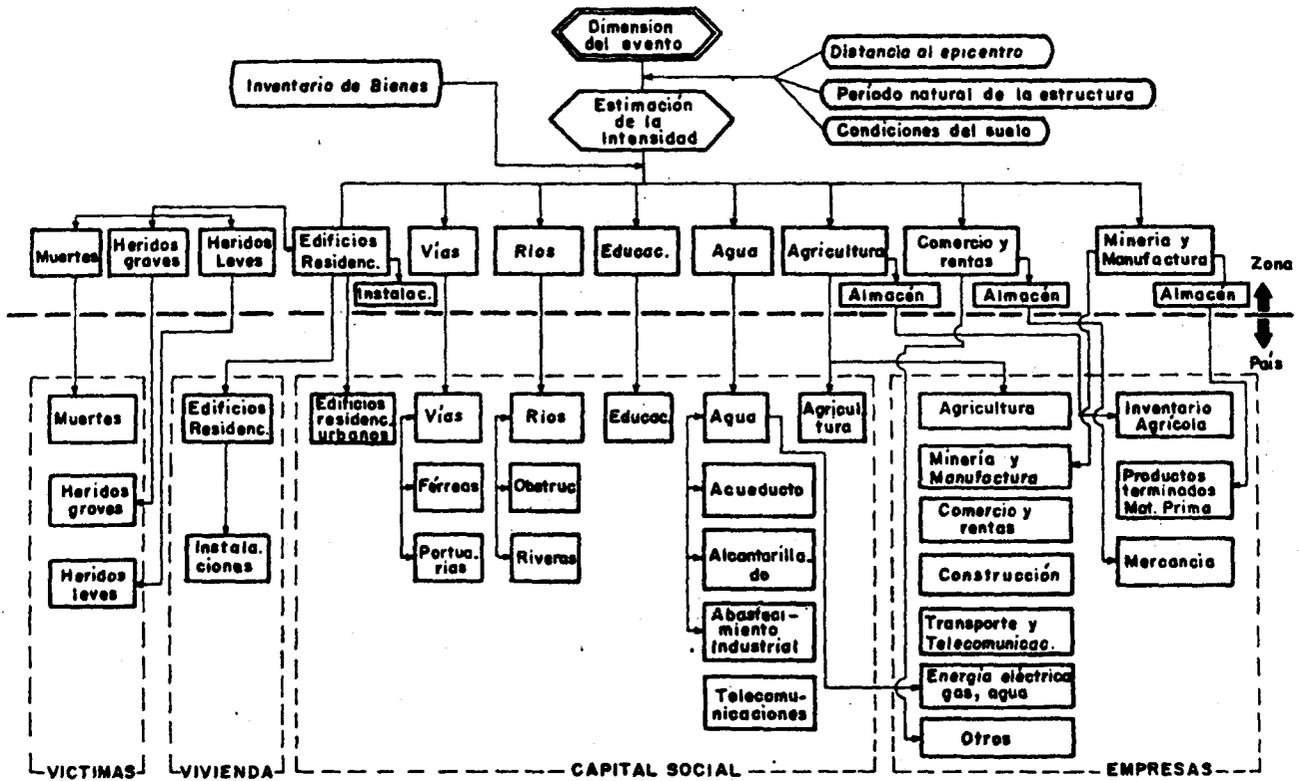


Figura No. 1

MODELO DE EFECTOS INDIRECTOS

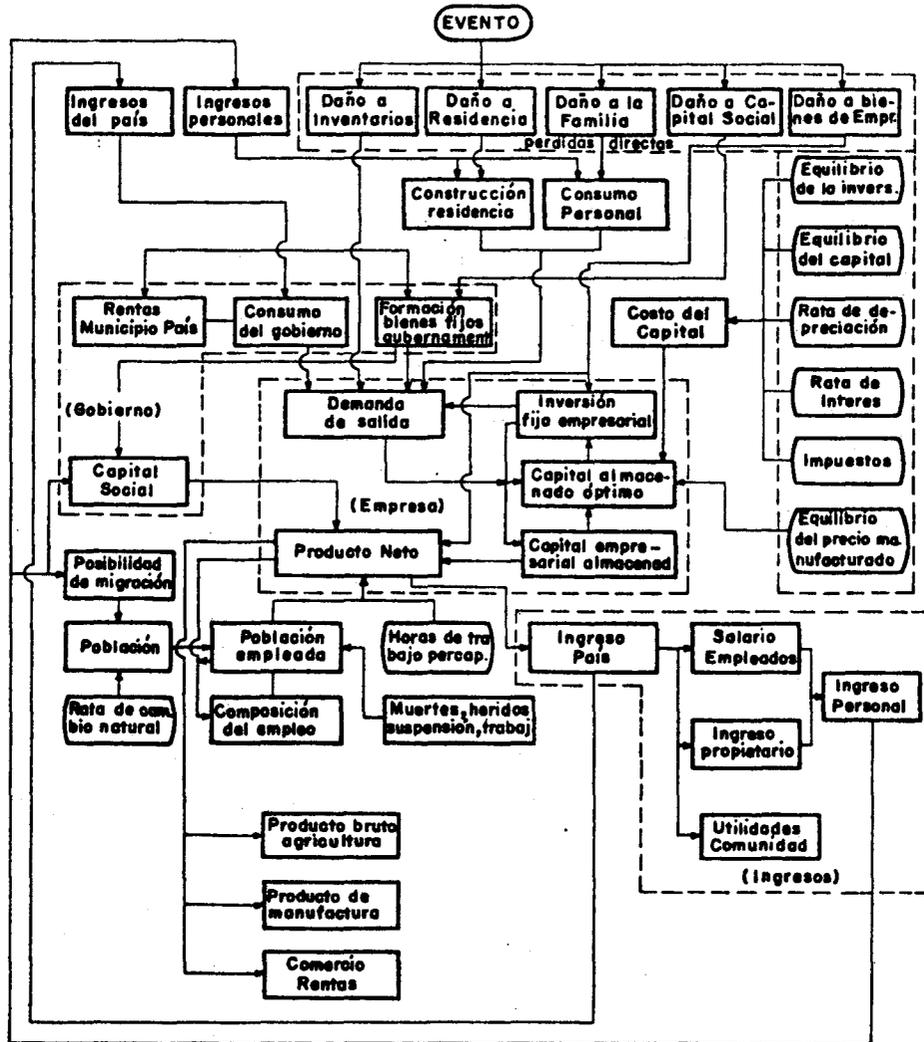


Figura No. 2

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

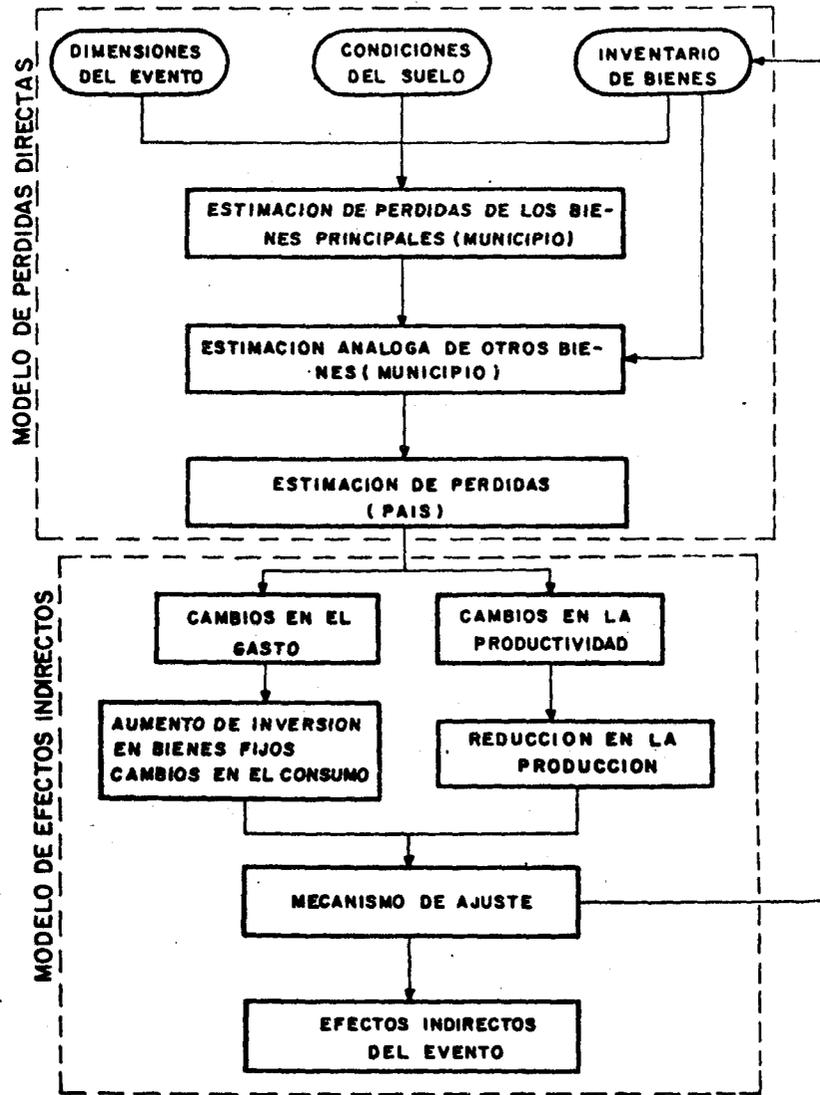


Figura No. 3

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.

