



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons  
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE GRADUADOS



*Estimación de pérdidas por sismo en edificios peruanos  
mediante Curvas de Fragilidad analíticas*

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO  
DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

Presentada por

Ing. José Martín Velásquez Vargas

Asesor

**Dr. Marcial Blondet**

Lima - Perú  
Agosto 2006

## AGRADECIMIENTOS

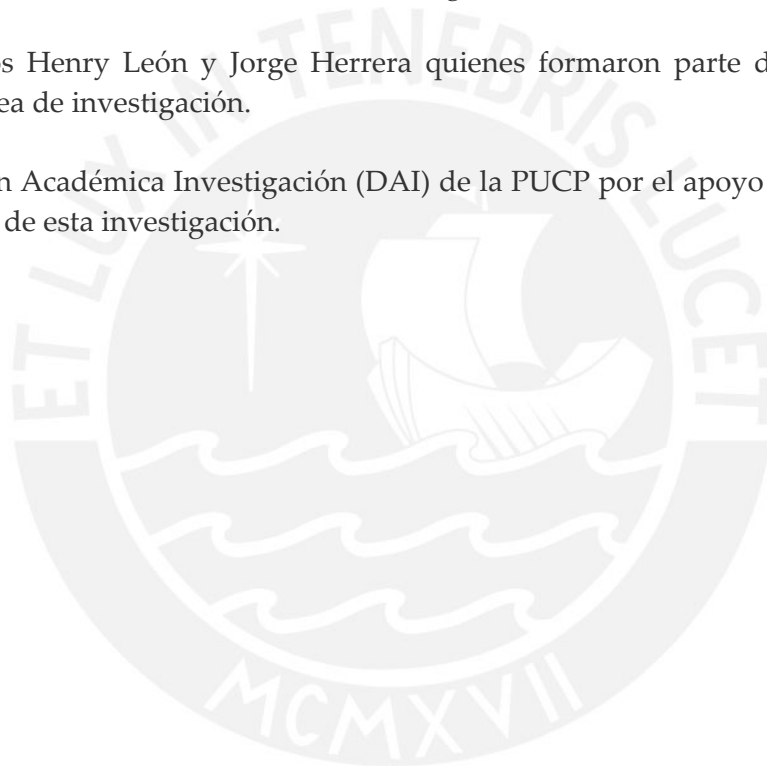
---

A mi asesor y maestro Dr. Ing. Marcial Blondet por el constante apoyo y dedicación al desarrollo de este proyecto.

A mis amigos Nicola Tarque, Rafael Aguilar, María Angela Astorga, Manuel Monroy y Ana Bolaños, quienes compartieron sus experiencias profesionales y conocimientos académicos durante el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos Henry León y Jorge Herrera quienes formaron parte del equipo que inició esta línea de investigación.

A la Dirección Académica Investigación (DAI) de la PUCP por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.



## DEDICATORIA

---

A mi esposa Mariana porque es la luz que enciende mi vida y porque su constante apoyo hizo realidad este trabajo.

A mis padres y hermanos porque son ejemplo de perseverancia, de fe y de sacrificio.

- José



## RESUMEN

---

La constante ocurrencia de sismos en nuestro territorio ha dejado enseñanzas que debemos estudiar y analizar, y poder mitigar el riesgo sísmico al que están expuestas nuestras edificaciones. En esta tesis se desarrolla una metodología que permite predecir de manera razonable las pérdidas por sismo en edificios peruanos. La metodología tiene un enfoque probabilístico y está basada en curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad son funciones que representan la vulnerabilidad de una estructura cuando está sometida a diversos niveles de intensidad sísmica. Con esta herramienta de evaluación se podría estimar los costos de reparación de grupos de edificios o evaluar el desempeño de sistemas de refuerzo. Este trabajo constituye una estimación del riesgo sísmico de edificaciones.

Las curvas de fragilidad son generadas analíticamente mediante un procedimiento de simulación en el que se toma en cuenta la incertidumbre y aleatoriedad de la demanda sísmica y de las propiedades mecánicas de la estructura. Se generan una cantidad importante de muestras de modelos con propiedades estructurales variables y un mismo número de acelerogramas aleatorios. Los modelos estructurales generados son sometidos a los acelerogramas aleatorios y se calcula su respuesta mediante un análisis dinámico no-lineal. Luego, aplicando un procedimiento estadístico, se generan las curvas de fragilidad.

Las pérdidas por sismo, es decir, los costos de reparación asociados a determinados escenarios de peligro sísmico pueden estimarse a partir de las curvas de fragilidad. En este trabajo se propone un método sencillo en el que se utiliza el costo de reposición total y los factores de daño asociados a los diversos estados límites.

La metodología para generar curvas de fragilidad es implementada en un programa de cómputo y se generaron las curvas de fragilidad para 2 colegios típicos peruanos. Se observa una marcada diferencia en la vulnerabilidad sísmica de ambos colegios.

Los resultados demuestran que la vulnerabilidad sísmica de las estructuras estudiadas está adecuadamente representada mediante sus curvas de fragilidad. También se concluye que pueden estimarse con una razonable precisión los costos de reparación estructural. Existe una clara diferencia en los costos de reparación estimados para los 2 colegios estudiados.

## ABSTRACT

---

The constant occurrence of earthquakes in our country has left an important amount of knowledge which we have to study and analyze, in order for to be able to mitigate the seismic risk in our buildings. This thesis intends to develop a methodology to accurately assess the seismic loss in Peruvian buildings. The methodology emphasizes on a probabilistic approach and is based on fragility curves. Fragility curves are functions that represent the vulnerability of a structure when subjected to various levels of seismic intensity. With this assessment tool it might be possible to estimate the repair costs of group of buildings or evaluate the performance of reinforcement systems. This work represents and assessment of the seismic risk of buildings.

Fragility curves are generated analytically by means of a simulation process in which the uncertainty and randomness of the seismic demand and the mechanical properties of the structure are taken into account. An important quantity of samples of structural models is generated with variable structural properties and a same number of random time-history records (synthetic signals) is also generated. The generated structural models are subjected to the random records and their responses are computed through a non-linear dynamic analysis. Then, using statistical techniques, fragility curves are built.

Seismic loss, that is, the repair costs associated to predefined seismic hazard scenarios might be estimated from the fragility curves. In this work a simple method is proposed and it uses the total reposition cost and damage factors related to several limit states.

The methodology to generate fragility curves is implemented in a computer program and fragility curves are generated for 2 typical Peruvian schools. An important difference concerning the seismic vulnerability is observed between both schools.

Results show that the seismic vulnerability of the studied structures is adequately represented by their fragility curves. Also it can be inferred that the repair costs of the structures can be assessed with a reasonable accuracy. There is a clear difference in the repair costs assessed for both schools, which are subject of this study.

## CONTENIDO

---

AGRADECIMIENTOS .....	II
DEDICATORIA.....	III
RESUMEN .....	IV
ABSTRACT .....	V
CONTENIDO.....	VI
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes y justificación .....	2
1.3 Hipótesis .....	2
1.4 Objetivos.....	3
<b>2 MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA</b>	
2.1 Introducción.....	4
2.2 Marco teórico .....	4
2.3 Conceptos relacionados con la investigación.....	5
2.3.1 Los sismos.....	5
2.3.2 Curvas de fragilidad.....	6
2.3.3 Conceptos básicos de Estadística y Probabilidad.....	7
2.3.4 Simulación Montecarlo .....	10
2.4 Metodología y plan de trabajo.....	11
<b>3 CURVAS DE FRAGILIDAD</b>	
3.1 Vulnerabilidad sísmica.....	13
3.1.1 Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica.....	13
3.1.2 Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño .....	15
3.2 Métodos para generar Curvas de Fragilidad .....	16
3.2.1 Métodos basados en observaciones de campo .....	16
3.2.2 Métodos experimentales.....	17
3.2.3 Métodos a partir de la opinión de expertos .....	18
3.2.4 Métodos analíticos.....	20
3.3 Curvas de Fragilidad Analíticas.....	21
3.3.1 Simulación Montecarlo para estimar la respuesta estructural .....	22
3.3.2 Análisis Dinámico No-lineal .....	25



3.3.3	Función de distribución de probabilidad del daño.....	26
3.3.4	Generación de las curvas de fragilidad .....	27
3.4	Algoritmo para generar curvas de fragilidad analíticamente.....	28
<b>4</b>	<b>PÉRDIDAS POR SISMO</b>	
4.1	Implementación de la metodología .....	30
4.2	Curvas de fragilidad para 2 colegios típicos peruanos .....	31
4.2.1	Colegio 780 antiguo (pre NDSR-1997) .....	31
4.2.2	Colegio 780 nuevo.....	33
4.2.3	Desempeño sismorresistente.....	35
4.2.4	Curvas de fragilidad de los colegios .....	37
4.3	Estimación de pérdidas por sismo.....	40
4.3.1	Estimación de pérdidas usando el método de HAZUS.....	40
4.3.2	Estimación rápida usando factores de daño .....	40
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1	Conclusiones .....	43
5.2	Recomendaciones.....	44
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>
	<b>ANEXOS</b>	
A.	Estimación del peligro sísmico del campus PUCP .....	48
B.	Programa Fragilidad v1.0 .....	53



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los criterios de diseño sismorresistente han evolucionado debido a las enseñanzas dejadas por los sismos ocurridos en el mundo. En el Perú, las pérdidas materiales y de vidas humanas han sido considerables. Los daños observados en los terremotos ocurridos durante los últimos 10 años en Nazca, Tacna y Moquegua han mostrado la elevada vulnerabilidad sísmica que presentan nuestros edificios.

Las edificaciones educativas han demostrado ser particularmente muy vulnerables debido a sus peculiares características estructurales. En el Perú no existe una metodología para la estimación del riesgo sísmico de estas edificaciones. Los métodos probabilistas se recomiendan para establecer las condiciones de esta metodología debido a que se toman en cuenta las incertidumbres en los parámetros sísmicos y estructurales (Ellingwood 2001). Este enfoque probabilista permite estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios o una tipología estructural.

En el Perú no existe una metodología definida de estimación de pérdidas por sismos mientras que en otros países, estudios de riesgo sísmico han permitido tomar medidas preventivas de reforzamiento en edificaciones consideradas como vulnerables. En este trabajo se propone una metodología de evaluación de riesgo sísmico para edificios peruanos que puede aplicarse a las edificaciones peruanas. Para lograr este objetivo se necesita conocer por un lado el grado de la amenaza sísmica a la que están expuestas las estructuras (peligro sísmico) y por otro lado, la capacidad que tienen sus edificaciones de resistir esta amenaza (vulnerabilidad sísmica). Al combinar el peligro con la vulnerabilidad se pueden estimar las pérdidas por sismo (riesgo sísmico).

La presente propuesta parte de la necesidad de cuantificar el riesgo sísmico de grupos de edificaciones educativas con tipologías estructurales similares. Los resultados de esta metodología pueden expresarse en términos monetarios y serán de gran utilidad para diseñadores, investigadores, expertos en seguridad y compañía de seguros, y administradores de sistemas esenciales (Bonett 2003).

Las curvas de fragilidad cuantifican el riesgo sísmico de una estructura o de una tipología estructural. Se propone calcular las curvas de fragilidad para las tipologías más comunes en las edificaciones educativas peruanas. Para calcular estas curvas se utilizará un método analítico basado en la simulación estocástica de los parámetros sísmicos y estructurales.

## 1.2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Uno de los primeros intentos para cuantificar la vulnerabilidad sísmica fue desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) que plasmó sus resultados en el reporte ATC-13 (1985). Este reporte cuantifica la probabilidad de daño sísmico de diferentes tipologías de edificios basándose en la opinión de expertos. El ATC desarrolló un método de evaluación visual rápida de edificios. Este método se describe en el reporte FEMA 154 (ATC- 21 2000). Esta metodología aplicable a edificios ha sido adaptada por Muñoz y Blondet (2006) con el objetivo de reforzar la infraestructura educativa peruana.

Estudios previos demuestran que la vulnerabilidad sísmica puede representarse mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño (Bonett 2003). Las curvas de fragilidad caracterizan la vulnerabilidad de un tipo de estructura y permiten estimar las pérdidas por sismo. El principal objetivo de este trabajo es generar estas curvas mediante un método analítico. Las curvas de fragilidad generadas para las tipologías representativas de edificaciones educativas serán implementadas en la metodología de estimación de pérdidas.

La metodología probabilística para estimar el peligro sísmico fue desarrollada por Cornell (1969 y 1970). Esta metodología integra información sismotectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relacionan la aceleración máxima del terreno y la probabilidad anual de excedencia para un determinado tiempo de exposición. Monroy y Bolaños (2004) aplicaron esta metodología para generar mapas de peligro uniforme para el Perú. En el anexo A se estima el peligro sísmico del campus PUCP y se compara estos resultados con el mapa de peligro uniforme generado por Monroy y Bolaños.

Conociendo en forma determinista los escenarios de peligro sísmico y las curvas de fragilidad de una estructura se pueden estimar el riesgo sísmico o las pérdidas por sismo. En términos prácticos, el riesgo sísmico se representa por los costos de reparación que se deben asumir luego de la ocurrencia de un sismo.

## 1.3 HIPÓTESIS

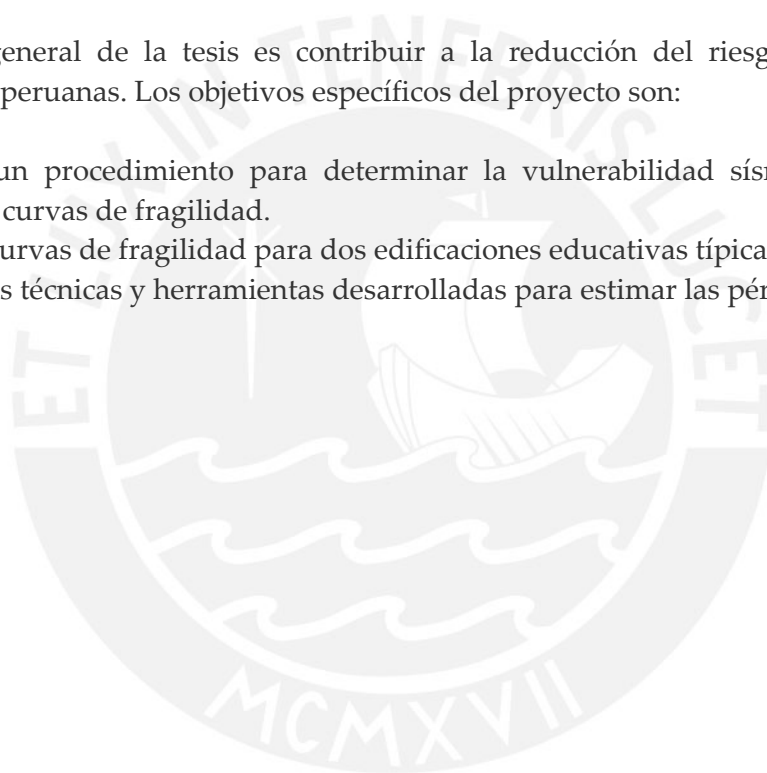
- Los edificios peruanos, principalmente los de la costa peruana, son sísmicamente vulnerables.
- La predicción determinista (un solo análisis) de la respuesta estructural de un edificio que es sometido a un sismo constituye solo un bosquejo a su comportamiento real. La predicción probabilística es más bien una descripción más completa del comportamiento sísmico en el que cada respuesta estructural está asociada a una probabilidad de ocurrencia.
- Es posible elaborar una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios peruanos basándose en herramientas de estudio probabilísticas.

- Las curvas de fragilidad constituyen un enfoque probabilístico para estimar de manera razonable la vulnerabilidad sísmica de edificios.
- Las curvas de fragilidad pueden ser generadas analíticamente mediante simulación basándose en hipótesis teóricas del comportamiento estructural y de la demanda sísmica.
- Esta metodología basada en curvas de fragilidad analíticas permitirá estimar costos de reparación en forma rápida y sencilla.

#### 1.4 OBJETIVOS

El objetivo general de la tesis es contribuir a la reducción del riesgo sísmico de las edificaciones peruanas. Los objetivos específicos del proyecto son:

- Generar un procedimiento para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificios mediante curvas de fragilidad.
- Generar curvas de fragilidad para dos edificaciones educativas típicas del Perú.
- Aplicar las técnicas y herramientas desarrolladas para estimar las pérdidas por sismo.



## 2 MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el marco teórico de la investigación, que tiene por objetivo relacionar el problema en estudio (vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios peruanos) con las teorías, conceptos y artículos técnicos relacionados con el tema. Se explican algunos términos relacionados a los sismos, las Curvas de Fragilidad y los conceptos de Estadística y Probabilidad utilizados en esta investigación. Además, se muestra la metodología de la investigación y se explica cada uno de los pasos realizados.