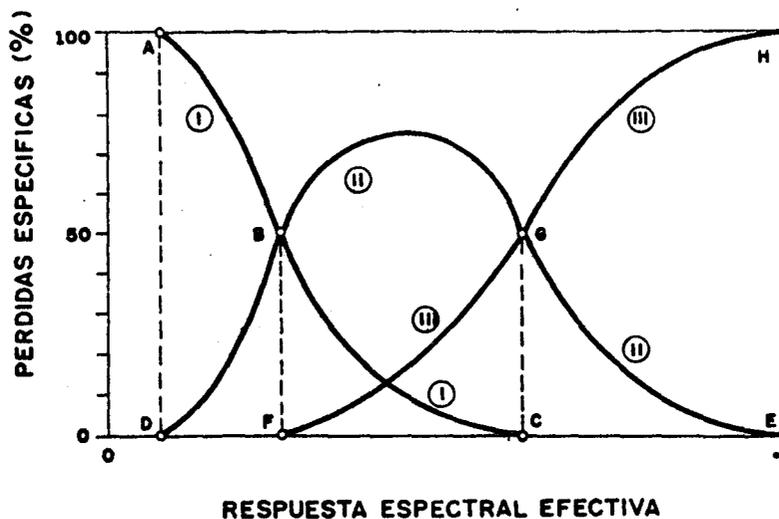
Conocido el comportamiento de varios tipos de estructuras expuestas a diferentes intensidades de excitación del suelo podría realizarse una proyección o predicción de los daños esperados que pueden ocurrir en tales estructuras en futuros eventos. Por esta razón las funciones de vulnerabilidad derivadas 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



Tomada 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.

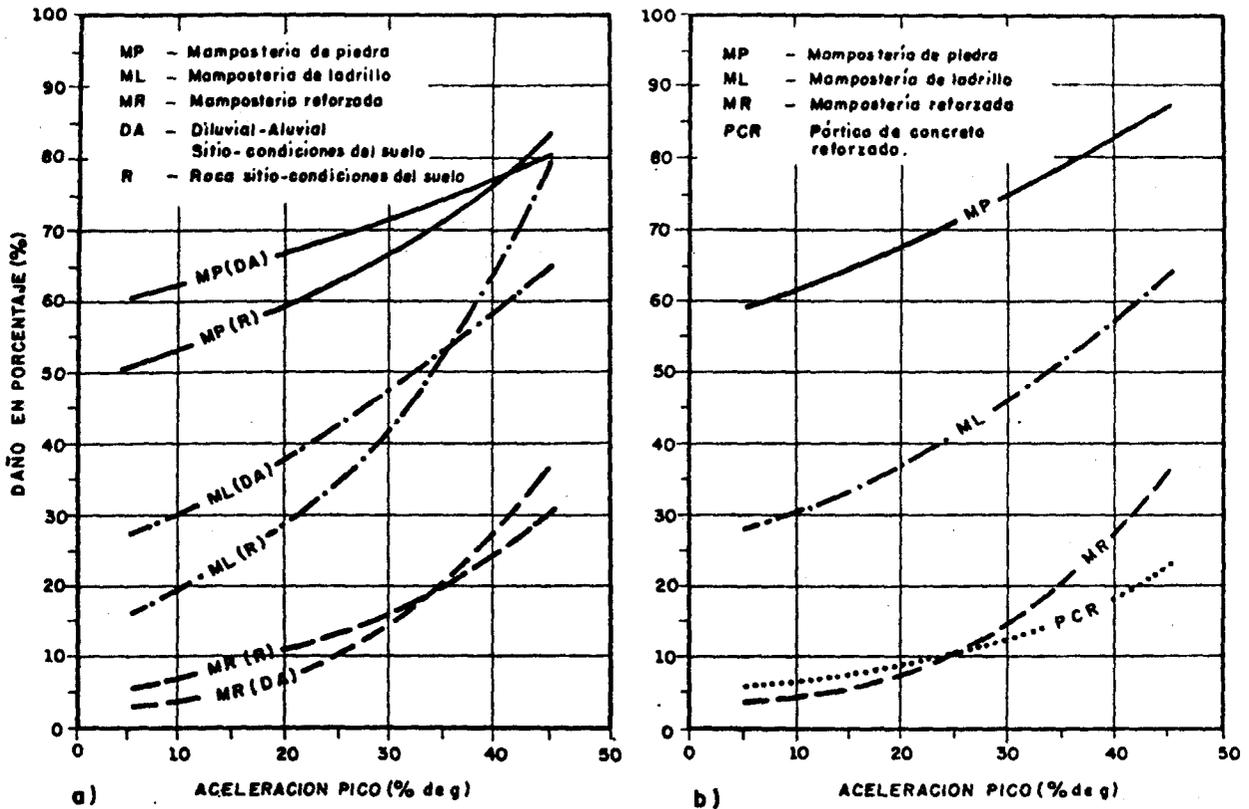
Es claro que de acuerdo con esta definición las funciones de vulnerabilidad para la región considerada suman el 100%:

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

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

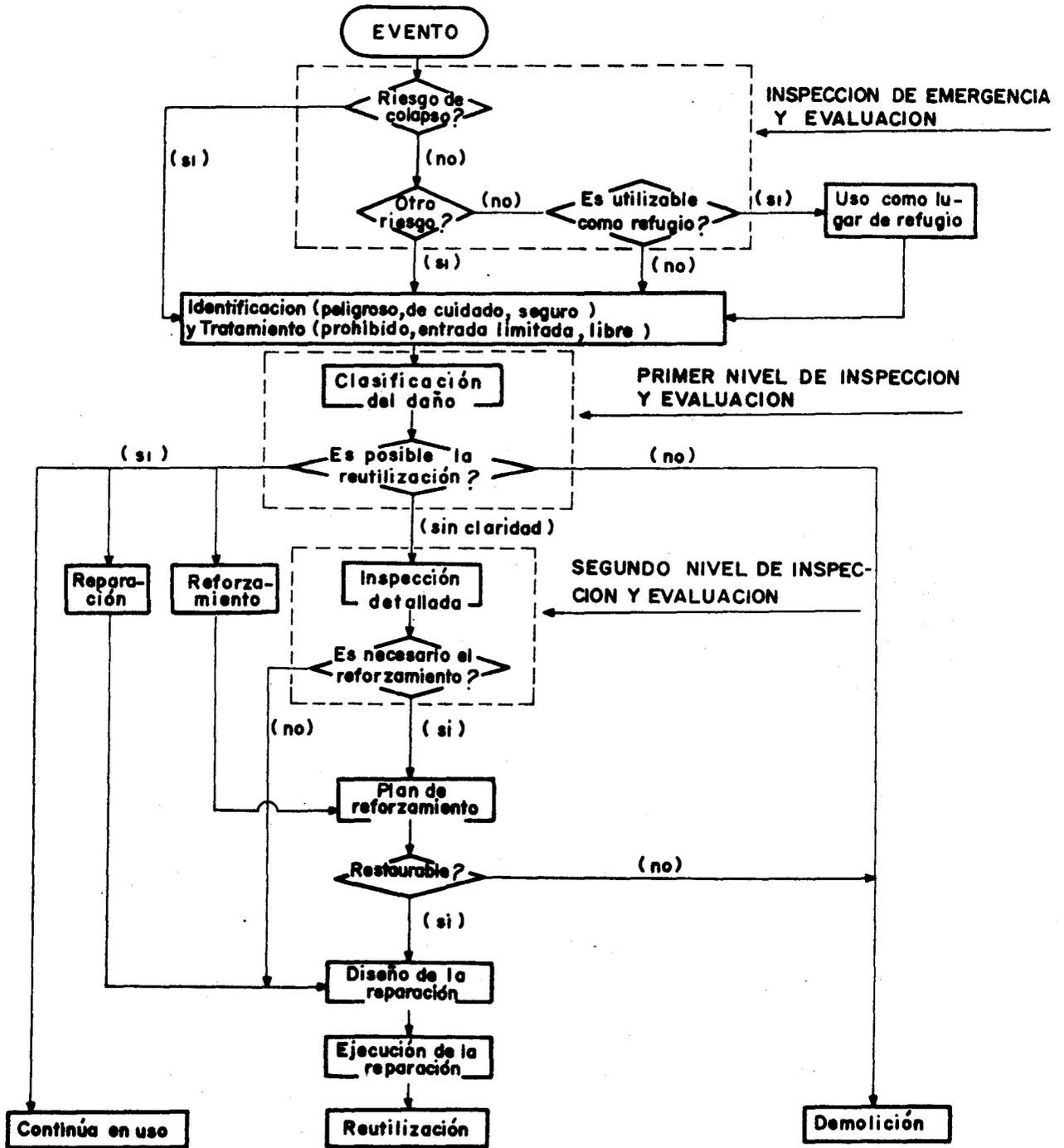


a) Sitio - Funciones dependientes; b) Funciones generalizadas

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 la 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.

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA LA INSPECCION Y EVALUACION



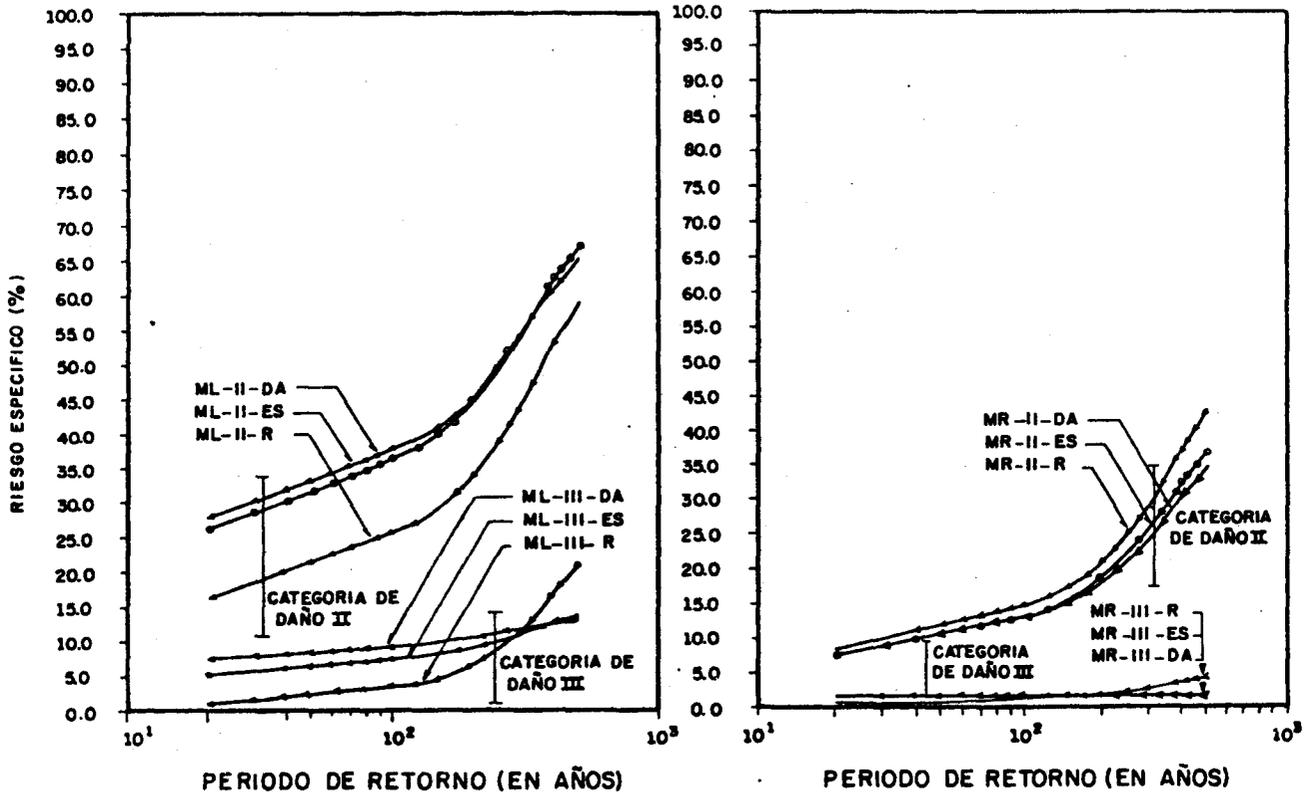
ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO ESPECIFICO

Para un escenario sísmico particular el riesgo sísmico específico se obtiene con base en las funciones de vulnerabilidad de los elementos considerados, asumiendo una distribución espacial uniforme de los mismos, y con base en los niveles de amenaza sísmica para dicho escenario.

El riesgo sísmico específico puede definirse como el nivel de pérdidas específicas esperables o probables para un escenario particular de eventos sísmicos. Esencialmente, entonces, para los diferentes tipos de edificaciones en sus respectivas categorías (no-sismoresistentes y sismoresistentes) en una región deben considerarse los diferentes niveles esperados de amenaza a que se encuentran sometidas dichas edificaciones durante su vida útil y una probabilidad de no excedencia justificada desde el punto de vista de la seguridad y el desarrollo económico de la región.

Esta forma de evaluar las pérdidas específicas no estima el total de pérdidas para un periodo de tiempo dado sino el total de pérdidas para un evento sísmico esperado que pueda ocurrir con un periodo retorno determinado, que a su vez está relacionado con un nivel de amenaza sísmica para el sitio con una predeterminada probabilidad de no excedencia.

RIESGO ESPECIFICO



Riesgo específico para ML

Riesgo específico-para MR

Tomada de Petrovski 1984

Las metodologías más ampliamente utilizadas se basan en el proceso de Poisson, el cual básicamente asume que la probabilidad del próximo terremoto es independiente del tiempo transcurrido desde la manifestación del último evento (proceso sin memoria), y aunque resulta inconsistente con la teoría del rebote elástico usualmente se acepta como un modelo que provee resultados satisfactorios (Epstein y Lomnitz, 1966) para el caso de fuertes terremotos. Con esta metodología se determinan las máximas aceleraciones horizontales para varios períodos de retorno y se relacionan con las funciones de vulnerabilidad definidas para los diferentes elementos sometidos.

Algunos modelos convierten las aceleraciones máximas obtenidas en espectros de respuesta u otros parámetros más completos, con los cuales se han desarrollado las funciones de vulnerabilidad empírica obtenidas de la base de datos de los daños ocurridos en eventos anteriores.

ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO TOTAL

El riesgo sísmico total puede determinarse conocido el riesgo sísmico específico de cada elemento considerado, obtenido para diferentes períodos de retorno y una probabilidad definida, y conocida la densidad, la distribución espacial y la vida útil económica de cada elemento sobre la región en estudio.

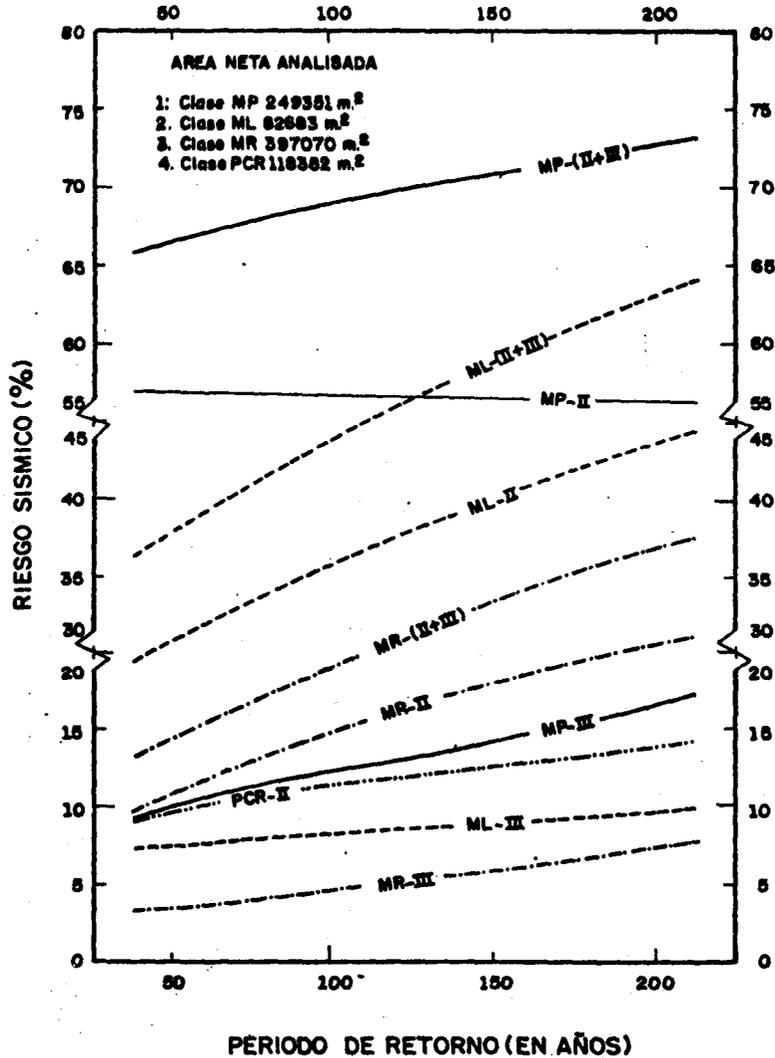
Para diferentes niveles específicos de amenaza sísmica puede evaluarse acumulativamente el riesgo sísmico total esperado para la región de acuerdo con la proporción de cada elemento en el inventario total de los mismos y de acuerdo con la distribución en el espacio del riesgo sísmico específico. De esta manera, el riesgo sísmico se puede expresar como la pérdida en términos del valor económico directo que representa o como la pérdida en términos de un porcentaje con respecto al volumen total de las propiedades.

En general el riesgo sísmico está en función de la amenaza H , las condiciones locales del sitio G , la vulnerabilidad urbana o elementos expuestos E y la vulnerabilidad específica V para cada elemento:

$$R = f(H, G, E, V)$$

La estimación del riesgo sísmico es de fundamental importancia para definir las medidas de planificación pre-desastre y manejo del riesgo en la zona considerada. Para varios escenarios posibles de "uso del suelo" proyectados por la planificación urbana la estimación del riesgo sísmico indicaría cual de las alternativas provee la menor pérdida económica para la región en su futuro desarrollo. A través de los planes de desarrollo urbano se pueden definir políticas de intervención para reducir el riesgo sísmico de tal manera que armonicen con su objetivo fundamental de obtener una mejor calidad de la vida para las personas. Aunque el objetivo de la planificación ha sido tradicionalmente el mejoramiento de la calidad de vida urbana, en zonas propensas un ingrediente adicional debe tenerse en cuenta: la seguridad.

RIESGO SISMICO



Presentación resumida del riesgo sísmico

Tomada de Petrovski 1984

REDUCCION DEL RIESGO SISMICO

La evaluación del riesgo depende fundamentalmente de la acertada definición del modelo de pérdidas sobre los elementos expuestos, teniendo en cuenta la información que puede suministrar la evaluación de daños producidos por terremotos anteriores. En particular es de especial importancia la obtención de las funciones de vulnerabilidad o la relación de las pérdidas específicas con el parámetro descriptivo de la intensidad, puesto que es éste el paso de mayor sensibilidad del procedimiento.

Determinado el modelo de pérdidas y evaluado el nivel de riesgo existente se pueden definir, a través de los planes de desarrollo urbano y regional, políticas de mitigación o reducción del mismo y los niveles de intervención necesarios para alcanzar un nivel prefijado de seguridad. Estas políticas están relacionadas con:

- La desdensificación de zonas urbanas localizadas en áreas de alta sensibilidad, reconocidas por la amenaza estimada de la microzonificación sísmica y de la vulnerabilidad de los elementos sometidos;
- La relocalización de elementos de vital importancia, como la infraestructura de servicios públicos, fundamental después de la manifestación del evento;
- La modificación del grado de vulnerabilidad de elementos que no pueden ser relocalizados, mejorando su resistencia a las sollicitaciones que pueden esperarse del sismo probable en la zona, en especial de aquellos elementos usualmente denominados "tradicionales", los cuales no han sido diseñados para soportar solamente cargas gravitacionales y que ofrecen un alto grado de vulnerabilidad; y
- La definición estratégica de áreas de emergencia en las cuales se establecerán las viviendas temporales para alojar la población después del evento. Estas áreas corresponden normalmente a los espacios públicos de diversión y entretenimiento.

Estas políticas deben tenerse en cuenta en adición a las políticas convencionales de desarrollo urbano en regiones localizadas en áreas propensas, puesto que son parte fundamental del desarrollo económico y social de dichas regiones y su no consideración puede llegar a presentar resultados desastrosos. El no tener en cuenta las variables de riesgo sísmico urbano en la definición del "uso del suelo" podría llegar en un alto número de casos a aumentarlo, lo cual sería desafortunado y podría llegar a calificarse como un acto de negligencia de los planificadores, administradores y encargados del manejo de la región.

Además de las políticas de mitigación del riesgo que deben llevarse a cabo en la planificación urbana y regional existen otras medidas de pre-desastre y pos-desastre que deben implementarse como parte de las actividades y programas de seguridad, con el fin de crear un marco adecuado y consistente que permita una flexible toma de decisiones para la efectiva e inmediata rehabilitación y revitalización de las actividades industriales, económicas y sociales de las zonas afectadas.

ACTIVIDADES PREDESASTRE

Fundamentalmente, a nivel de medidas pre-desastre, tal como se ha ilustrado en este documento debe llevarse a cabo una evaluación científica del riesgo sísmico partiendo de la premisa irrefutable de que una región afectada por movimientos sísmicos fuertes en el pasado está expuesta a sufrir las consecuencias de la manifestación de innumerables sismos moderados y la alta probabilidad de la manifestación de un sismo de proporciones catastróficas. Es responsabilidad de las autoridades gubernamentales el promover que los planes maestros de desarrollo urbano incorporen criterios de seguridad sísmica, basados en la determinación de niveles económicamente justificados de riesgo sísmico aceptable, que asegure que el nivel de daño estimado permita el uso sin peligro de las edificaciones, los servicios

públicos y otras estructuras de vital importancia ante la manifestación de un evento esperado.

Las autoridades, los organismos de socorro y las entidades nacionales con anticipación, deben llevar a cabo un plan de mitigación del riesgo y de protección civil que cumpla los siguientes objetivos:

- Definición del escenario de riesgo con base e la estimación de la magnitud del desastre en términos de daños y funcionalidad de las edificaciones que podrían ser utilizadas posteriormente al evento. Esta etapa involucra necesariamente la evaluación de la amenaza sísmica, la identificación de los elementos expuestos, la evaluación de los riesgos de segundo orden y los análisis de vulnerabilidad de dichos elementos que permitan definir los niveles de riesgo específico;
- Cuantificación de datos para la planificación urbana y preparación de planes de emergencia y contingencia que definan con anterioridad y de acuerdo con las características de los escenarios la actuación coordinada de los organismos operativos y de apoyo que garantice la máxima eficiencia en las etapas de búsqueda y rescate, atención médica, suministros, alojamiento y en general la asistencia de la zona afectada;
- Elaboración de programas de educación e información pública para la comunidad expuesta acerca del fenómeno y recomendaciones generales y domiciliarias que permitan mitigar los efectos sobre la población y los bienes.
- Estimación de las pérdidas económicas directas e indirectas y los respectivos planes de ajuste, rehabilitación y asistencia para la reconstrucción y desarrollo de la región.