### 2.2 MARCO TEÓRICO

La **vulnerabilidad sísmica** es el nivel de daño que pueden sufrir las edificaciones realizadas por el hombre durante un sismo. La vulnerabilidad refleja la falta de resistencia de una edificación frente a los sismos (Bommer et al. 1998) y depende de las características del diseño de la edificación, de la calidad de materiales y de la técnica de construcción (Kuroiwa 2002).

El **peligro sísmico** es la probabilidad de ocurrencia de movimientos sísmicos de cierta intensidad en una zona determinada durante un tiempo de exposición. El peligro también puede incluir otros efectos que el mismo sismo genera, como derrumbes y licuefacción de suelos (Bommer et al. 1998). El peligro sísmico se representa mediante parámetros simples como la intensidad, la aceleración del terreno o el espectro de respuesta.

El **riesgo sísmico** es el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica (Bonett 2003, Barbart 1998). También, el riesgo sísmico es definido como una función de la vulnerabilidad sísmica y del peligro sísmico, que de forma general se puede expresar como:  $Riesgo = Peligro \times Vulnerabilidad$  (Fourier d'Albe 1988, Kuroiwa 2002). El riesgo sísmico combina los resultados del peligro sísmico y la vulnerabilidad sísmica que exhiben las estructuras. Las curvas de fragilidad constituyen una herramienta fundamental para la estimación del riesgo sísmico.

Las **curvas de fragilidad** representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado límite de daño como función de un parámetro que representa la intensidad sísmica. Estas curvas se pueden obtener mediante experimentos, observaciones de campo, opinión de expertos y procesos de simulación.

Los métodos analíticos calculan curvas de fragilidad mediante análisis numéricos y son empleados cuando no se dispone de observaciones de daños producidos por sismos

anteriores o suficientes resultados de ensayos de laboratorio. El método analítico utiliza técnicas de simulación para considerar la incertidumbre en los parámetros sísmicos y estructurales. La simulación Montecarlo define ambos parámetros como variables aleatorias generadas a partir de sus funciones de distribución de probabilidad. Para representar la acción sísmica se generan señales sintéticas y para los parámetros estructurales se evalúa su dispersión estadística dependiendo del tipo de estructura. Para reducir el número de simulaciones requeridas se utilizan técnicas de optimización como el método del Hipercubo Latino Mejorado (Bonett 2003). Finalmente al definir los estados discretos de daño (leve, moderado, severo y colapso) se obtienen las curvas de fragilidad que se utilizan en la estimación del riesgo sísmico de estructuras.

## 2.3 CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN

A continuación se explican los conceptos relacionados con la investigación.

### 2.3.1 Los sismos

Los sismos son perturbaciones súbitas en el interior de la tierra que dan origen a vibraciones o movimientos del suelo. El origen de los sismos en nuestro territorio se debe principalmente a la interacción de la placa Nazca (placa oceánica) con la placa Sudamericana (placa continental) (Fig. 2.1). Frente a la costa del Perú se produce el fenómeno de subducción en el que la placa Nazca se introduce debajo de la placa Sudamericana. Cuando se presenta un movimiento relativo entre estas dos placas se generan ondas sísmicas, que producen el movimiento del suelo.

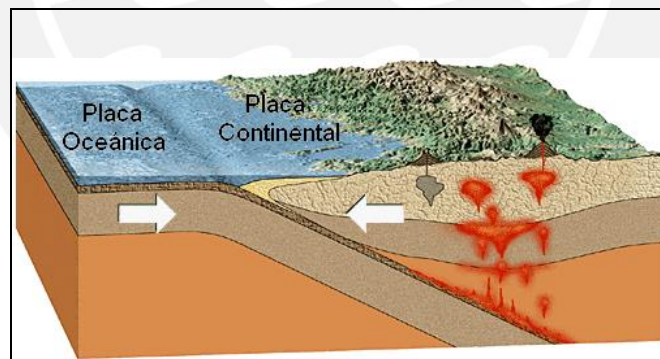


Fig. 2.1 Interacción de la placa Nazca con la Sudamericana  
(Disponible de: [www.igm.cl/Terremoto.html](http://www.igm.cl/Terremoto.html))

Las ondas sísmicas se clasifican en ondas de cuerpo y en ondas de superficie. Las ondas de cuerpo son aquellas que se transmiten desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie. En cambio, las ondas superficiales solo se transmiten sobre la superficie y son las más perjudiciales para las edificaciones.

Para el estudio de los sismos es necesario conocer dos puntos imaginarios. Uno de ellos es el foco o hipocentro, que es el centro de propagación de las ondas sísmicas. El foco se idealiza como un punto en la superficie de falla donde se inicia la ruptura. El otro punto



importante es el epicentro, que es la proyección del foco sobre la superficie terrestre (Fig. 2.2).

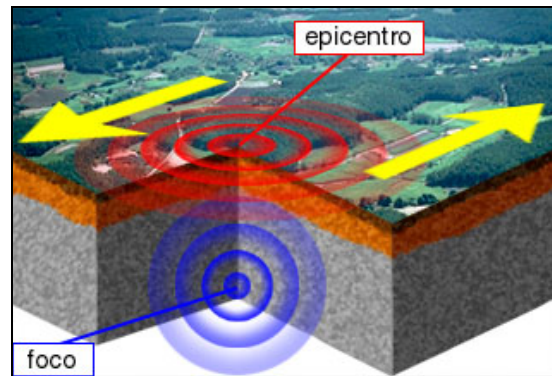


Fig. 2.2 Epicentro y foco (Disponible de: [www.harcourtschool.com](http://www.harcourtschool.com))

Los sismos pueden ser medidos en función de su magnitud y de su intensidad. La magnitud está relacionada a la cantidad total de energía que se libera por medio de las ondas sísmicas (Sarría 1995). La intensidad es la medida o estimación empírica de la vibración o sacudimiento del suelo. La intensidad de un sismo se mide teniendo en cuenta los daños causados en las edificaciones y en la naturaleza a través de cómo el hombre percibe las vibraciones sísmicas (Kuroiwa 2002).

### 2.3.2 Curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad, denominadas también “funciones de vulnerabilidad”, representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Las curvas de fragilidad se pueden generar mediante observaciones de campo, basándose en la opinión de expertos y utilizando métodos analíticos (Bonett 2003). Cuando no se dispone de suficiente información de campo, las curvas de fragilidad pueden generarse analíticamente mediante simulación (Hwang y Huo 1994).

La figura 2.3 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La intensidad sísmica se ha definido por la aceleración máxima del suelo. Se observa que para una aceleración de  $0,30g$  (“g” es la aceleración de la gravedad), la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo será de 37%. También se observa que el 35% de edificios de este tipo sufrirían daño severo, el 20 % daño moderado y solo el 8% daño leve, ante la misma intensidad sísmica de  $0,30g$ .

La definición de los estados de daño queda a criterio del diseñador. En la figura 2.4 se observa otro ejemplo de curvas de fragilidad en donde se consideran 5 estados de daño. En este caso, se dispone de mayor información para tener una medición más precisa de la vulnerabilidad sísmica de la estructura.

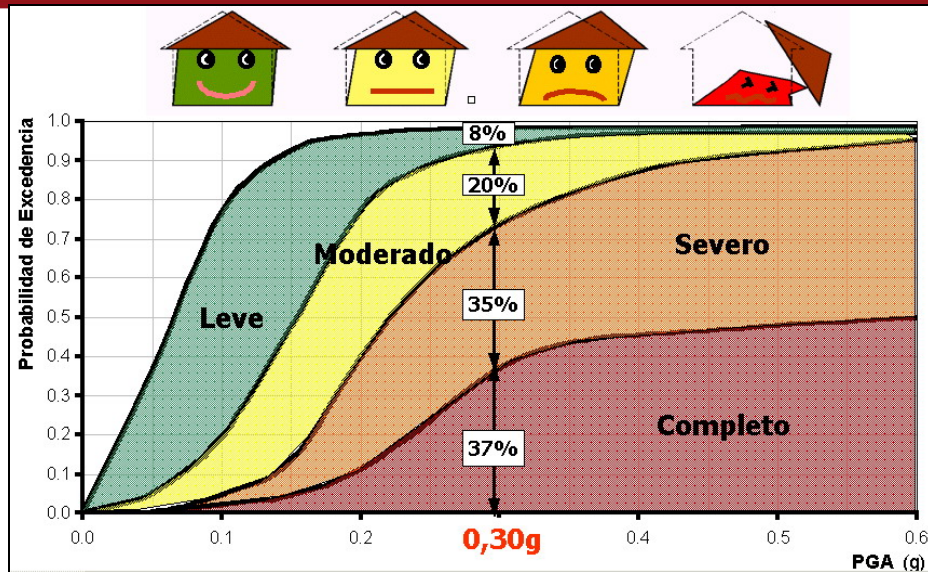


Fig. 2.3 Definición de curvas de fragilidad

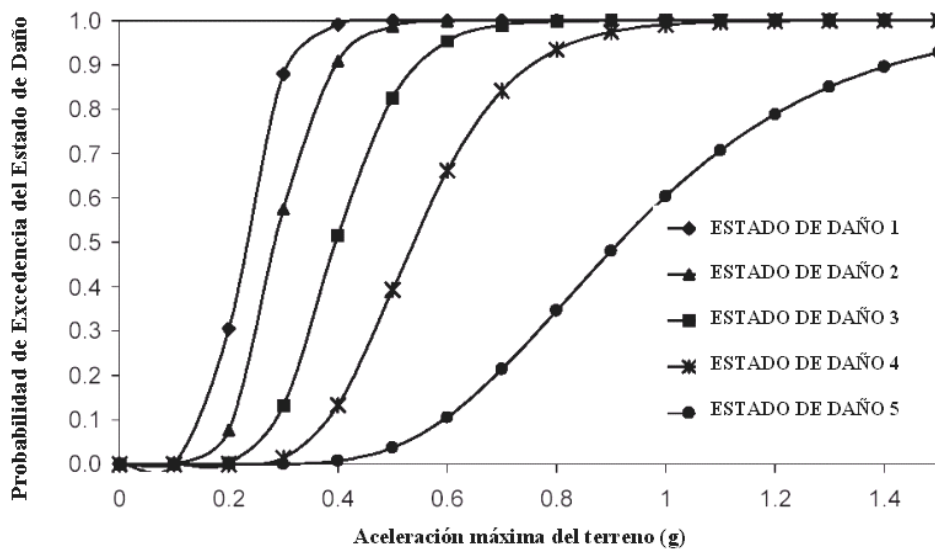


Fig. 2.4 Ejemplo de curvas de fragilidad para 5 estados discretos de daño.

### 2.3.3 Conceptos básicos de Estadística y Probabilidad

La Estadística y Probabilidad son dos campos distintos pero complementan el estudio de la aleatoriedad que es inherente a los fenómenos físicos. Mientras que la Estadística tiene que ver con la determinación de algunas medidas de incertidumbre a partir de experimentos realizados en objetos reales, la Probabilidad estudia modelos matemáticos ideales que pueden aplicarse al estudio de la aleatoriedad. La teoría de la Probabilidad es exacta en el sentido de que se trata de una rama de la Matemática, mientras que la Estadística es solo aproximada. Sin embargo, la Estadística brinda información que hace que los modelos probabilísticos sean útiles en la vida real. Es consecuencia, la teoría de la Probabilidad resultaría inútil sin los parámetros brindados por las técnicas estadísticas.



La consideración de incertidumbres en los parámetros estructurales y las cargas convellan a una descripción estocástica de las respuestas del sistema estructural. Para este propósito, el uso de métodos exactos de la teoría de la Probabilidad está limitada a casos simples. El método de Montecarlo es una herramienta general que salva esa dificultad y puede aplicarse a casos más complejos. Consiste en la generación de estadísticas artificiales de las respuestas por medio de modelos probabilísticos de los parámetros y las cargas.

Un **evento aleatorio** se define como el resultado de un experimento no-causal, es decir, un experimento en el cual se esperan muchos resultados. El resultado final del experimento, denominado **realización**, podría no coincidir con otro resultado obtenido en un intento distinto. Por ello, luego de una intensa repetición del experimento se obtiene una población de resultados que describe la aleatoriedad del fenómeno. Definamos el tamaño de la población por  $N$ .

Existen medidas que permiten describir la aleatoriedad inherente a tal población de resultados. La medida más básica se denomina **probabilidad del evento**. Típicamente, eventos como “ser mayor que  $x$ ”, “estar entre  $x$  e  $y$ ” o “ser el máximo de...” son usuales en ingeniería. Sea  $n_A$  la cantidad de resultados de la población que satisfacen el criterio de interés del evento  $A$ . La probabilidad del evento  $A$  puede ser estadísticamente determinado por:

$$P[A] \approx \frac{n_A}{N} \quad (2.1)$$

La exactitud de este valor depende de cuán grande es  $N$ . De hecho, la definición matemáticamente rigurosa es:

$$P[A] = \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{n_A}{N} \right) \quad (2.2)$$

Llamemos ahora  $X$  a los resultados del experimento. La **Función de Distribución Acumulada** (CDF) es una colección de probabilidades para el caso general del evento “ser menor que  $x$ ”, donde  $x$  se define como cualquier valor real (figura 2.5-a):

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (2.3)$$

Por otro lado, la probabilidad de que  $X$  se encuentre dentro del intervalo  $[a, b]$  está dado por:

$$P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) \quad (2.4)$$

En Estadística, la función de distribución es generada mediante un ordenamiento de la población de resultados en orden ascendente y luego aplicando la ecuación:

$$F_X(x_i) = \frac{i}{N} \quad (2.5)$$

Diversos modelos de función de distribución han sido desarrollados en la teoría de la Probabilidad. Estos modelos brindan una descripción ideal de los CDF a diferencia de aquellos derivados de un análisis estadístico. Mientras que el objetivo de la Estadística es

ajustar el mejor modelo CDF a la información disponible, el método Montecarlo usa modelos CDF ya ajustados de las diversas variables aleatorias para generar datos artificiales que serán usados como entradas en un conjunto de análisis estructurales determinísticos.

Un mejor reflejo estadístico de la población se denomina **histograma** (fig. 2.5-b), el cual se obtiene agrupando los datos en categorías (intervalos) y asignando a cada uno de ellos el número de casos que comprende. Este concepto está relacionado con el que en Probabilidad se denomina **Función de Densidad de Probabilidad** (PDF). Algunos ejemplos de PDFs se muestran en la figura 2.6. La relación entre el CDF y el PDF está dada por las siguientes relaciones matemáticas:

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \tag{2.6}$$

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_u(u) du \tag{2.7}$$

lo cual implica que

$$P[a < X \leq b] = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx \tag{2.8}$$

Cabe notar que

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = F_x(\infty) = 1 \tag{2.9}$$

lo cual implica que la probabilidad de ser menor que infinito es 1, y que

$$P[x < X] = 1 - F_x(x) \tag{2.10}$$

que define la probabilidad del evento complementario.

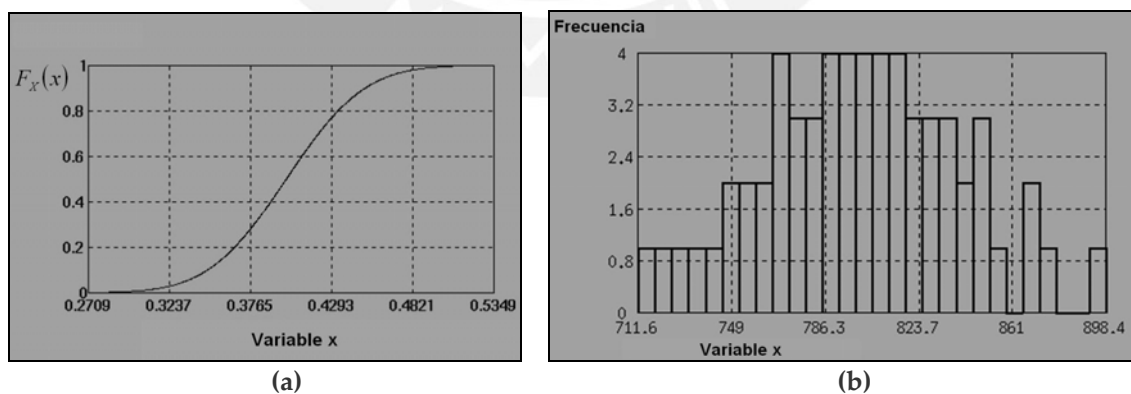


Fig. 2.5 (a) Función de distribución acumulada (CDF) de una variable  $x$ . (b) Histograma típico para una variable  $x$ .