Este plan de mitigación del riesgo y de protección civil debe incluir básicamente las siguientes actividades:

- Estudios de sismicidad de la región, considerando la información histórica e instrumental; la elaboración de mapas de la neotectónica de la zona y su dinámica;
- La definición de mapas sismotectónicos que permitan definir el grado de exposición o amenaza a nivel macro y micro de las zonas propensas;
- La elaboración de mapas con diferentes niveles de riesgo sísmico aceptable una vez definido el riesgo sísmico existente;
- La incorporación de los estudios de vulnerabilidad en la planificación física;
- Elaboración de material para los medios de comunicación con el fin de realizar campañas de información pública acerca de los futuros eventos y recomendaciones de comportamiento;
- El desarrollo de cursos de orientación, ilustración y preparación para

los futuros eventos dentro de los programas de educación nacional en todos los niveles educativos;

- La preparación de grupos operativos de emergencia, adiestrados y listos para asumir el manejo organizado de la búsqueda, el rescate, el transporte en caso de evacuaciones, los suministros, el alojamiento temporal, las comunicaciones, etc.;
- La preparación de planes de emergencia y capacitación del personal médico y paramédico para la atención de la población en el caso de presentarse el evento;
- La elaboración de códigos sismoresistentes que garanticen el buen comportamiento estructural de las nuevas edificaciones en futuros eventos, y
- El mejoramiento e instalación de las estaciones sismológicas y las redes de instrumentos de medición de movimientos fuertes, fundamentales para la depuración y refinamiento de la evaluación del riesgo.

ACTIVIDADES POSDESASTRE

Las actividades posteriores a la manifestación del evento sísmico pueden catalogarse como: medidas de emergencia, cuyo objetivo es la atención inmediata a la población; medidas a corto plazo, que pretenden la rápida recolección de información a cerca del daño y el estado de las edificaciones, necesaria para la determinación de los programas de protección civil y rehabilitación; y las medidas a largo plazo, correspondientes al desarrollo de los planes de reconstrucción y rehabilitación de la zona con la aplicación de los programas de ajuste económico definidos con base en la información obtenida.

Las medidas de emergencia pueden resumirse en las siguientes:

- Establecimiento de centros que puedan llevar a cabo actividades de emergencia en cada ciudad o municipio.
- Control de incendios por parte de personal voluntario y profesional.
- Búsqueda y rescate de la población.
- Evacuación de las zonas densamente pobladas y de lugares peligrosos.
- Establecimiento de centros para el suministro de alimentos y para la organización de otras actividades de emergencia.
- Organización del alojamiento temporal, de centros médicos, escuelas y otros servicios públicos de primera necesidad.
- Retiro de las ruinas, demoliciones y limpieza de estructuras o partes de las edificaciones peligrosas para la población.

- Aplicación de los programas de ajuste económico para el restablecimiento, la reconstrucción y rehabilitación de las zonas afectadas.

Las medidas a mediano y corto plazo corresponden básicamente a estudios después de la manifestación del evento, fundamentales para la recuperación posterior al desastre:

- Clasificación de las edificaciones de acuerdo con su nivel de daño y grado de funcionalidad utilizando una metodología única de evaluación;
- Estudio de la distribución de los daños y efectos del terremoto en la zona y reconsideración de los planes de desarrollo urbano;
- Análisis de la actividad sísmica utilizando las estaciones existentes y temporales y acelerógrafos de movimiento fuerte instalados en la zona para que recojan la información de posibles réplicas;
- Elaboración de especificaciones de reparación y restauración de las estructuras deterioradas;
- Plan de emergencia de desarrollo urbano para la reconstrucción de vivienda, servicios públicos, escuelas, etc. y
- Ejecución de la reparación y demolición de las edificaciones, simultáneamente con el estudio de las condiciones locales del suelo.

Utilizando una metodología sistemática y única puede llevarse a cabo una evaluación eficiente y rápida de la magnitud de los daños y puede presentarse en un corto tiempo la información básica para la toma de decisiones y la elaboración de medidas económicamente justificadas y técnicamente consistentes para la reducción de las consecuencias del desastre.

En general, las medidas pre y posdesastre no difieren fundamentalmente; sin embargo, de las evaluaciones a corto plazo de los daños y la vulnerabilidad de los elementos sometidos al evento se podrán definir las modificaciones respectivas de los estudios de riesgo desarrollados con anterioridad, lo cual resulta de especial importancia para la zona expuesta.

CONCLUSIONES

El enorme incremento de la edificación y la alta concentración de la población en centros urbanos localizados en áreas expuestas permanentemente a la manifestación de movimientos sísmicos ha dado como resultado un significativo aumento del riesgo sísmico para dichas zonas. La manifestación de un evento de esta naturaleza puede causar inmensas pérdidas que pueden afectar sensiblemente la economía de una zona o un país, causándole un gasto imprevisto del que difícilmente podría recuperarse, trayendo como consecuencia un inevitable empobrecimiento de su población.

En la actualidad existe una extensa variedad de metodologías para la evaluación del riesgo sísmico que están siendo planteadas en diferentes partes del mundo. En este documento se ha descrito básicamente una metodología que obedece a conceptos y desarrollos originalmente planteados, de acuerdo con el estado del arte, por el el IZIIS (Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology) y que ha aplicado exitosamente en Yugoslavia, específicamente en el caso del terremoto de Montenegro en 1979.

Esta metodología podría ser aplicada, a diferencia de otras, sin dificultad en diferentes regiones del mundo, realizando algunos ajustes a las funciones de vulnerabilidad empírica definidas para cada tipo de edificación. Aunque este método no permite la estimación de las pérdidas totales para cualquier momento en el tiempo, puesto que la pérdida específica está definida como un nivel probable o esperado de pérdidas en un escenario particular, este método permite la evaluación de las pérdidas totales debidas a la manifestación de un evento definido para un período de retorno dado que se relacione con la vida útil de los elementos expuestos.

Una metodología como ésta es suficiente y resulta adecuada si se tiene en cuenta que existe una amplia variedad de tipologías en la edificación, calidades de construcción y estructuras antes del evento y que posteriormente habrá modificaciones debido a las reparaciones y cambios en la práctica de la ingeniería, dando como resultado que ante un nuevo evento se hayan cambiado las condiciones. Así, el modelo se perfecciona y modifica para cada evento esperado.

En la actualidad las facilidades que ofrecen los computadores permiten la aplicación eficiente de una metodología como la ilustrada, puesto que puede llevarse a cabo una digitalización de los mapas de amenaza sísmica, vulnerabilidad y las condiciones locales del suelo; mapas que podrían ser cruzados y actualizados con facilidad, manteniendo en forma dinámica la información a cerca del riesgo y la vulnerabilidad.

Los sistemas expertos basados en programación declarativa y reglas de inferencia con niveles de certeza y basados, por ejemplo, en métodos estadísticos de probabilidad Bayesiana, resultan prometedores para la evaluación del daño de las edificaciones de una manera única y uniforme, simulando el proceso de diagnóstico de un experto a través de la sintetización de los síntomas de deterioro de la estructura. Estos sistemas

podrían llegar a ser excelentes herramientas de evaluación y determinación de las funciones de vulnerabilidad empírica y teórica a mediano plazo.

Hasta hace muy poco el objetivo de la Ingeniería Sísmica se centraba en la determinación de la amenaza, llamada hasta entonces riesgo, y en la determinación de los criterios de diseño sísmoresistente para ser aplicados en las estructuras de una manera individual. En la actualidad, ha sido necesario replantear la definición de riesgo para entenderse como un problema en el cual se relaciona la vulnerabilidad no sólo de un elemento sino de un grupo de elementos con diferentes características, distribuidos de una manera específica, y la amenaza o grado de exposición a que se encuentran sometidos dichos elementos.

Bajo estas nuevas concepciones, la Ingeniería Sísmica se ha comprometido, adicionalmente, con la determinación del riesgo sísmico propiamente dicho, con el fin de aportar dichos resultados a la planificación urbana, y así determinar políticas de reducción del mismo obtenidas de la concertación interdisciplinaria de sismólogos, geólogos, ingenieros, administradores, economistas, sociólogos, planificadores, y otros profesionales involucrados en los programas preventivos contra las consecuencias catastróficas de los terremotos.

La estrategia fundamental que plantea la Ingeniería Sísmica a través del desarrollo de los estudios de vulnerabilidad y de evaluación del riesgo sísmico es el enfrentamiento comparativo entre el valor estimado de la inversión anticipada de reparación y refuerzo de los elementos sometidos, mediante el cual se obtiene un mayor grado de seguridad, y el valor de las pérdidas probables que se sufrirían sobre dichos elementos sin recibir ninguna intervención después de la manifestación de un evento de niveles catastróficos.

REFERENCIAS

Benedetti D., Benzoni G.M.: "Seismic Vulnerability Index Versus Damage for Unreinforced Masonry Buildings", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Cardona-Arboleda O.D.: "Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico; Planificación Física y Urbana en Areas Propensas", Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín Técnico AIS-33, Diciembre 1986; Simposio Internacional Sobre Neotectónica y Riesgos Volcánicos, Revista CIAF Vol 11, Bogotá, Colombia, Diciembre 1986, Seminario Nacional Sobre Prevención y Manejo de Catastrofes Naturales, Asociación de Ingenieros Estructurales, Medellín, Colombia, Octubre 1986.

Cardona-Arboleda O.D., Sarmiento-Prieto J.P.: "Análisis de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo para la Salud de una Población en Caso de Desastre", Plan de Atención Hospitalaria, Ministerio de Salud de Colombia, Bogotá, Marzo 1988.

Cardona-Arboleda O.D.: "Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo para la Salud de Poblaciones Potencialmente Sometidas a Desastres", Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín AIS-36, Junio 1987.

Cardona-Arboleda O.D.: "Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica Pre-evento - Evaluación de Daño y la Posibilidad de Uso de las Edificaciones Después de Un Sismo", Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín AIS-40, Marzo 1988.

Cardona-Arboleda O.D.: "Vulnerabilidad y Riesgo por Desastre - Terminos de Uso Común en Manejo de Riesgo", I Taller de Planificación en Manejo Desastres, Oficina Nacional para la Atención de Desastres, Presidencia de la República de Colombia, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Junio 1989.

Cornell C.A.: "Engineering Seismic Risk Analysis", Research Report R 67 - 75, MIT 1967.

Cornell C.A., Vanmarke E.H.: "The Mayor Influences on Seismic Risk", 3rd WCEE, Santiago 1969.

Corsanego A.: "A Review of Methodologies for Seismic Vulnerability Assessment", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Crespellani Teresa: "Seismic Risk in Planning and Urbanization Site and Soil Hazard Evaluation", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Davis I.: Arquitectura de Emergencia, Editorial Gustavo Gili, Barcelona 1980.

EERI Committee on Seismic Risk: "Glossary of Terms for Probabilistic Seismic - Risk and Hazard Analysis, Earthquake Spectra, Vol 1, 1984.

EERI Committee on the Anticipated Tokai Earthquake: "The Anticipated Tokai Earthquake: Japanese Prediction and Preparedness Activities, Publication No. 84-05, June 1984.

Fournier d'ALBE E.M.: "The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Gavrilovic P., Milutinovic Z.: "Seismic Risk Assessment and Mesures for Reduction of Earthquake Consecuences in Urban Regions", IZIIS, Skopje, 1984.

Gavrilovic P., Petrovski J.: "Methodology and Procedure for Damage Classification and Useability of Structures after Earthquakes", IZIIS, Skopje, 1985.

Guagenti E., Molina C., Tagliani A.: "Waiting Times, Return Periods and Damage Costs in Semi-Markov Models of Earthquakes Occurrences", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

James T. P. Yao: "Computer-based Assessment of Seismic Damage", 8th WCEE, San Francisco, July 1984.

Milutinović Z., Kameda H.: "Equivalent Ground Acceleration (EQA) as an Engineering Seismic Hazard Parameter; Development and Estimation." Research Report KUCE 83-ST-01, Kyoto University, 1983.

Milutinović Z., Petrovski J.: "Earthquake Damage Prediction - Modelling and Assesment", IZIIS, Skopje April 1985.

Milutinović Z., Petrovski J.: "Earthquake Vulnerability and Loss Assessment for Phisical and Urban Planning", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Ohkubo M., Okada T.: "The Outline of Post-earthquake Damage Evaluation Guidelines of Reinforced Concrete Buildings", International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, Skopje, November 1985.

Petrovski J.: "Post Earthquake Damage Evaluation", Chapter 2 of the Manual on Damage Evaluation and Assessment of Seismic Resistance of Existing Buildings, UNDO/UNIDO Project "Building Construction Under Seismic Conditions in the Balkan Region", Skopje, October 1983.

Petrovski J.: "An Applied Methodology for Assessment of Earthquake Vulnerability and Risk Based on the Earthquake of April 15, 1979 in SR

Montenegro, SFR Yugoslavia", Report IZIIS 84/084, Skopje, May 1984.

Petrovski J., et al: "Development of Empirical and Theoretical Vulnerability and Seismic Risk Models", 8th WCEE, San Francisco, July 1984.

Scawthorn C., Lofting E.M.: "Earthquake Recovery", International Symposium on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas, Zurich, March 1984.

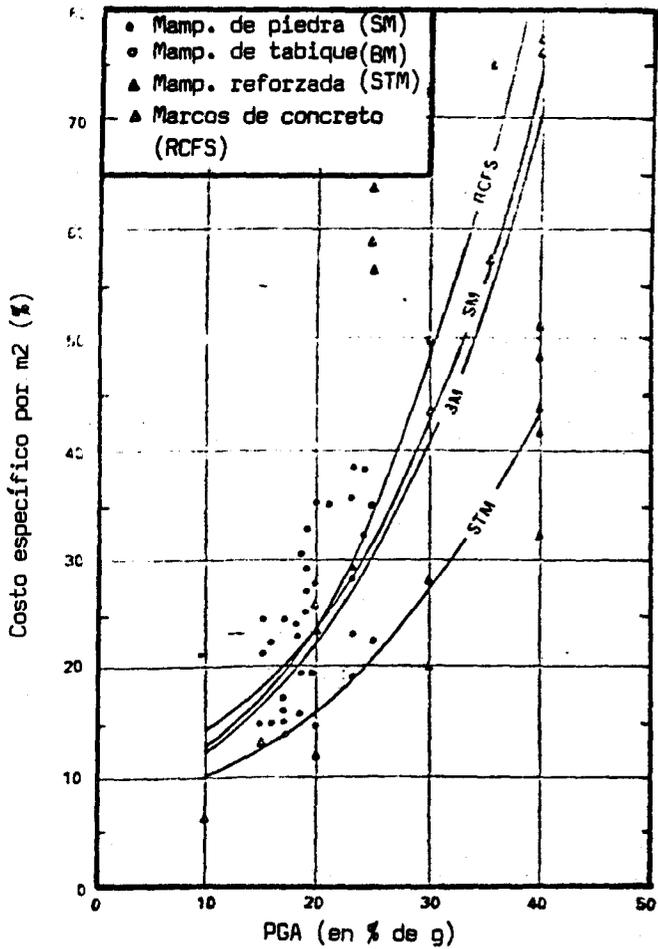
Shah H.C., Dong W.M.: "A Re-evaluation of the Current Seismic Hazard Assessment Methodologies", 8th WCEE, San Francisco, July 1984.

Tiedemann H.: "Economic Consequences of Earthquakes", International Symposium on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas, Zurich, March 1984.

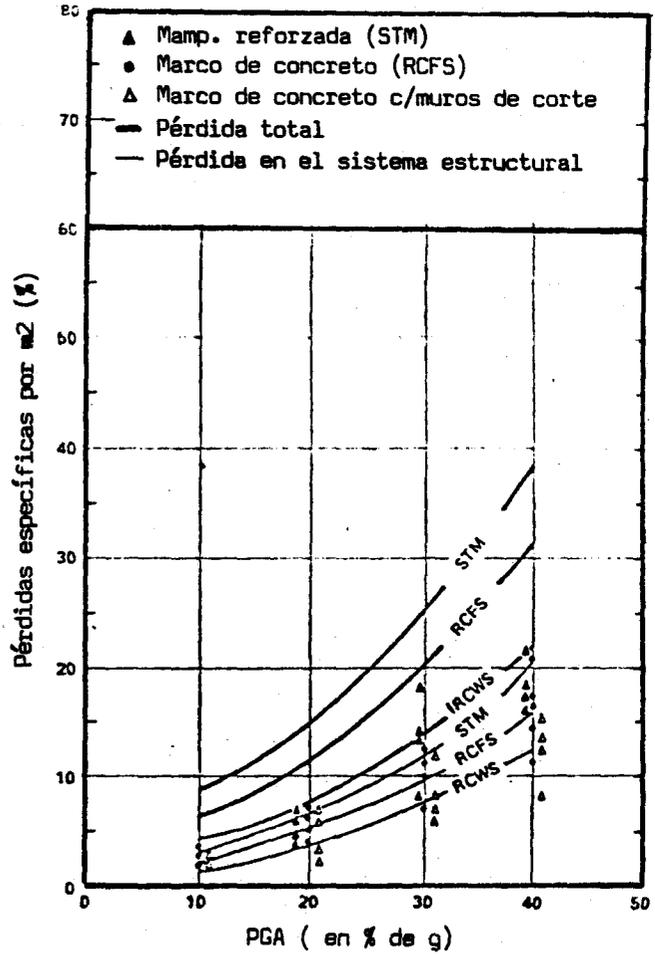
UNDRO: "Natural Desasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva July 1979

Vere-Jones D.: "What are the Main Uncertainties in Estimating Earthquake Risk?", Bulletin of the New Zeland National Society for Earthquake Engineering, Vol 16, No 1, March 1983.