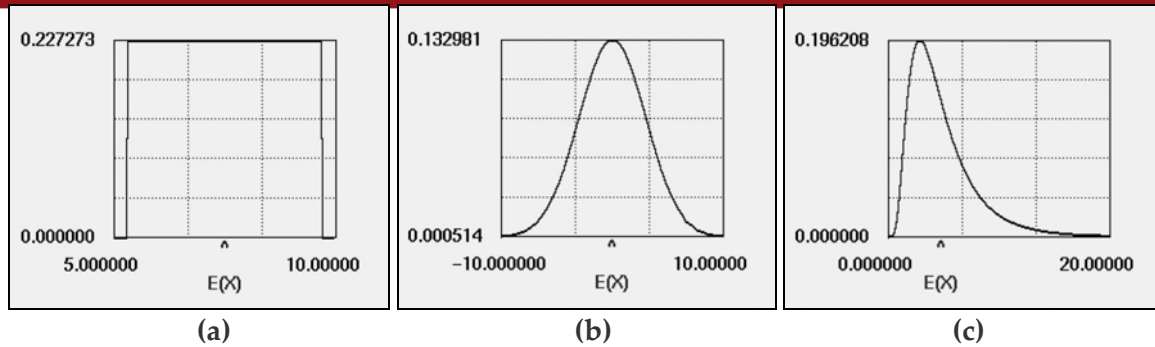


Fig. 2.6 Funciones típicas de densidad de probabilidad: (a) Distribución uniforme, (b) Distribución normal y (c) Distribución lognormal.

### 2.3.4 Simulación Montecarlo

Un primer análisis de la incertidumbre en la respuesta de un sistema con propiedades aleatorias se realiza mediante su descripción estadística. La simulación Montecarlo es el método más general y el más preciso para lograr este objetivo. Debido a que la distribución de probabilidad de las respuestas no están disponibles en muchos casos, a excepción de los más simples, y teniendo en cuenta las posibilidades de realizar muchos cálculos en paralelo (aplicaciones distribuidas) con computadoras potentes, el método Montecarlo se ha convertido en la herramienta más versátil y más poderosa para el análisis de incertidumbre de sistemas de cualquier tipo y naturaleza (Bratley et al. 1987, Rubinstein 1981 y Ripley 1987).

La idea general del método Montecarlo puede resumirse de la siguiente manera: sean las respuestas  $y$  de un sistema dependientes de un conjunto de variables aleatorias  $x$ , cuyas descripciones probabilísticas marginales (funciones de densidad de probabilidad, PDFs) son conocidas. Mediante técnicas y algoritmos ya probados, una gran población de muestras de cada una de estas variables (usualmente llamadas **variadas**) pueden ser generadas, de tal manera que sus histogramas se aproximen más a las marginales mientras más grande sea la población. Una población de muestras del mismo tamaño puede obtenerse ejecutando un “**solver**” (calculadora) de manera determinista, reemplazando aleatoriamente los valores de las variables aleatorias correspondientes en cada ejecución.

Existen 2 métodos generales para generar variadas aleatorias que corresponden a distribuciones marginales: el método de la **Inversión** y el método de la **Exclusión**. En el método de la **Inversión**, números aleatorios uniformemente distribuidos  $u_i$  son generados en el rango  $(0,1)$  y las correspondientes variadas son calculadas por inversión de la función de distribución de la variable (figura 2.7). El método de la **Exclusión** está basado en la siguiente idea: una variable aleatoria es generada usando una densidad ficticia que envuelve al valor objetivo y cuya área puede ser mayor que uno, lo cual indica que no es una función de densidad real sino solo un artificio matemático. El valor generado es aceptado con una probabilidad especificada que depende de la relación entre las densidades verdadera y ficticia. Sin embargo, en muchos casos se prefiere los métodos para generar variadas que son específicas a cada tipo de densidad marginal.

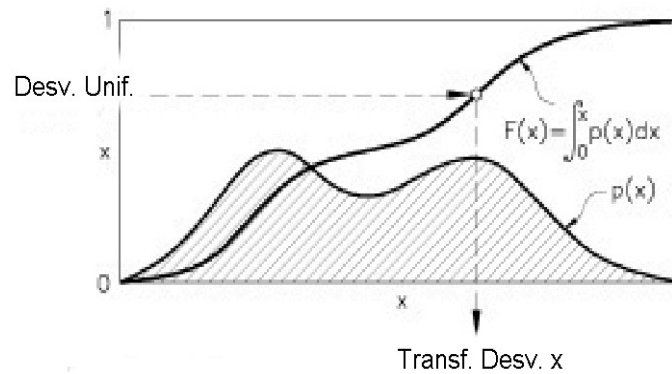


Fig. 2.7 Método de la Inversión para generar variatas aleatorias.

El método formulado arriba es un método mejor conocido como **Muestreo Aleatorio Simple** porque no se optimiza la población de muestras con el objetivo de reducir su tamaño y sin sacrificar la calidad de la descripción estadística del sistema. Mientras esta técnica puede ser rápida para el análisis de confiabilidad de componentes simples o aún para estructuras con un reducido número de grados de libertad, es muy costoso en términos de esfuerzo computacional para sistemas grandes. Para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hipercubo Latino (Florian 1992).

## 2.4 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Para el desarrollo del proyecto se han realizado investigaciones exclusivamente teóricas. La investigación involucró el estudio de las metodologías para generar curvas de fragilidad, el análisis de los parámetros involucrados en el proceso de simulación y la implementación de un programa de cómputo para generar curvas de fragilidad.

La metodología para el desarrollo de la investigación fue la siguiente:

### a) Investigación bibliográfica

Se buscó información sobre estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico en edificios. En particular, se estudió las curvas de fragilidad y sus métodos para generarlas. El método analítico consistente en simulación fue el de interés para este trabajo.

También se recurrió a la lectura de artículos técnicos relacionados con la generación de curvas de fragilidad de sistemas estructurales.

### b) Revisión de programas de cómputo

Se revisó los programas de cómputo disponibles para la simulación de sistemas físicos en general. En primer término se revisó el programa ST-ORM (EASI 2002) cuya finalidad es evaluar el comportamiento estocástico de sistemas físicos mediante simulación.

A partir de este programa se optó por desarrollar uno de similares características pero aplicado particularmente al análisis sísmico de estructuras. Este programa denominado "Fragilidad" se codificó en MatLab.

Se estudió el manejo del programa DRAIN-2DX (Prakah et al. 1993) para realizar el análisis dinámico no-lineal de estructuras planas. Este programa es utilizado por el programa "Fragilidad" como un módulo que se encarga de realizar el análisis sísmico.

Se estudió el manejo del programa SIMQKE-1 (Vanmarcke et al. 1976) para generar señales sintéticas (registros de acelerogramas aleatorios). Este programa también es utilizado como un módulo dentro del programa "Fragilidad".

c) Desarrollo del método analítico para generar curvas de Fragilidad.

Se desarrolló el método analítico para el cálculo de curvas de fragilidad. Esta etapa comprende la elaboración del algoritmo para la simulación. Las partes más importantes de este algoritmo son la definición de los estados de daño, y la definición de la incertidumbre y aleatoriedad de los indicadores de la acción sísmica y los parámetros estructurales.

Además se estudió el procedimiento para realizar el análisis dinámico no-lineal de las estructuras simuladas y los métodos estadísticos para procesar los resultados.

Todas las etapas del algoritmo para generar curvas de fragilidad fueron implementadas en el programa "Fragilidad".

d) Implementación en un programa de cómputo

Se implementó un programa en Matlab (MathWorks 2002) para generar curvas de fragilidad mediante simulación. El programa se aplica a estructuras planas y utiliza el DRAIN-2DX para realizar el análisis dinámico no-lineal y SIMQKE para generar acelerogramas aleatorios.

e) Estimación de pérdidas

Se desarrolló una metodología rápida para estimar costos de reparación a partir de las curvas de fragilidad. Esta metodología está basada en los conceptos del método HAZUS (FEMA 1999).

f) Aplicación a edificios peruanos

Se generó curvas de fragilidad para 2 edificaciones educativas típicas y se calcularon sus pérdidas probables (costos de reparación) para 3 escenarios de peligro sísmico.



## 3 CURVAS DE FRAGILIDAD

---

### 3.1 VULNERABILIDAD SÍSMICA

En este capítulo, se describen los conceptos relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Las curvas de fragilidad son las que representan en forma más general la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Para representar a vulnerabilidad sísmica de una estructura, de manera general, pueden mencionarse dos técnicas. La primera la constituye la evaluación visual y rápida de la vulnerabilidad sísmica mientras que la segunda es más sofisticada y requiere de análisis más detallados. De los métodos sofisticados se describirá el método analítico basado en curvas de fragilidad.

#### 3.1.1 Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica

La evaluación visual rápida de edificaciones es una de las muchas metodologías usadas para la estimación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. Esta metodología se basa en el procedimiento de asignación de puntajes a las estructuras y tiene el objetivo de identificar los edificios potencialmente vulnerables por medio de las deficiencias estructurales que presentan. Los reportes FEMA 154 y FEMA 155 (1988) describen el procedimiento de Evaluación Visual Rápida (PEVR), donde los edificios pueden ser evaluados rápidamente y ser calificados como sísmicamente aceptables o sísmicamente vulnerables.

El procedimiento de evaluación visual rápida (PEVR) permite identificar rápida y fácilmente aquellos edificios que podrían causar pérdida de vidas, daños o una severa interrupción de los servicios básicos de la comunidad debido a un evento sísmico. Este procedimiento se realiza con la intención de ser un método rápido y relativamente económico, aplicable a una gran cantidad de edificaciones.

El método genera un puntaje estructural  $P$ , el cual resulta de una serie de puntajes y modificadores basados en los atributos del edificio que pueden ser vistos desde la calle. Un puntaje bajo  $P$  sugiere que el edificio requiere un estudio adicional por un ingeniero estructural que tenga experiencia en el diseño sísmico, y un alto puntaje  $P$  indica que el edificio es adecuado.

Un inspector previamente calificado y preparado, completa los datos que se piden en una ficha de de evaluación (figura 3.1) basándose en una revisión rápida del edificio que puede demorar entre 15 a 20 minutos. La metodología se inicia identificando el sistema estructural y el material del que esta construido el edificio. En el formulario se

contemplan “puntajes de riesgo básicos” para diferentes tipologías de edificaciones que son producto del procesamiento de datos de encuestas realizadas a expertos. La tarea del inspector consiste en modificar estos puntajes, con algunos “puntajes modificadores” que se relacionan con las características que presenta el edificio. Los “puntajes modificadores” califican los defectos o bondades en el sistema sismorresistente. Finalmente se llega a un puntaje estructural P de cada uno de los edificios que se evalúan. El puntaje P califica el potencial peligro de una edificación ante la ocurrencia de un sismo. Este puntaje usualmente varía entre 0 y 6. A mayor puntaje implica mejor comportamiento ante la ocurrencia de un sismo.

El resultado final es una lista de “edificios evaluados” que serán divididos en dos categorías: Los que mantienen un nivel de riesgo aceptable con el fin de salvaguardar la vida de los ocupantes y los que podrían ser sísmicamente vulnerables y que deberán ser estudiados minuciosamente en el futuro. Para dividir en estas dos categorías se deberá decidir un puntaje que será el límite entre ambas y que en el caso de la comisión elaboradora de FEMA 154 fue de 2.

<b>ATC 21 (Areas NEHRP 5,6,7 Alta)</b>		DIRECCION:												
PEVR DE EDIFICACIONES POTENCIALMENTE SISMICAS		ZIP:												
		OTRAS CARACTERISTICAS												
		No PISOS:						AÑO CONSTR.:						
		EVALUADOR:						FECHA:						
		AREA TOTAL DE LA EDIFICACION.												
		NOMBRE DE LA EDIFICACION:												
		USO:												
<b>USO</b>		<b>PUNTAJES ESTRUCTURALES BASICOS Y MODIFICADORES</b>												
RESIDENCIAL	No PERSONAS 0 - 10 11 - 100 100 +	TIPOLOGIA	W	S1	S2	S3	S4	C1	C2	C3/S5	PC1	PC2	RM	URM
COMERCIAL		BASICO	4.5	4.5	3	5.5	3.5	2	3	1.5	2	1.5	3	1
OFICINA		ALTURA	N/A	-2	-1	N/A	-1	-1	-1	-0.5	N/A	-0.5	-1	-0.5
INDUSTRIAL		COND. POBRE	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1	-0.5	-0.5	-1	-1	-0.5	-0.5
PUBLICO		IRREG. VERT.	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1
COLEGIO		PISO BLANDO	-1	-2.5	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-2	-2	-1
EDIF. GOBIERNO		TORSION	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
SERV. EMERG		IRREG. PLANTA	-1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	-1	-1	-1	-1
EDIF. HISTOR.		CHOQUE	N/A	-0.5	-0.5	N/A	-0.5	-0.5	N/A	N/A	N/A	-0.5	N/A	N/A
PELIGRO		COLUM. CORT	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-1	-1	-1	N/A	-1	N/A	N/A
NO ESTRUCTURAL	<input type="checkbox"/>	NORMA ACT	2	2	2	2	2	2	2	N/A	2	2	2	N/A
CONFIANZA EN LOS DATOS		S1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
		S2	0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
		S3	N/A	-0.8	-0.8	N/A	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	N/A	-0.8	-0.8	-0.8
		PUNTAJE FINAL P												
COMENTARIOS												¿REQUIERE EVALUACION POSTERIOR? SI NO		

Fig. 3.1 Formulario de Evaluación Visual Rápida propuesto por FEMA 154 (1988).



### 3.1.2 Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño

Las curvas de fragilidad son una herramienta probabilística que constituyen la base para la estimación del riesgo sísmico. Los métodos para generar estas curvas son diversos y entre ellos destacan los métodos basados en observaciones de campo, los métodos experimentales, los métodos basados en opinión en expertos y los métodos analíticos (Bonett 2003).

Las curvas de fragilidad, denominadas también “funciones de vulnerabilidad”, representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Cuando no se dispone de suficiente información de campo, las curvas de fragilidad pueden generarse analíticamente mediante simulación (Hwang y Huo 1994).

La figura 3.2 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La intensidad sísmica se ha definido mediante el desplazamiento espectral  $S_d$ . Se observa que para un desplazamiento espectral  $D$ , la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo será de 10%. El 70% de edificios de este tipo sufrirían daño severo y el 20% daño moderado, ante la misma intensidad sísmica.

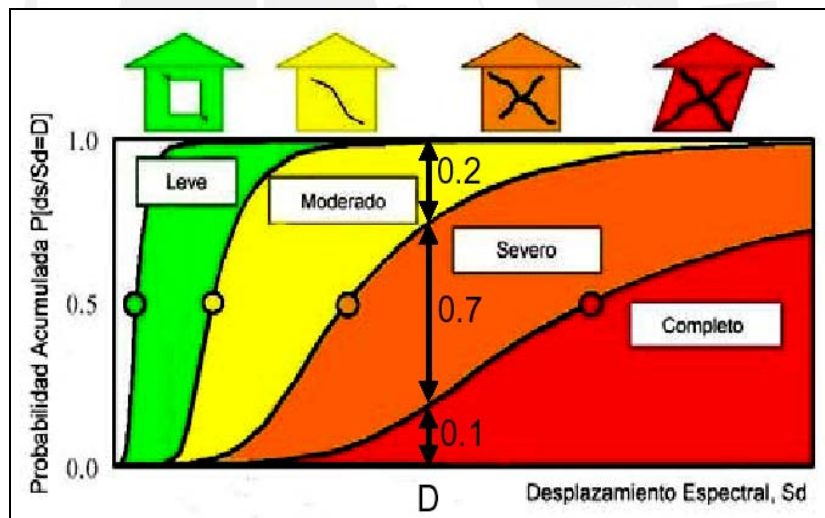


Fig. 3.2 Ejemplo de curvas de fragilidad (Muñoz 2004)

Las matrices de probabilidad de daño son otra forma de relacionar (en forma discreta) la intensidad sísmica con los estados de daño. Estas matrices expresan la probabilidad de obtener un determinado nivel de daño para una estructura sujeta a un sismo con un nivel de severidad determinado (Braga et al 1986).

En la tabla 3.1 se muestra un ejemplo de matriz de probabilidad de daño para otro tipo de estructura. En este caso, se observa que para un sismo de intensidad IX en la escala de Mercalli Modificada (MMI) se tiene una probabilidad de 3,0% de alcanzar daño ligero; 68,1% para daño moderado y 28,9% para daño pesado.

Tabla 3.1 Matriz de probabilidad de daño propuesta por el ATC-13 para una tipología estructural (1985)

Estado de Daño	Rango Factor Daño (%)	Factor Central Daño (%)	Probabilidad de daño en porcentaje para c/IMM y estado de daño							
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1-Sin Daño	0	0,0	0,1							
2-Mínimo	0 - 1	0,5	27,0	2,2						
3-Ligero	1 - 10	5,0	72,9	89,3	32,2	3,0				
4-Moderado	10 - 30	20,0		8,5	66,9	68,1	19,9	3,9	0,1	
5-Pesado	30 - 60	45,0			0,9	28,9	74,2	57,8	12,4	
6-Mayor	60 - 100	80,0					5,9	38,3	84,3	
7-Destrucción	100	100,0							3,2	

## 3.2 MÉTODOS PARA GENERAR CURVAS DE FRAGILIDAD

### 3.2.1 Métodos basados en observaciones de campo

Los métodos utilizados para la generación de curvas de fragilidad a partir de los daños observados, son de gran utilidad para calibrar los resultados obtenidos con los métodos analíticos y/o ensayos de laboratorio.