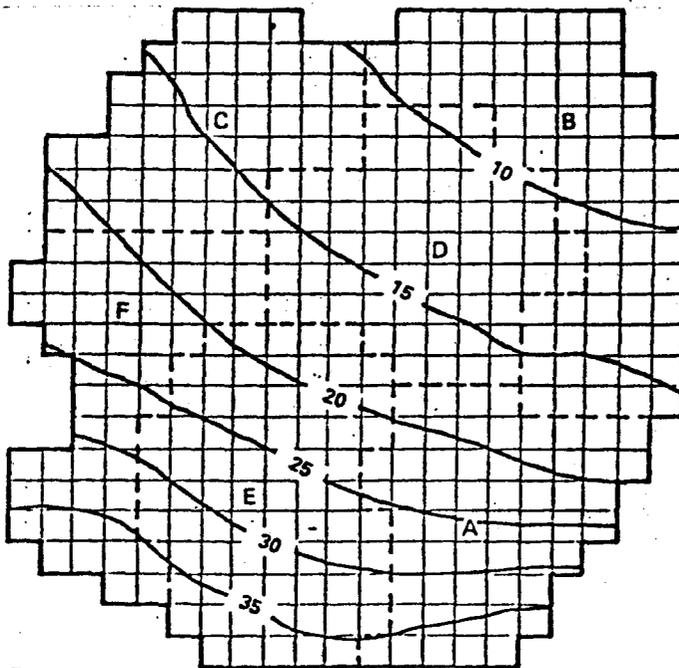
Whitman R.V., Reed J.W., Hong S.T.: "Earthquake Damage Probability Matrices", 5th WCEE, Rome, 1973.



Funciones de costo para reparar y reforzar distintos tipos de edificios



Funciones de vulnerabilidad de sistemas estructurales para tipos modernos de edificios



Figuras anexas tomadas de Petrovski 1984

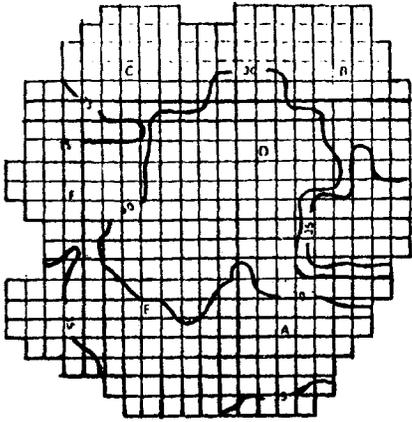
Mapa de riesgo sísmico para un periodo de retorno de 200 (SH-200)

TABLA 1. Presentación de los elementos considerados a riesgo para los escenarios A y B

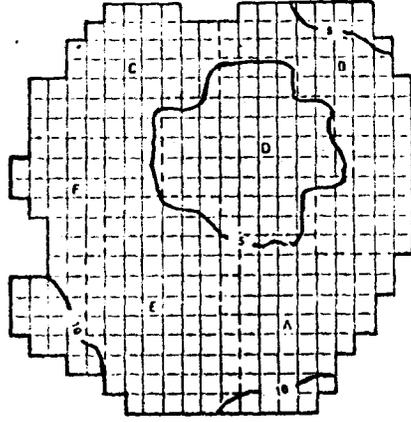
| Comun | | Elementos en riesgo (tipo de edificios) | | | | | | | | Area Total m2 |
|-------------|-------------------------|---|----------------|------------------------|----------------|-----------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| | | Mamposteria de piedra | | Mamposteria de tabique | | Mamposteria reforzada | | Marcos (RCFS) | | |
| | | Area total m2 | % del total | Area total m2 | % del total | Area total m2 | % del total | Area total m2 | % del total | |
| ESCENARIO A | A | 208050 | 42 | 59850 | 12 | 122550 | 24 | 108300 | 22 | 498750 |
| | B | 472650 | 57 | 103500 | 13 | 203550 | 25 | 41400 | 5 | 821100 |
| | C | 224400 | 56 | 45900 | 11 | 79050 | 20 | 53550 | 13 | 402900 |
| | D | 315000 | 38 | 78750 | 10 | 151200 | 18 | 286650 | 34 | 831600 |
| | E | 260800 | 46 | 81000 | 13 | 180900 | 31 | 62100 | 10 | 604800 |
| | F | 390000 | 39 | 101250 | 10 | 210000 | 21 | 303750 | 30 | 1005000 |
| | Total para la region | 1890900 | 45 | 470250 | 11 | 947250 | 23 | 855750 | 21 | 4164150 |
| ESCENARIO B | A | - | - | 122265 | 25 | 268185 | 54 | 108300 | 21 | 498750 |
| | B | - | - | 245295 | 30 | 534405 | 65 | 41400 | 5 | 821100 |
| | C | - | - | 113220 | 28 | 236130 | 59 | 53550 | 13 | 402900 |
| | D | - | - | 173250 | 21 | 371700 | 45 | 286650 | 34 | 831600 |
| | E | - | - | 165240 | 27 | 377460 | 62 | 62100 | 11 | 604800 |
| | F | - | - | 218250 | 22 | 483000 | 48 | 303750 | 30 | 1005000 |
| | Total para la region | - | - | 1037520 | 25 | 2270880 | 55 | 855750 | 20 | 4164150 |

TABLA 2. Presentación comparativa de pérdida total para escenarios A y B

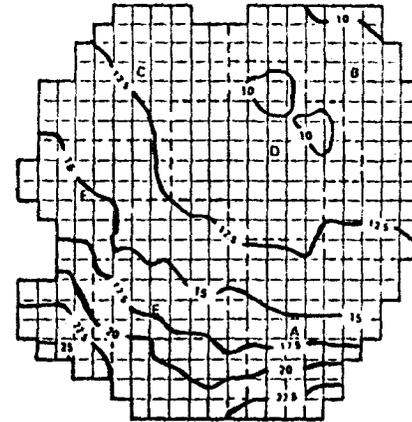
| Tipo de edificio | Area total | | Pérdidas totales (en por ciento) | | | | | |
|-----------------------------|------------|---------|-----------------------------------|------|-------------------------------------|-----|---|------|
| | | | Daño/Uso Categoría II D/U-C-II | | Daño/Uso Categoría III D/U-C-III | | Daño/Uso Categoría II+III D/U-C-(II+III) | |
| | Escenario | | Escenario | | Escenario | | Escenario | |
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| Mamposteria de Tabique (SM) | 1890900 | - | 53.2 | - | 12.0 | - | 65.3 | - |
| Mamposteria de Tabique (BM) | 470250 | 1037520 | 29.5 | 29.2 | 6.2 | 6.2 | 35.8 | 35.4 |
| Mamposteria Reforzada (STM) | 947250 | 2270880 | 10.1 | 9.8 | 1.3 | 1.3 | 11.4 | 11.1 |
| Muros de concreto (RCFS) | 855750 | 855750 | 9.4 | 9.4 | - | - | 9.4 | 9.4 |
| Total para la Region | 4164150 | | 31.7 | 14.6 | 6.5 | 2.3 | 38.2 | 16.8 |