Estos métodos consisten básicamente en las siguientes etapas (Bonett 2003):

- Se define  $n$  el número de sismos para los cuales se cuenta con información de daños.
- Para cada sismo  $i$ , determinamos el parámetro que define la intensidad sísmica, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno  $a_i$  registrada en cada zona en estudio. Esto es:

$$a_i = PGA_i \quad \text{para } i=1,2,3,\dots, n$$

donde  $a_1 < a_2 < \dots < a_n$

- Se determina el número de estructuras  $N_k$  sometidas a un sismo  $i$  con una aceleración máxima del terreno igual a  $a_i$ .
- Se definen los estados discretos de daño  $ED_j$ .
- Se calcula el número de estructuras  $m_j$  que exceden los estados de daño  $ED_j$ , para cada  $a_i$ .
- Para cada estado de daño  $ED_j$ , se estima la probabilidad de falla  $f_j$  de la estructura cuando se ve sometida a un sismo con un **PGA**=  $a_i$ , mediante la siguiente expresión:

$$f_j = \frac{m_j}{N_k}$$

- Se ajusta una función de distribución para el grupo de datos obtenidos ( $a_i, f_j$ ) correspondientes a cada estado de daño  $ED_j$ , como por ejemplo una función log-normal.

Los métodos basados en las observaciones de campo, sólo deben ser utilizados para evaluar, de manera global, el comportamiento de las estructuras de una misma clase y no son recomendados para el análisis de una estructura en particular. Un ejemplo de aplicación de este tipo de metodologías, son las curvas de fragilidad desarrolladas por Yamazaki y Murao (2000) para los edificios en Japón (figura 3.3), a partir del informe realizado por el gobierno de la ciudad de Nishinomiya de los daños observados en diferentes estructuras después del sismo del 17 de Enero de 1995 en Hyogoken-Nanbu (Kobe - Japón).

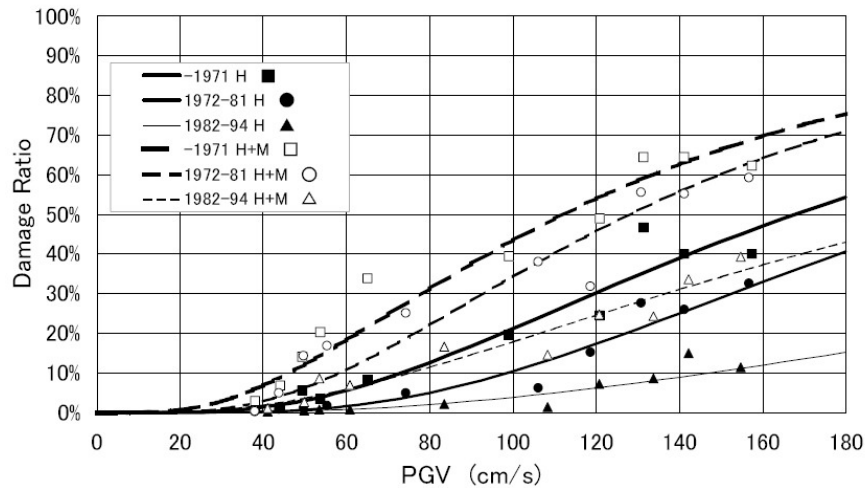


Fig. 3.3 Curvas de fragilidad para edificios japoneses de concreto armado, generado mediante observaciones de campo (Yamazaki y Murao 2000)

### 3.2.2 Métodos experimentales

El mismo procedimiento utilizado para generar las curvas de fragilidad a partir de observaciones de daño, puede ser empleado para los datos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio. En este caso, el rango de intensidades y el tipo de estructura puede ser controlado de acuerdo a los requerimientos establecidos previamente. Sin embargo, los ensayos pueden ser costosos y la cantidad de observaciones de daños está limitada al número de pruebas que se realicen. En la actualidad, existen básicamente dos tipos de ensayos que pueden ser utilizados para construir estas curvas:

- Ensayos de carga monotónicamente creciente mediante actuadores de carga o desplazamientos.
- Ensayos sobre mesa vibradora, utilizando registros tiempo-historia de aceleración.

Ambos ensayos proporcionan información de gran utilidad. Los ensayos del segundo tipo son mucho más realistas, debido a que representan, de una forma más adecuada, la acción sísmica.

Chong y Soong (2000) desarrollaron curvas de fragilidad experimentales para componentes no estructurales. Para ello, determinaron los desplazamientos relativos entre un bloque rígido independiente y una superficie de piso rugosa, a partir de los ensayos

realizados en una mesa vibradora utilizando cinco registros de aceleraciones de sismos típicos (El centro, Taft, Pacoima, Kobe y Northridge) elegidos aleatoriamente. Se consideraron cinco valores de aceleración máxima horizontal ( $hPGA = 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6$  y  $0,7g$ ) y cuatro factores de escala diferentes para representarla aceleración máxima vertical  $vPGA / hPGA = 0, 1/4, 1/3$  y  $1/2$ . El primero de estos factores  $vPGA/hPGA = 0$  corresponde al caso en que no se considera la componente de aceleración máxima vertical. Las mediciones de los valores de  $hPGA$  y  $vPGA$  se hicieron en varios puntos de la mesa. Para medir los desplazamientos horizontales del bloque, se utilizaron tanto transductores de desplazamiento (Temposonic displacement transducers LVDT) como indicadores permanentes localizados sobre la superficie de deslizamiento. Se construyeron curvas de fragilidad para 8 umbrales de desplazamiento relativo entre 0,1 y 3 pulgadas. Estos umbrales pueden relacionarse directamente con los estados discretos de daño. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de las curvas obtenidas para un umbral de desplazamiento relativo igual a 1 pulgada. En el eje de las abscisas están los valores de aceleración máxima horizontal,  $hPGA$ , y en las ordenadas las probabilidades de que el desplazamiento relativo sea mayor o igual a 1 pulgada.

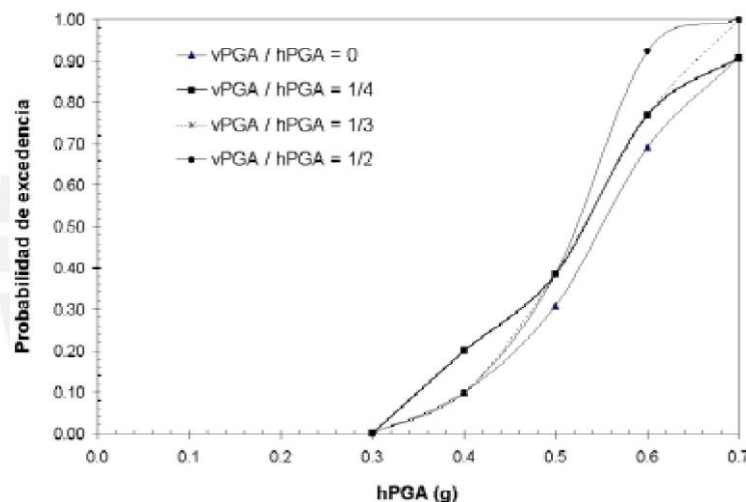


Figura 3.4 Ejemplo de curvas de fragilidad experimentales para un desplazamiento relativo máximo de 1 pulgada (Chong y Soong, 2000).

### 3.2.3 Métodos a partir de la opinión de expertos

La estimación del porcentaje esperado de daño que puede sufrir un grupo de estructuras ante una intensidad sísmica dada, se determina también a partir de las respuestas de expertos en análisis, diseño y patología estructural, a una serie de preguntas relacionadas con el comportamiento de la estructura considerada. A partir de esta información se puede calcular un parámetro cuantificador del daño, que es función de la intensidad sísmica del movimiento. Una vez calculado este factor, para todas las estructuras correspondientes a una misma clase, se determinan los estadísticos de los resultados obtenidos y se ajusta una función de distribución de probabilidad (generalmente se utiliza la función beta). Posteriormente, se establecen los estados discretos de daño que se desean considerar y, para cada uno de estos, se define un intervalo de variación del parámetro cuantificador del daño. Las probabilidades para cada estado de daño se pueden



determinar integrando la función de distribución elegida entre los límites de los respectivos intervalos. Las curvas de fragilidad se obtienen graficando estas probabilidades para cada valor de la intensidad sísmica.

Anagnos et al., (1995) siguieron este método para transformar las matrices de probabilidad de daño del ATC-13, en curvas de fragilidad para 40 clases de edificios. Para ello, utilizan la escala de intensidad de Mercalli modificada MMI para caracterizar la demanda sísmica y el factor de daño  $df$  para representar el comportamiento de la estructura. Este parámetro se define como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición para un determinado valor de la intensidad sísmica del movimiento. Se consideran 7 valores de MMI (variando entre V I y XII cada grado de intensidad) y 6 factores de daño  $df$  (0.1%, 1.0%, 10%, 30%, 60% y 99%). Para calcular las probabilidades de excedencia, se utilizan los intervalos de variación propuestos en el ATC-13 (ver Tabla 3.2) y la función de distribución beta. Así por ejemplo de acuerdo a la Tabla 3.2, la probabilidad de exceder o igualar el estado de daño "Mayor" se obtiene integrando la función de distribución de probabilidad beta para los valores del factor de daño mayores o iguales al 60 %. La Figura 3.5 muestra cinco curvas de fragilidad para un edificio de mampostería no reforzada de elevación media obtenidas mediante este método. En este caso, los estados de daño están representados por los valores discretos del factor de daño.

Tabla 3.2. Estados discretos de daño e intervalos de variación del factor de daño (ATC, 1985).

Estado de Daño	Intervalo del Factor de Daño (%)	Factor de Daño Central (%)
Sin daño	0	0
Leve	0 - 1	0.5
Suave	1 - 10	5
Moderado	10 - 30	20
Fuerte	30 - 60	45
Mayor	60 - 100	80
Destrucción	100	100

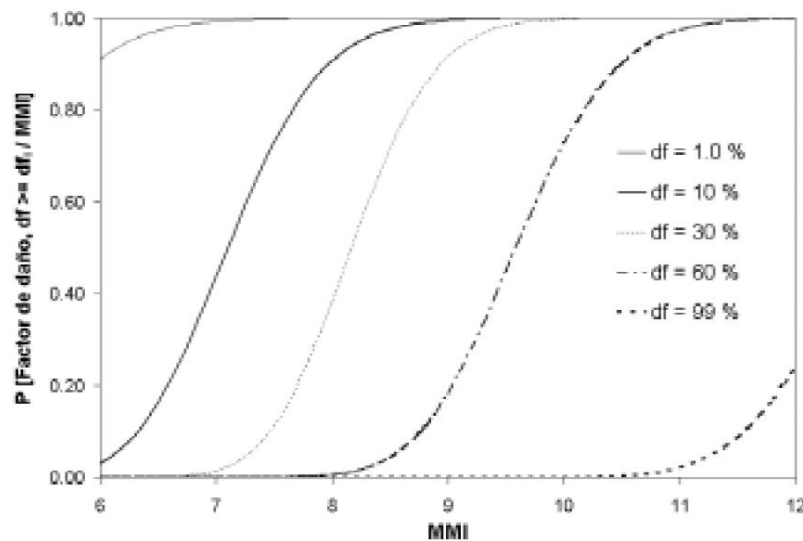


Figura 3.5 Ejemplo de curvas de fragilidad obtenidas a partir de la opinión de expertos para un edificio de mampostería de elevación media (Anagnos et al., 1995).  $df$  es el factor de daño o "damage factor".

Aguilar y Astorga (2006) desarrollaron un método basado en opinión de expertos para generar las curvas de fragilidad de estructuras de edificaciones educativas peruanas. En la figura 3.6 se muestra el formato de encuesta utilizado para entrevistar a los expertos.

### Porcentaje de Daños en Edificaciones Educativas Peruanas

Por favor anote los valores que en su opinión describen la relación Daño-Intensidad para las edificaciones educativas peruanas.

Gran Unidad Escolar																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiability																				

Módulo 780 pre Norma de 1997																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiability																				

Módulo 780 actual																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiability																				

Edificio de Educación Superior																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiability																				

Módulo de adobe																				
Intensidades	V - VI				VII				VIII				IX				X - XI			
Daño	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)	ND	Min (%)	VMP (%)	Max (%)
Confiability																				

Figura 3.6 Formato de encuesta utilizado por Aguilar y Astorga (2006) para generar curvas de fragilidad basado en opinión de expertos.

### 3.2.4 Métodos analíticos

Estos métodos utilizan análisis numéricos y pueden ser empleados para zonas donde no se dispone de observaciones de daños debidos a sismos, ni de suficientes resultados de ensayos de laboratorio.

Los resultados obtenidos con este tipo de métodos, son muy sensibles a los modelos construidos para representar las estructuras y la acción sísmica, por lo tanto, deben utilizarse modelos que representen de la mejor forma posible tanto el comportamiento sísmico estructural como las principales características de los movimientos del terreno.

Los recientes avances en la ingeniería sísmica indican que los métodos probabilistas deben ser utilizados para proporcionar las bases para la mejora del diseño sismorresistente de estructuras y para establecer las condiciones de las metodologías de evaluación del daño.

Las comparaciones realizadas entre los daños observados y los calculados, muestran que, a pesar de los recientes avances en el análisis dinámico no lineal y en el modelado de estructuras, hay fuertes limitaciones en utilizar métodos puramente deterministas para evaluar el daño en las estructuras después de ocurrido un sismo. Las incertidumbres tanto en los parámetros sísmicos como estructurales, pueden producir discrepancias significativas entre el comportamiento observado y el calculado. Por lo tanto, los métodos probabilistas son esenciales para proporcionar una perspectiva del comportamiento estructural ante la ocurrencia de un determinado sismo (Ellingwood, 2001).

La metodología para generar curvas de fragilidad mediante un método analítico considera la variabilidad y aleatoriedad en los parámetros de la estructura y de la acción sísmica. Por lo tanto, ésta metodología consiste en un proceso de simulación, tal como se describe de manera detallada en el siguiente apartado.

### 3.3 CURVAS DE FRAGILIDAD ANALÍTICAS

El método analítico para generar curvas de fragilidad se emplea en zonas donde no se dispone de suficiente información de daños producidos por sismos, ni de suficientes ensayos de laboratorio (Bonett 2003).

El procedimiento para generar curvas de fragilidad consiste en calcular la respuesta de un grupo significativo de estructuras ante diferentes niveles de demanda sísmica. Del procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado se obtienen las curvas de fragilidad. Para generar la muestra se toman en cuenta las variaciones en las propiedades estructurales, en la demanda sísmica y en los estados de daño representado por un parámetro indicador del daño (PID). Usando, luego, procedimientos de análisis dinámico no-lineal, se calcula la respuesta y se construyen funciones de distribución de probabilidad para el daño alcanzado. Finalmente, en base a estas funciones se logra representar la vulnerabilidad mediante curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño. Las etapas de esta metodología se muestran en la figura 3.7



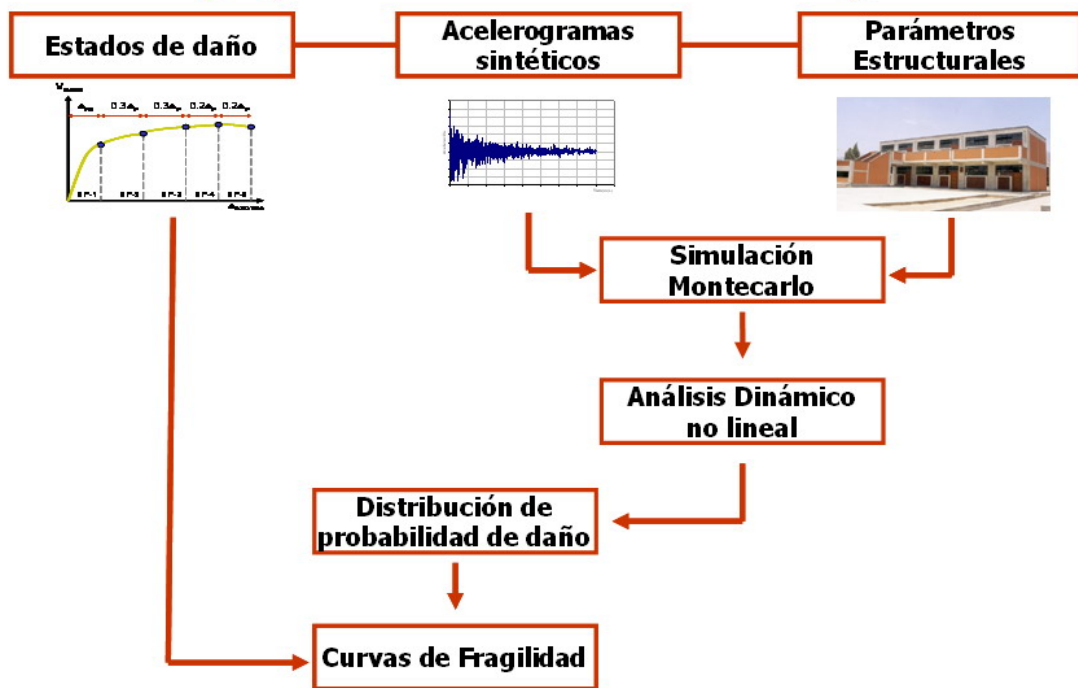


Figura 3.7 Metodología para la simulación de las curvas de fragilidad (Adaptado de Bonett 2003)

### 3.3.1 Simulación Montecarlo para estimar la respuesta estructural

El método de Montecarlo es una técnica de simulación que permite estimar la respuesta de procesos estocásticos. A partir de funciones de distribución de probabilidad de las variables del proceso se pueden estimar las respuestas (Bonett 2003, Erberik y Elnashai 2004). Para estudiar la vulnerabilidad de edificios, se genera un conjunto de muestras de las variables que representan los parámetros sísmicos y estructurales. Los valores para cada parámetro se eligen en forma aleatoria a partir de su función distribución de probabilidad. Para obtener resultados confiables se requiere de un gran número de ejecuciones. Para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hipercubo Latino (Florian 1992). Esta técnica permite reducir la muestra a 100 modelos estructurales que representan razonablemente bien las incertidumbres en las variables sísmicas y estructurales.

#### a) Estados de Daño

Los estados de daño normalmente se clasifican como: sin daño, leve, moderado, severo y colapso. Debido a que los elementos estructurales y no estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, se propone en este método usar la deriva máxima de entrepiso  $D_{\text{máx}}$  como Parámetro Indicador del Daño Estructural (PID). Este concepto se ilustra en la figura 3.8.

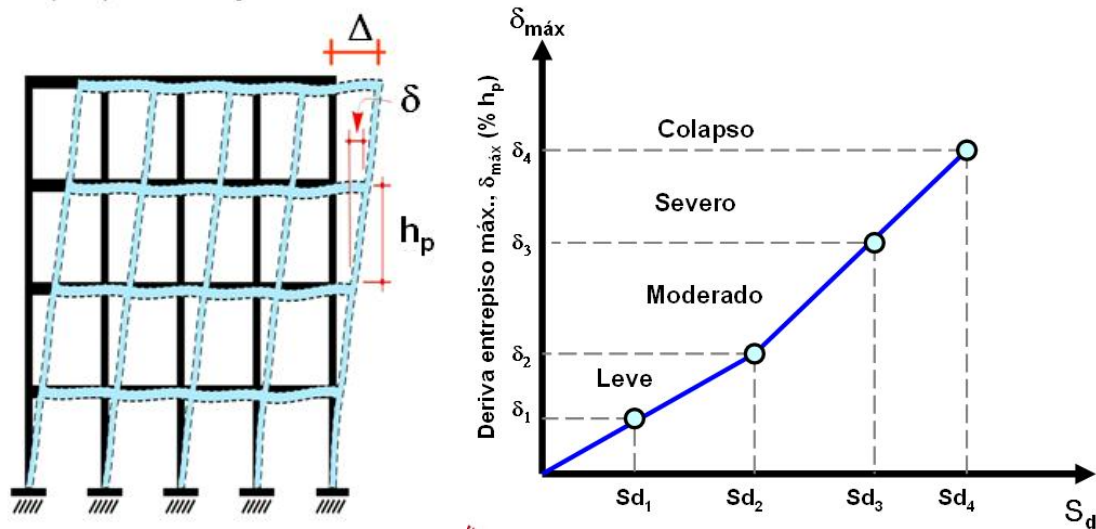


Figura 3.8 Definición del concepto de deriva de entrespiso  $D_{\text{m\acute{a}x}}=d/h_p$  (izquierda) y relación entre las derivas máximas de entrespiso y los desplazamientos espectrales obtenidos el espectro de capacidad (derecha).

A partir de la relación entre las derivas máximas de entrespiso  $D_{\text{m\acute{a}x}}$  o  $\delta_{\text{m\acute{a}x}}$  (expresado como un porcentaje de  $h_p$ ) y los desplazamientos espectrales obtenidos del espectro de capacidad de la estructura, es posible determinar los estados de daño discretos.

**b) Parámetros sísmicos**

Para representar la acción sísmica en el análisis no-lineal se utilizan señales sintéticas (acelerogramas aleatorios). Se generan señales compatibles con el espectro de peligro uniforme del sitio. Estas señales sintéticas se generan para un Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS). El PIS utilizado es la aceleración máxima del suelo (PGA) debido a que el peligro sísmico está definido en función de este parámetro en todo el territorio peruano. En la figura 3.9 se observan acelerogramas generados para un determinado sitio con PGAs de 0,20g y 0,40g compatibles con el espectro elástico de diseño de la norma peruana.

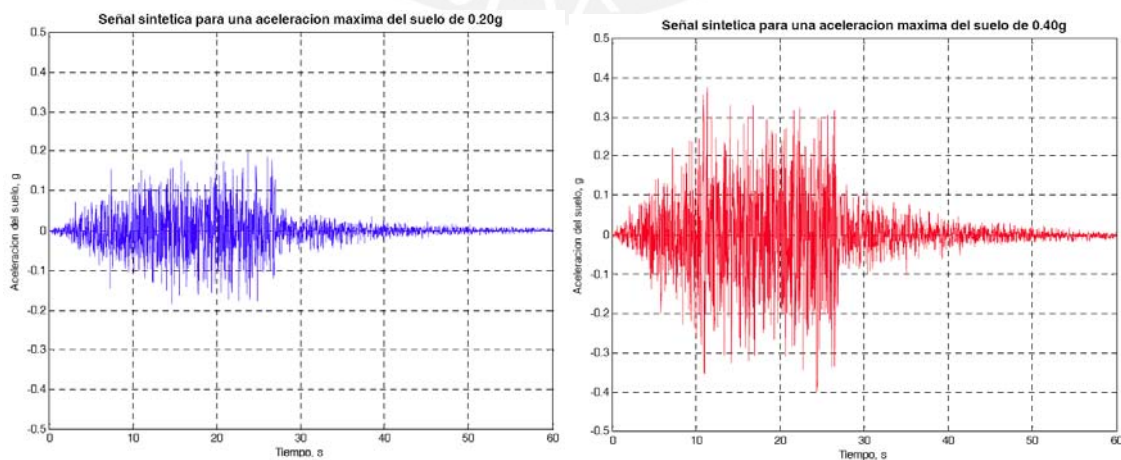


Figura 3.9 Señales sintéticas generados para una aceleración máxima del terreno (PGA) de 0,20g (izquierda) y 0,40g (derecha).

Estas señales se generan de manera aleatoria mediante el programa SIMQKE teniendo en cuenta que su espectro de respuesta sea compatible con el espectro de diseño de la norma peruana de diseño sismorresistente. En la figura 3.10 se muestran algunos espectros de respuesta calculados para acelerogramas aleatorios.

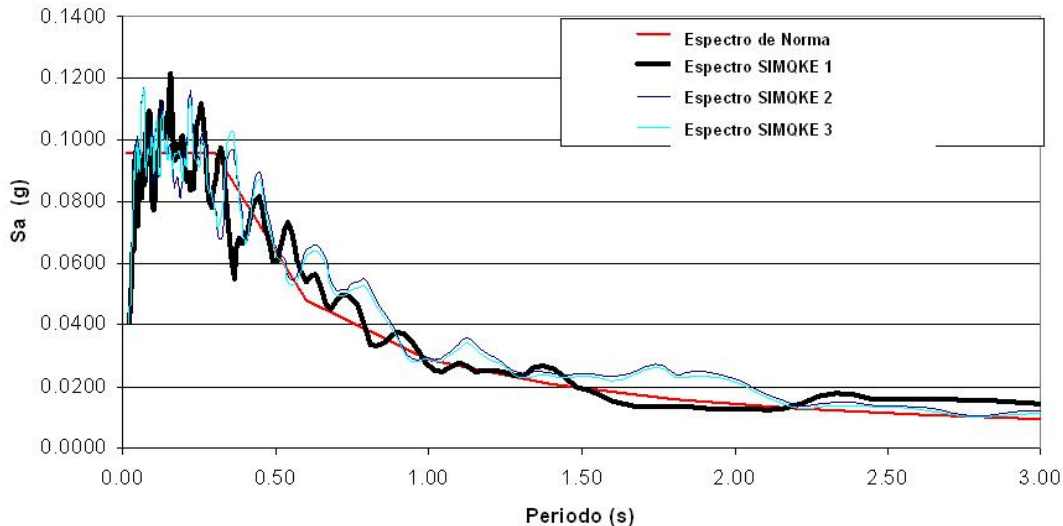


Figura 3.10 Espectros de respuesta generados en SIMQKE para algunas señales sintéticas.

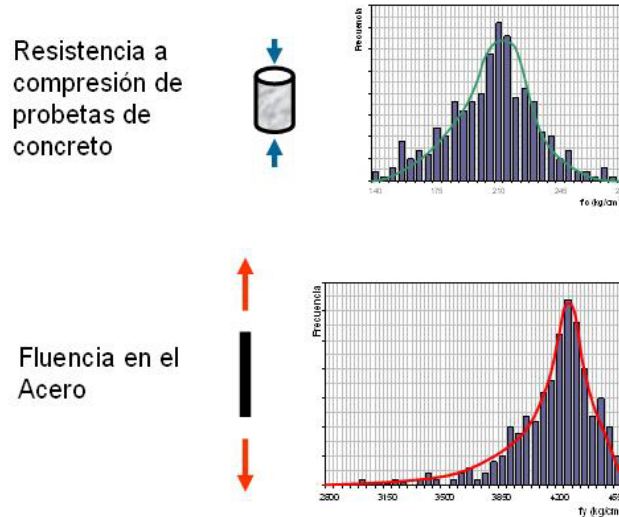
### c) Parámetros estructurales

Si observamos el grupo de viviendas de la figura 3.11 notamos que las estructuras son muy similares. Sin embargo, a pesar de que estas viviendas pueden haber sido construidos por la misma compañía o el mismo personal del trabajo, e inclusive con los mismos materiales, existe la posibilidad de que sus propiedades mecánicas presenten variabilidad. En consecuencia, el comportamiento frente a los sismos también será variable. Es por ello que se debe considerar de manera estocástica la variabilidad e incertidumbre en los parámetros estructurales. En este estudio se toman en cuenta aquellos parámetros que determinan el comportamiento no lineal de la estructura.



Figura 3.11 Viviendas con similares características arquitectónicas y estructurales.

Para las estructuras de concreto armado estudiadas, los parámetros estructurales considerados fueron la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ), tal como se muestran en la figura 3.12. De acuerdo a datos experimentales el  $f_y$  se ajusta mejor a una distribución lognormal. Para el  $f_y$  de 4200kg-f/cm<sup>2</sup> se usa una media de 4800kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 6%. En el concreto, es típico utilizar la distribución normal y para un concreto con  $f'_c$  de 280 kg-f/cm<sup>2</sup> se adopta una media de 320 kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 15%.



**Figura 3.12** Funciones de distribución de probabilidad para la resistencia a compresión del concreto (distribución normal) y el esfuerzo de fluencia del acero (distribución lognormal).

### 3.3.2 Análisis Dinámico No-lineal

El modelo estructural considera elementos unidimensionales con rótulas concentradas por flexión y rótulas concentradas por corte, de tal manera que se toma en cuenta la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo. Los modelos simulados son sometidos a las señales sintéticas que representan el movimiento sísmico. Para realizar el análisis no-lineal se utiliza el programa DRAIN-2DX (Prakah et al. 1993). En la figura 3.13 se observa una respuesta de desplazamiento típica de un análisis dinámico no-lineal.



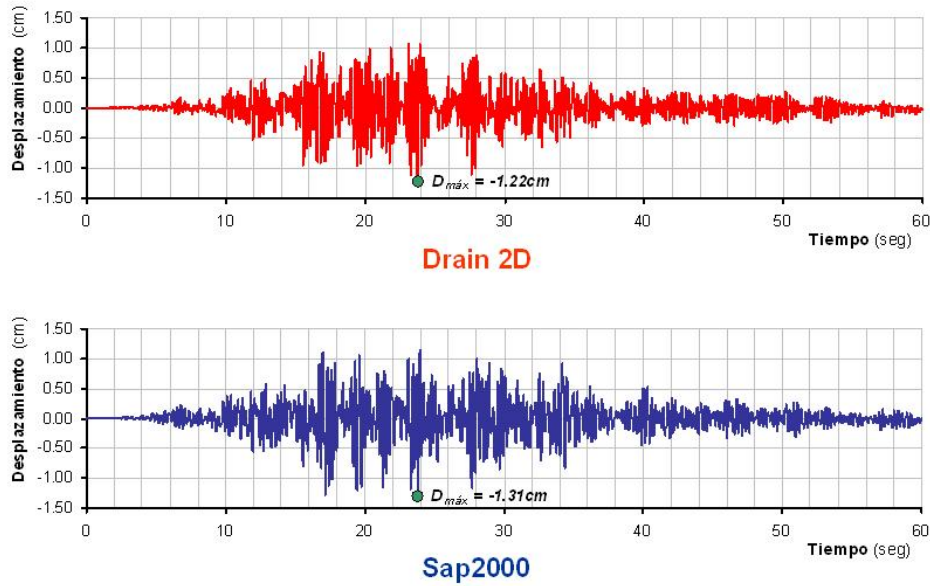


Figura 3.13 Respuestas de desplazamiento en azotea para una estructura plana, estimadas mediante DRAIN 2DX (arriba) y SAP2000 (abajo).

### 3.3.3 Función de distribución de probabilidad del daño

A partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación, se obtienen las funciones de distribución de probabilidad del PID para cada nivel de intensidad sísmica (PIS). La figura 3.14 muestra un ejemplo para los desplazamientos laterales máximos de un colegio típico peruano. Estas curvas fueron ajustadas mediante polinomios cúbicos normales (Hong y Lind 1996).

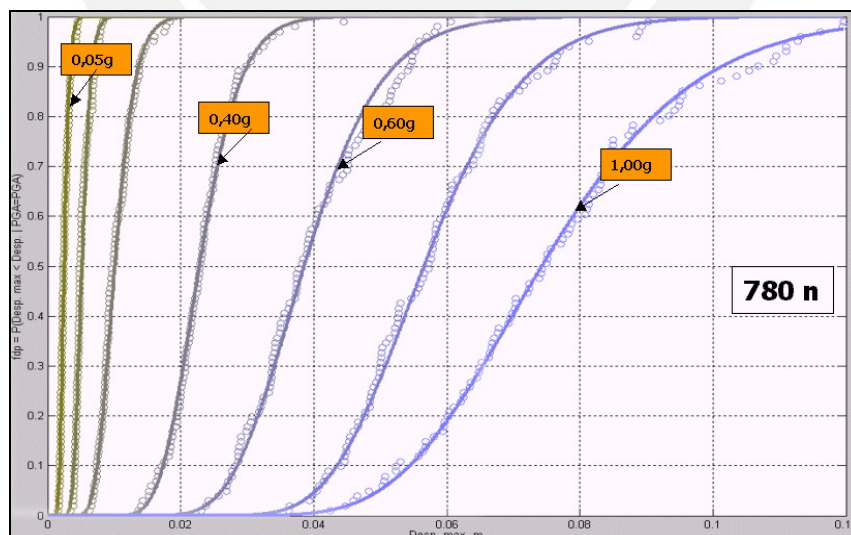


Fig. 3.14 Función de distribución de probabilidad acumulada (fdp) de los desplazamientos laterales máximos para un modelo de colegio típico peruano.



### 3.3.4 Generación de las curvas de fragilidad

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural (figura 3.14) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño ED<sub>i</sub> (Bonett 2003). Ésto es:

$$FD = P[ED \geq ED_i | PIS = PIS_i] \quad (3.1)$$

La figura 3.15 muestra el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para un PGA de 0,20 g, y  $\delta_{\max} = 0,90 \%$  correspondiente al estado de daño severo, se tiene una fdp de 0,50. La probabilidad de excedencia se obtiene como  $FD = 1 - fdp = 1 - 0,50 = 0,50$ ; que representa una probabilidad del 50% de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno de 0,20g. Los puntos así obtenidos se pueden también ajustar a los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o a una distribución lognormal. Se aplica el mismo procedimiento para los demás estados de daño y se obtienen curvas como las mostradas en la figura 3.2.