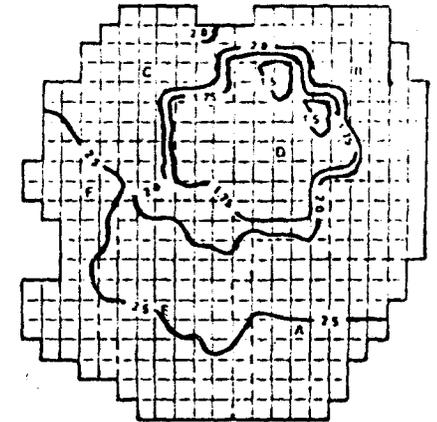
a) Daño/Usó Categoría II



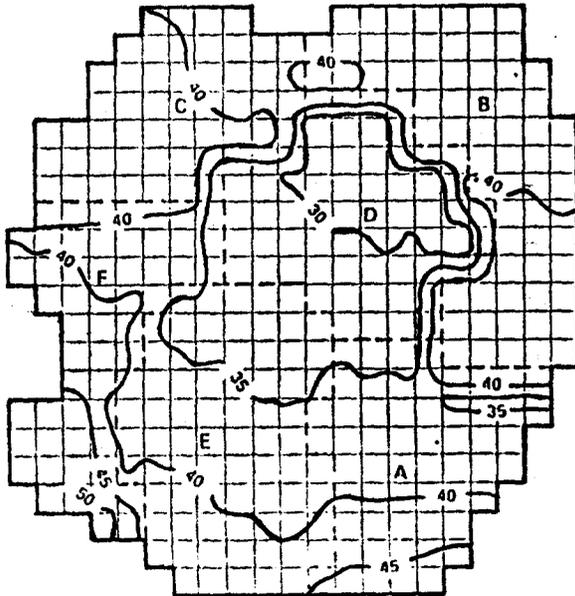
b) Daño/Usó Categoría III



a) Daño/Usó Categoría II

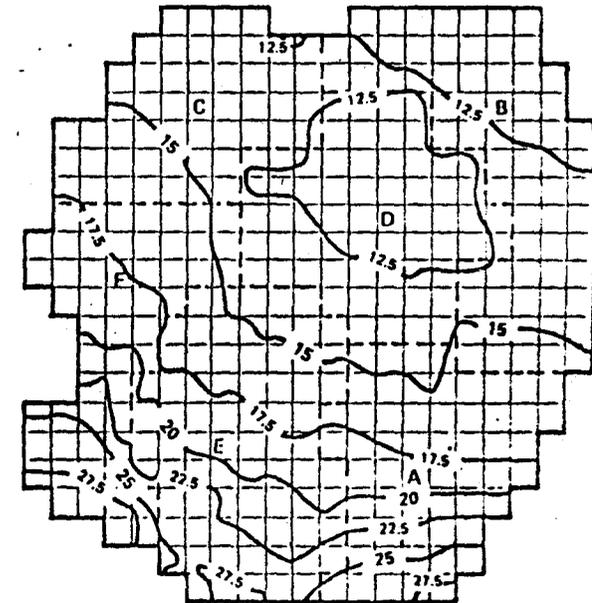


b) Daño/Usó Categoría III



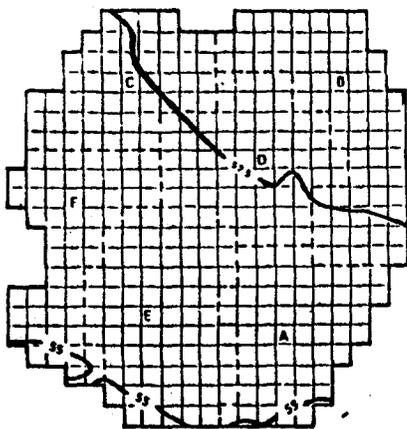
c) Total por Daño/Usó Categorías II y III

Porcentaje acumulativo de pérdidas para SM, BM, STM y edificios tipo RCFS para un sismo con un periodo de retorno de 200 años: Escenario A.

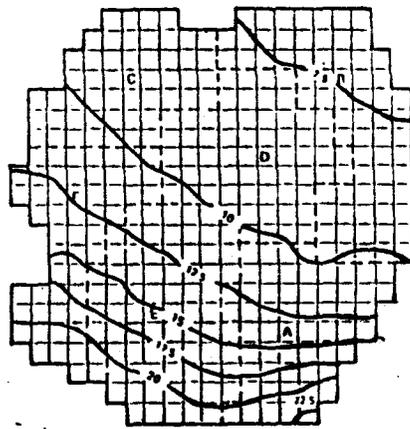


c) Total por Daño/Usó Categorías II y III

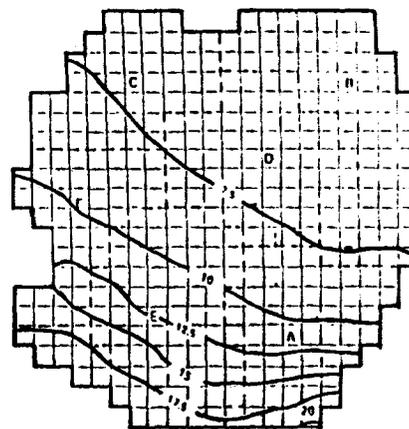
Porcentaje acumulativo para BM, STM y edificios tipo RCFS para un sismo con un periodo de retorno de 200 años: Escenario B.



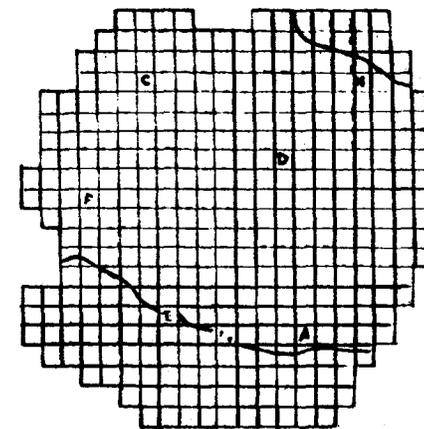
a) Daño/Usos Categoría II



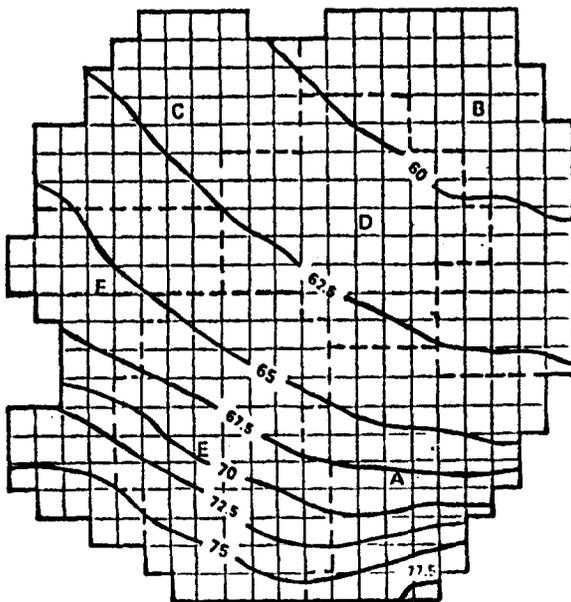
b) Daño/Usos Categoría III



a) Daño/Usos Categoría II

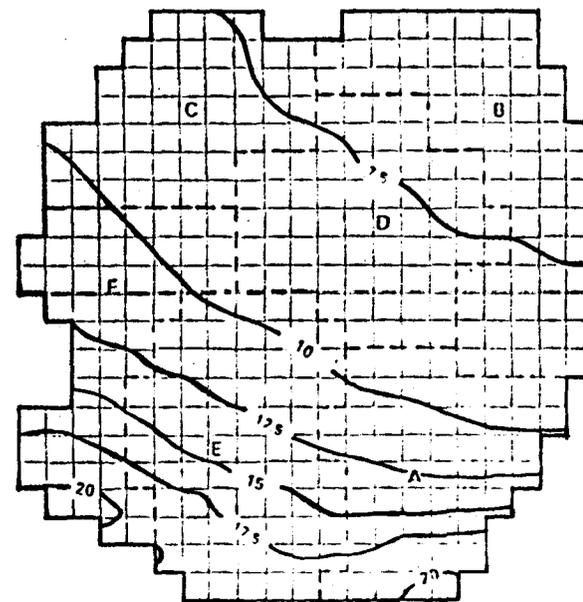


b) Daño/Usos Categoría III



c) Total de Daño/Usos Categorías II y III

Contornos de pérdidas específicas para Edificios clase SM para un sismo con un periodo de retorno de 200 años



c) Total de Daño/Usos Categorías II y III

Contornos de pérdidas específicas para Edificios clase STM para un sismo con un periodo de retorno de 200 años