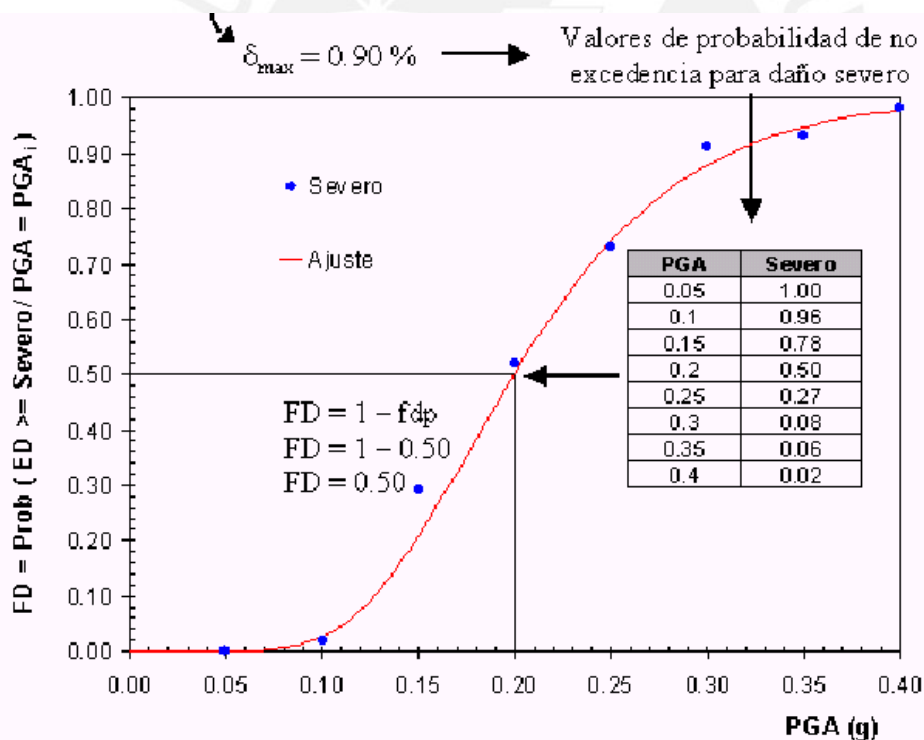


Figura 3.15 Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad a partir de las fdp y de los umbrales de los estados discretos de daño. a) Para el umbral de daño severo ( $\delta_{\max} = 0,9\%$ ) se leen las fdp's correspondientes a cada PGA. b)  $FD_i$  se obtiene como  $1 - fdp_i$  y se ajusta la curva de probabilidad a los puntos obtenidos. (Bonett 2003).

### 3.4 ALGORITMO PARA GENERAR CURVAS DE FRAGILIDAD ANALÍTICAMENTE

En esta investigación se ha implementado un algoritmo basado en los conceptos explicados en este capítulo. De manera general, los pasos para generar curvas de fragilidad están basados en la metodología mostrada en la figura 3.7 y se detallan a continuación:

- a) Definir los datos del problema:
  - Definir el modelo estructural plano que represente adecuadamente el comportamiento sísmico del edificio en estudio.
  - Definir los estados de daño discretos a partir de la curva de capacidad de la estructura.
  - Definir los NIS niveles de intensidad sísmica:  $N_1, N_2, \dots, N_{NIS}$ .
  - Definir el número de muestras que se generarán para cada parámetro estructural y para cada parámetro sísmico: NM. El número de análisis determinísticos a realizar, en total será  $NIS \times NM$ .
  - Definir los NP parámetros estructurales en los que se considerarán variabilidad:  $PE_1, PE_2, \dots, PE_{NP}$ . Cada parámetro estructural viene definido por su función de densidad de probabilidad  $fdp_1, fdp_2, \dots, fdp_{NP}$ .
  - Definir NS parámetros sísmicos en los que se considerará variabilidad:  $PS_1, PS_2, \dots, PS_{NS}$ . Cada parámetro sísmico viene definido por su función de densidad de probabilidad:  $fdps_1, fdps_2, \dots, fdps_{NS}$ .
- b) Fijar un nivel de intensidad sísmica  $N_k$ , para  $k=1, 2, \dots, NIS$ .

Para cada nivel de intensidad sísmica, generar las  $NM \times NP$  muestras de parámetros estructurales y las  $NM \times NS$  muestras de parámetros sísmicos. Se utiliza el Método Inverso y la técnica del Hipercubo Latino para generar un valor para cada parámetro de manera aleatoria a partir de su función de densidad de probabilidad (normal, uniforme, lognormal, etc.). Es decir:

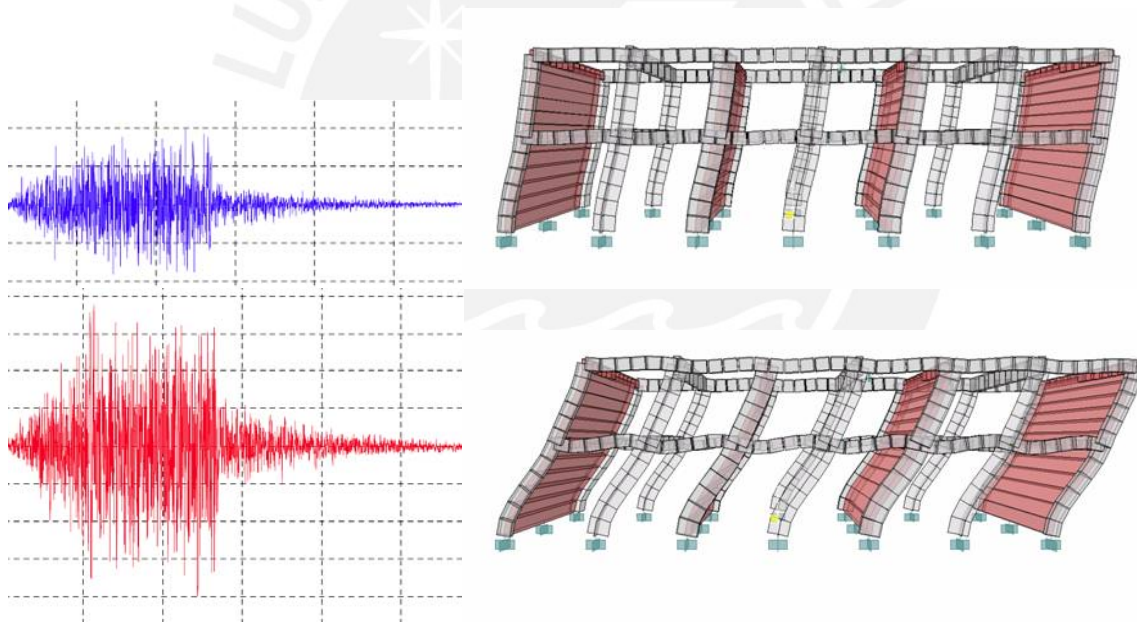
- Para cada parámetro estructural  $PE_i$ , con  $i = 1, 2, \dots, NP$ , generar NM muestras de parámetros estructurales. Es decir:
  - NM muestras de  $PE_1$  a partir de su distribución  $fdp_1$
  - NM muestras de  $PE_2$  a partir de su distribución  $fdp_2$
  - ...
  - NM muestras de  $PE_{NP}$  a partir de su distribución  $fdp_{NP}$
- Para cada parámetro sísmico  $PS_j$ , con  $j = 1, 2, \dots, NS$ , generar NM muestras. Es decir:
  - NM muestras de  $PS_1$  a partir de su distribución  $fdps_1$
  - NM muestras de  $PS_2$  a partir de su distribución  $fdps_2$
  - ...
  - NM muestras de  $PS_{NS}$  a partir de su distribución  $fdps_{NS}$ .
- Se reúnen de manera aleatoria un conjunto de parámetros estructurales con un conjunto de parámetros sísmicos. En esta etapa el conjunto de parámetros sísmicos

viene representado por una sola señal sintética. Se realiza el análisis dinámico no-lineal de las estructuras generadas (figura 3.16) para obtener las respuestas de derivas máximas de entrepiso. Es decir, se cuenta con NM muestras de modelos estructurales:

- Modelo estructural 1 con parámetros estructurales  $PE_1, PE_2, \dots, PE_{NP}$  y sometido a un señal sintética caracterizada por sus parámetros sísmicos  $PS_1, PS_2, \dots, PS_{NS}$ .
- Modelo estructural 2 con parámetros estructurales  $PE_1, PE_2, \dots, PE_{NP}$  y sometido a un señal sintética caracterizada por sus parámetros sísmicos  $PS_1, PS_2, \dots, PS_{NS}$ .
- ...
- Modelo estructural NM con parámetros estructurales  $PE_1, PE_2, \dots, PE_{NP}$  y sometido a un señal sintética caracterizada por sus parámetros sísmicos  $PS_1, PS_2, \dots, PS_{NS}$ .

Repetir el paso (b) para valores de  $k$  desde 1 hasta NIS.

En esta etapa deben ejecutarse un total de  $NM \times NIS$  análisis determinísticos de tipo análisis dinámico no-lineal de estructuras.



**Figura 3.16** Para cada nivel de intensidad sísmica, se generan modelos estructurales aleatoriamente que son sometidos a señales sintéticas escogidas aleatoriamente.

- c) Para cada nivel de intensidad sísmica  $N_k$ , para  $k=1, 2, \dots, NIS$ , construir las funciones de distribución acumulada (figura 3.14) de las derivas máximas de entrepiso aplicando los conceptos de la sección 3.3.3.
- d) Para cada estado de daño se construyen las curvas de fragilidad siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 3.15.

## 4 PÉRDIDAS POR SISMO

### 4.1 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

El proceso para generar las curvas de fragilidad se ha implementado en un programa desarrollado en MatLab (MathWorks 2002) y se llama “Fragilidad”. Este programa tiene la intención de ser de propósito general, es decir, que pueda aplicarse al estudio de cualquier tipología estructural. En el futuro se pretende mejorar la interfase (figura 4.2) y habilitar más opciones para que pueda aplicarse en la estimación del riesgo sísmico de los edificios de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

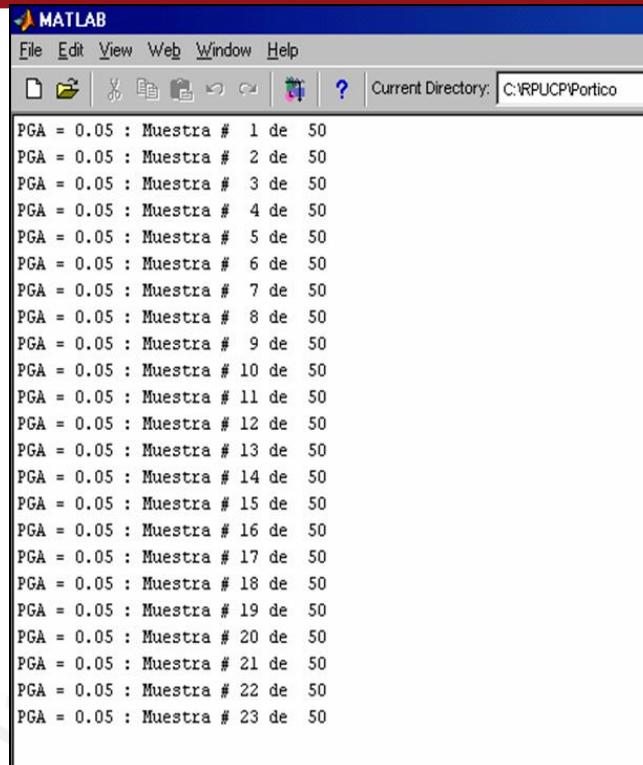
El código ha sido desarrollado de acuerdo a las especificaciones descritas en el Anexo B. Cada bloque representa un módulo del programa y puede documentarse, optimizarse y mantenerse en forma independiente. El programa “Fragilidad” requiere de un archivo de entrada de datos (figura 4.1) donde se debe proporcionar la información sobre el modelo estructural, los parámetros sísmicos y estructurales, las funciones de distribución de probabilidad, la definición de los estados de daño y los parámetros del proceso de simulación.

```

73 ! CENTRO DE MASA
74 $ 011 200
75 $ 011 300
76 ! *****
77 *SLAVING
78 $ 100 200 201 214
79 $ 100 300 301 314
80 ! *****
81 *MASSES
82 $ 100 28.6 200 2.650
83 $ 100 15.5 300 2.650
84 ! *****
85 *ELEMENTGROUP
86 ! *****
87 ! DEFINICION DE ELEMENTOS
88 2 0 0 0.0 COLUMNS Y VIGA
89 ! *****
90 ! DEFINICION DE ELEMENTOS TIPO 2
91 6 0 6
92 ! *****
93 ! DEFINICION DE RIGIDECES
94 ! E SHR Ag Ix kii kjj kij
95 1 2200000.0 0.046 0.1438 3.961E-03 4.0 4.0 2.0
96 2 2200000.0 0.027 0.2850 1.560E-02 4.0 4.0 2.0
97 3 2200000.0 0.027 0.2250 1.520E-02 4.0 4.0 2.0
98 4 2200000.0 0.047 0.1375 3.466E-03 4.0 4.0 2.0
99 5 2200000.0 0.042 0.1375 3.466E-03 4.0 4.0 2.0
00 6 2200000.0 0.045 0.1750 7.146E-03 4.0 4.0 2.0
01 ! *****
02 ! DEFINICION DE DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA (NO CONSIDERA P-M)
03 ! My+ My- Pt Pc
04 1 1 12.80 12.80
05 2 1 31.75 31.75
06 3 1 24.02 24.02
07 4 1 11.50 11.50
08 5 1 12.03 12.03
09 6 1 15.85 20.61
10 ! *****
11 ! GENERACION DE ELEMENTOS
12 1 0101 0201 1 1 1 1
13 2 0102 0202 1 2 2 2
14 3 0103 0203 1 3 3 3
15 4 0104 0204 1 2 2 2
    
```

Figura 4.1 Archivo de entrada de datos para los programas DRAIN-2DX y “Fragilidad”.





```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\RPUCP\Portico
PGA = 0.05 : Muestra # 1 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 2 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 3 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 4 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 5 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 6 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 7 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 8 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 9 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 10 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 11 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 12 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 13 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 14 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 15 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 16 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 17 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 18 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 19 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 20 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 21 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 22 de 50
PGA = 0.05 : Muestra # 23 de 50
  
```

**Figura 4.2** Interfase del programa “Fragilidad. En este ejemplo se calculan 50 muestras para cada nivel de intensidad sísmica.

## 4.2 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA 2 COLEGIOS TÍPICOS PERUANOS

Como aplicación de esta metodología se seleccionó 2 colegios típicos peruanos: un sistema aporticado relativamente antiguo que ha tenido pobre desempeño sísmico, “780 antiguo”, y un sistema de diseño más reciente cuyo excelente desempeño ha sido probado en el sismo de Arequipa del 2001, el “780 moderno”. La denominación “780” se debe a que ambos colegios tienen aulas de 7,80m de largo.

### 4.2.1 Colegio 780 antiguo (pre NDSR-1997).

La figura 4.4 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0,20m de espesor, orientada en el sentido longitudinal de la edificación (X-X en la figura). Esta losa descansa en muros de albañilería confinada de 0,25m de ancho (ejes 1, 3, 5 y 7 de la figura 4.4) y en vigas peraltadas generalmente de 0,30mx0,70m (ejes 2, 4 y 6). Las vigas en el sentido longitudinal (ejes A y B) son de 0,25mx0,40m. Las columnas son de 0,30mx0,40m (C-1) y 0,25mx0,40m(C-2), con su mayor dimensión en el sentido transversal. La figura 4.5 muestra el detalle de refuerzo de las vigas y la figura 4.6 de las columnas





Figura 4.3 Colegio 780 antiguo pre NDSR-1997 de 3 aulas por piso en la costa peruana

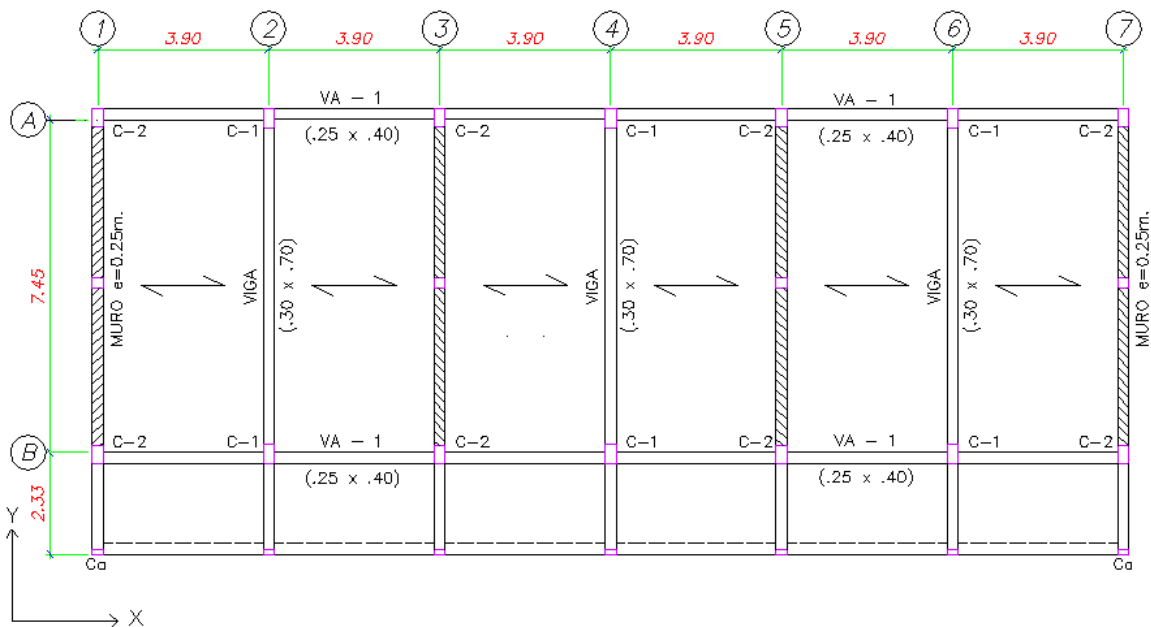


Figura 4.4 Vista en planta del sistema estructural del edificio 780 antiguo.

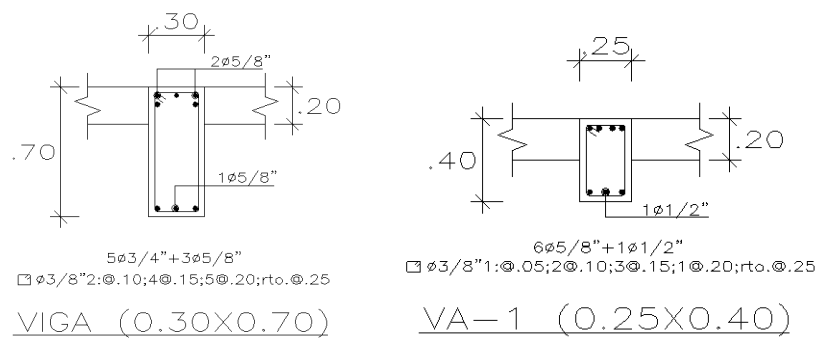


Figura 4.5 Detalle de vigas de concreto armado (colegio 780 antiguo).

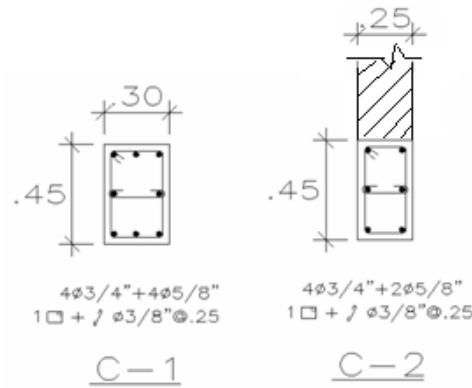


Figura 4.6 Detalle de columnas de concreto reforzado (colegio 780 antiguo).

El sistema sismorresistente en el sentido longitudinal (X-X en la figura 4.4), consiste en 2 pórticos de concreto armado (ejes A y B) con columnas y vigas de poco peralte. En la dirección transversal (Y-Y) el sistema sismorresistente está constituido fundamentalmente por muros de albañilería confinada.

Los edificios de este tipo han sufrido daño en sismos pasados debido al problema de columna corta. Este problema se ocasiona por la excesiva flexibilidad en el sentido longitudinal y el mal aislamiento de los alfeizares de albañilería (Aguilar y Astorga 2006).

#### 4.2.2 Colegio 780 nuevo

En 1997 la norma peruana de diseño sismorresistente sufrió una actualización importante que trajo como consecuencia un cambio notorio en el sistema estructural de las edificaciones educativas. El aumento en los requerimientos de rigidez de esta norma ocasionó que en los nuevos edificios se incrementaran las dimensiones de las columnas y vigas. A partir de 1997 el gobierno empezó a construir edificios educativos significativamente más robustos a los que denominaremos colegio 780 actual o nuevo.

El colegio 780 nuevo es un edificio de concreto armado y albañilería que tiene una planta rectangular, con uno a tres niveles y 2 a 5 aulas por piso (figura 4.8). Las aulas son cuadradas de 7,80m de lado aproximadamente. Este edificio también se utiliza para oficinas, bibliotecas y laboratorios con tabiques divisorios.

Las ventanas y puertas se ubican en las fachadas longitudinales, la comunicación se da por un corredor longitudinal y el acceso al segundo y tercer nivel es por una caja de escaleras separada estructuralmente del edificio. Los alfeizares de las ventanas son tabiques separados de las columnas mediante juntas de aproximadamente 1".

El techo del edificio 780 nuevo en la costa es horizontal (figura 4.7) y en zonas lluviosas inclinado a dos aguas. En la mayoría de los casos los techos son losas aligeradas.



Figura 4.7 Edificio 780 actual de 3 aulas por piso en la costa peruana

La figura 4.8 muestra un esquema con el sistema estructural del edificio. La losa de techo es una losa aligerada unidireccional de 0,20m de espesor, orientada en el sentido longitudinal de la edificación (X-X en la figura). Esta losa descansa en muros de albañilería confinada de 0,25m de ancho (ejes 1, 3, 5 y 7) y en vigas peraltadas generalmente de 0,30mx0,70m (ejes 2, 4 y 6). Las vigas en el sentido longitudinal (ejes A y B) son de 0,25mx0,55m. Las columnas son rectangulares de 0,25mx0,58m (P-1), 0,25mx0,90m (P-2) y en forma de T de 0,45mx0,90m (P-3), con su mayor dimensión en el sentido longitudinal. El detalle del refuerzo de vigas y columnas se muestra en la figura 4.9 y 4.10 respectivamente (Aguilar y Astorga 2006).

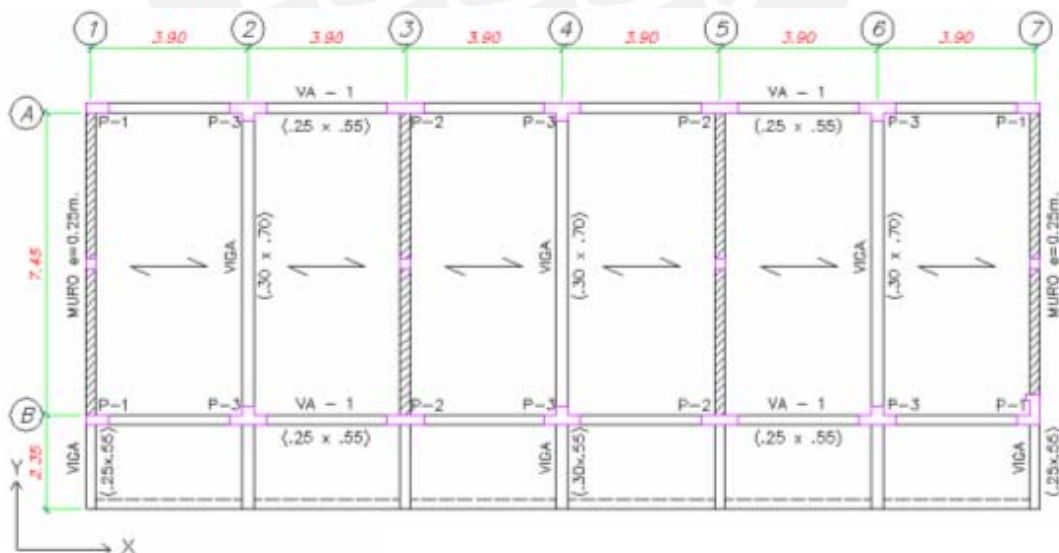


Figura 4.8 Planta del sistema estructural del colegio 780 nuevo

El sistema sismorresistente en el sentido longitudinal (X-X en la figura 4.8), consiste en 2 pórticos de concreto armado (ejes A y B) con columnas y vigas peraltadas. En el sentido transversal (Y-Y) el sistema sismorresistente está constituido fundamentalmente por muros de albañilería confinada.

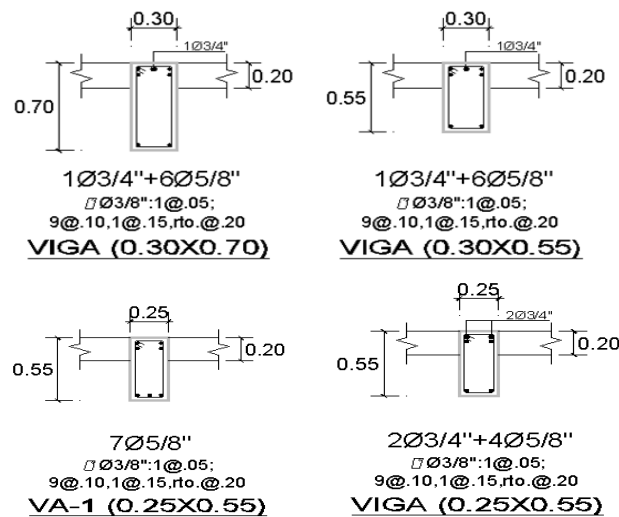


Figura 4.9 Detalle del refuerzo de las vigas (colegio 780 nuevo)

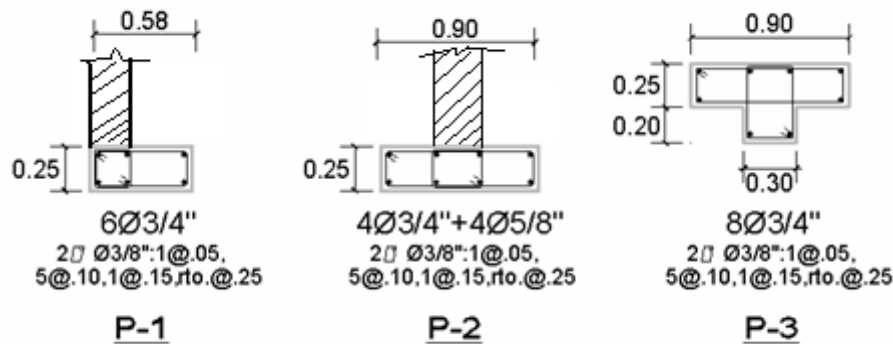


Figura 4.10 Detalle del refuerzo de las columnas (colegio 780 nuevo)

Los edificios educativos diseñados y construidos con la norma sismorresistente peruana de 1997 no reportaron daños después del terremoto de Arequipa (2001).

#### 4.2.3 Desempeño sismorresistente

En un trabajo de investigación desarrollado por León y Quintana (2004) se evaluó el desempeño sismorresistente de estos colegios. Los niveles de peligro sísmico estudiados corresponden a aceleraciones máximas en el terreno de 0,20g ; 0,40g y 0,50g que corresponden a sismos ocasionales, sismos raros y sismos muy raros respectivamente (ver anexo A). La evaluación del desempeño se realiza siguiendo las sugerencias del comité VISION 2000 de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC 1999). Para estimar la respuesta estructural se emplean procedimientos espectrales de demanda - capacidad. Los resultados muestran que los edificios escolares modernos (colegios 780 nuevos) tendrían un desempeño sísmico aceptable, lo que se podría atribuir al incremento en los requerimientos de rigidez del código sismorresistente de 1997. Sin embargo, el colegio 780 antiguo no satisface en ninguno de los niveles de sismicidad, los requisitos de

desempeño. La figura 4.11 muestra los resultados de la evaluación del desempeño sismorresistente para ambos colegios.

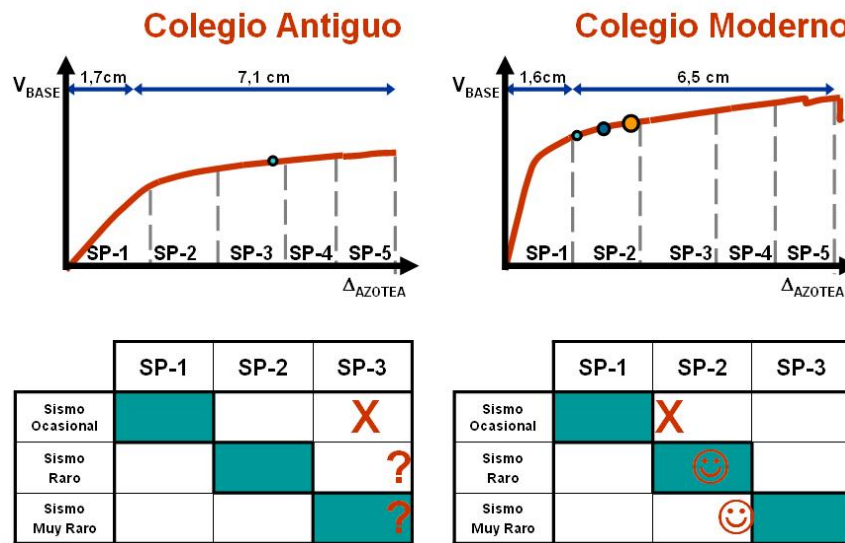


Figura 4.11 Desempeño sismorresistente de los colegios 780 antiguo y nuevo (León y Quintana 2004).

Para definir los estados discretos de daño se sectoriza las curvas de capacidad tal como se muestra en a figura 4.12. Los sectores limitados por estos desplazamientos (en azotea) corresponden a los estados de daño sin daño, leve, moderado, severo y colapso. Asimismo estos desplazamientos de azotea corresponden a desplazamientos espectrales en el espectro de capacidad. En la figura 4.13 se ha calculado la relación entre los desplazamientos de azotea, los desplazamientos espectrales y las derivas máximas correspondientes.

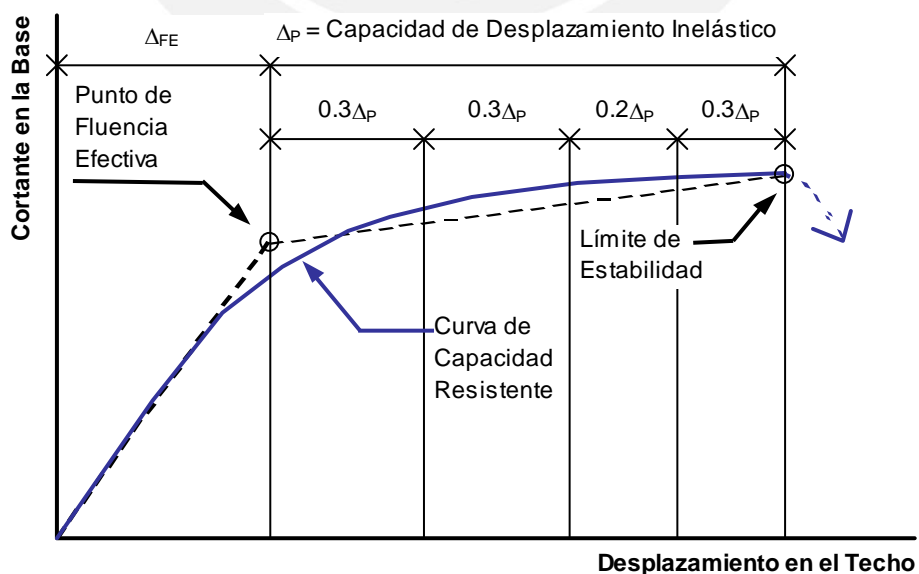


Figura 4.12 Sectorización de la curva de capacidad.



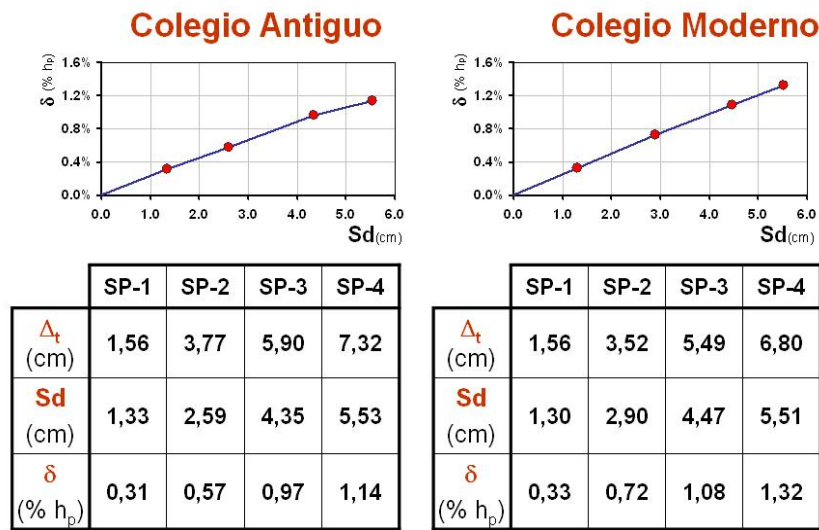


Figura 4.13 Relación entre los desplazamientos de azotea, los desplazamientos espectrales y las derivas máximas correspondientes para los colegios 780 (León y Quintana 2004).

#### 4.2.4 Curvas de fragilidad de los colegios

Las curvas de fragilidad para ambos edificios se muestran en las figuras 4.14 y 4.15. Se puede observar claramente que el colegio “780 Moderno” tiene una mejora radical en su desempeño sísmico y por lo tanto baja probabilidad de daños severos para sismos moderados. Esto se debe al aumento en la exigencia de rigidez lateral impuesta por la norma sismorresistente de 1997 (SENCICO 1997).

Para generar estas curvas de fragilidad se utilizó el programa Fragilidad (ver Anexo B). Se calculan 100 muestras de modelos estructurales y para 12 niveles de intensidad (1200 análisis dinámico no-lineal) los cuales van desde 0,05g hasta 0,60g en el caso del colegio 780 antiguo y desde 0,05g hasta 1,00g en el caso del colegio 780 moderno.

Los estados discretos de daño vienen definidos por las derivas máximas de entrepiso mostradas en la figura 4.13.

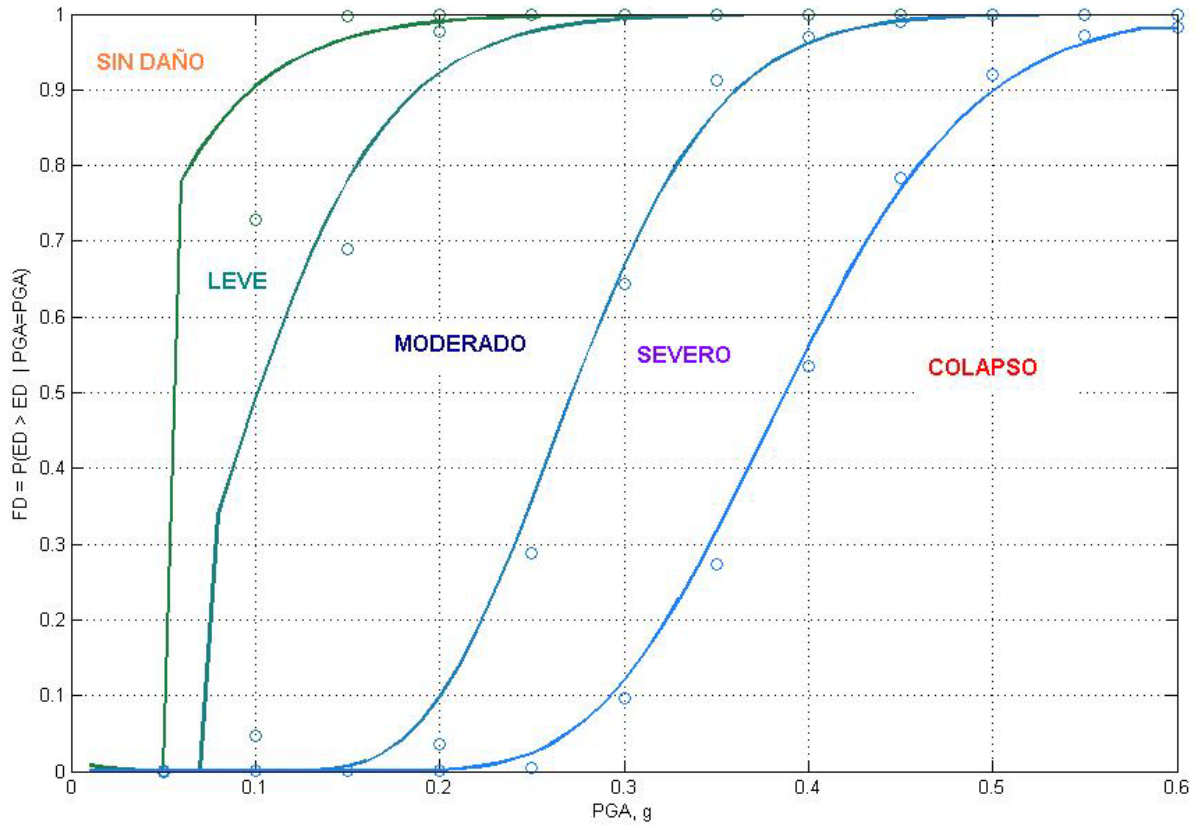
Los parámetros estructurales considerados como variables con incertidumbre son solamente la resistencia a compresión del concreto y la resistencia a la fluencia del acero. Como el programa DRAIN 2D-X utiliza un modelo bi-lineal en los diagramas de momento curvatura, se simplificó el problema considerando una distribución de probabilidad de tipo normal para los momentos de fluencia.

El único parámetro sísmico considerado en la generación de las señales sintéticas fue la aceleración máxima del terreno (PGA).



Pontificia Universidad Católica  
del Perú

Curvas de Fragilidad Analíticas del  
Edificio del Colegio 780 antiguo  
(pre NDSR-1997)



(a)

Matriz de probabilidad de daño. Colegio 780 antiguo

Estado de daño (ED)	Factor de daño, % (FD)	Probabilidad de daño (%)		
		PGA=0,20g	PGA=0,40g	PGA=0,50g
Sin daño	0	10	0	0
Leve	5	40	0	0
Moderado	20	50	4	0
Severo	65	0	40	10
Colapso	100	0	56	90
<b>Factor de daño medio, % (FDM)</b>		12	82,8	96,5

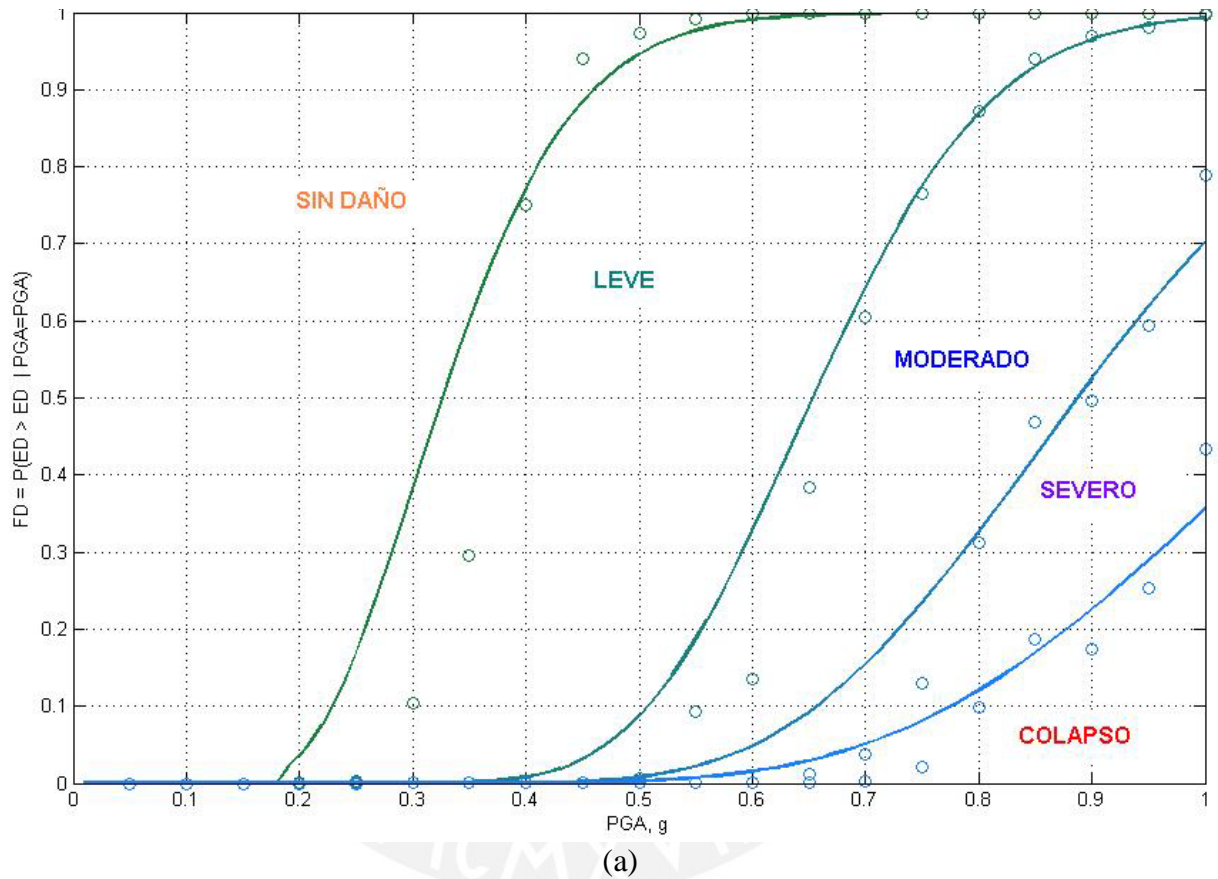
(b)

Figura 4.14 Curvas de fragilidad para el edificio del colegio 780 antiguo.



Pontificia Universidad Católica del Perú

Curvas de Fragilidad Analíticas del Edificio del Colegio 780 nuevo



Matriz de probabilidad de daño. Colegio 780 nuevo

Estado de daño (ED)	Factor de daño, % (FD)	Probabilidad de daño (%)		
		PGA=0,20g	PGA=0,40g	PGA=0,50g
Sin daño	0	95	23	5
Leve	5	5	76	85
Moderado	20	0	1	9
Severo	65	0	0	1
Colapso	100	0	0	0
<b>Factor de daño medio, % (FDM)</b>		0,25	4	6,7

(b)

Figura 4.15 Curvas de fragilidad para el edificio del colegio 780 nuevo.

### 4.3 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR SISMO

#### 4.3.1 Estimación de pérdidas usando el método de HAZUS

A partir del desarrollo de las curvas de fragilidad, FEMA desarrolló la metodología HAZUS (FEMA 1999). Esta metodología se basa fundamentalmente en los conceptos de curva de capacidad, punto de desempeño y curva de fragilidad. La ventaja de HAZUS es su posibilidad de estimar el daño ante un evento sísmico no solo en edificios, sino también en sistemas de transporte, sistemas de seguridad, etc. La principal desventaja del método es su complejidad. HAZUS es una herramienta completa y poderosa que necesita muchos datos para ser implementada.

Las curvas de fragilidad obtenidas por el método analítico pueden implementarse en la metodología HAZUS para estimar el riesgo sísmico (pérdidas) de edificios peruanos. El resultado del estudio de riesgo involucra el cálculo de costos de reposición. La metodología relaciona costos con estados de daño mediante índices que deben ser estudiados y adaptados a nuestro entorno. El enfoque global de esta metodología se ilustra en la figura 4.16.

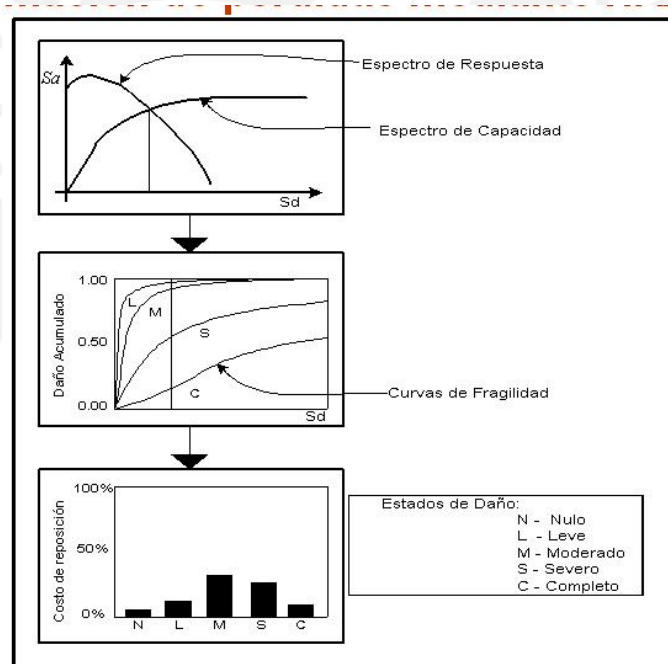


Figura 4.16 Metodología de estimación de pérdidas por sismo mediante HAZUS.

#### 4.3.2 Estimación rápida usando factores de daño

Para estudiar el efecto de los sismos se utiliza el factor de daño que representa la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición (reemplazo total) del edificio. Los valores mostrados en la tabla 4.1. son los recomendados por Hwang y Lin (2002) y que han sido utilizados en esta metodología. Por ejemplo, a partir de esta tabla, podríamos afirmar que para reparar una estructura que ha sufrido daño moderado el costo de reparación equivale al 20% del costo de reposición.

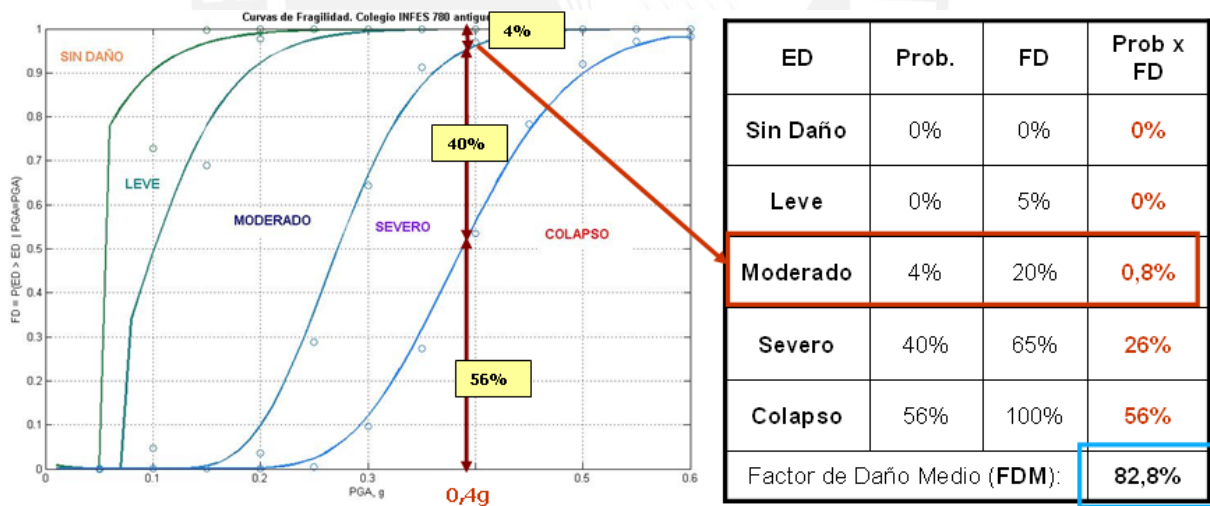


Debido a que los elementos estructurales y no-estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, en este estudio se usa la deriva máxima de entrepiso,  $\delta_{m\acute{a}x}$ , como PID. A partir de la curva de capacidad de la estructura se definen los rangos de  $\delta_{m\acute{a}x}$  asociados con los estados de daño (SEAOC 1999).

**Tabla 4.1** Estados de daño y factores de daño sugeridos por Hwang y Lin (2002)

Estado de Daño	Factor de Daño
Sin Daño	0%
Leve	5%
Moderado	20%
Severo	65%
Completo	100%

Las curvas de fragilidad de estos colegios permiten calcular directamente los costos de reparación, escogiendo adecuadamente escenarios de intensidad sísmica. Cabe mencionar que no se toma en cuenta el daño producido en los elementos no-estructurales. El procedimiento consiste en determinar las probabilidades para los diversos estados de daño y los factores de daño (FD), que permiten calcular un Factor de Daño Medio, FDM (Hwang y Lin 2002). En la figura 4.17 se muestra la forma de obtener el FDM para el colegio "780 antiguo" y para una intensidad sísmica representada por un PGA de 0,40g. A partir de esta tabla se puede afirmar que la estructura se daña, en promedio, un 82,8%.



**Figura 4.17** Determinación del Factor de Daño Medio a partir de las Curvas de Fragilidad.



Considerando un colegio tipo “780 antiguo” de 450m<sup>2</sup> de área construida y cuyo costo de reposición es de aproximadamente US\$ 250/m<sup>2</sup>, se estima un costo de reparación de su estructura ante un sismo de 0,40g de 82,8% x 450m<sup>2</sup> x US\$250/m<sup>2</sup> = US\$ 93 150. En la tabla 4.2 se muestran los costos de reparación estimados para ambos colegios típicos y para los 3 niveles de peligro sísmico estimados para el campus PUCP (ver anexo A).

Tabla 4.2. Costos de reparación estructural de los 2 colegios típicos peruanos

Intensidad Sísmica	Aceleración pico (g)	Costo de reparación (\$)	
		780 antiguo	780 moderno
Sismo Ocasional	0,20	\$13 500	\$281
Sismo Raro	0,40	\$93 150	\$4 500
Sismo Muy Raro	0,50	\$108 563	\$7 538



## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 5.1 CONCLUSIONES

Al culminar el presente trabajo de investigación se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Este trabajo demuestra que las curvas de fragilidad permiten estimar razonablemente bien las pérdidas por sismo, ya que toman en cuenta las incertidumbres tanto en la demanda sísmica como en la respuesta de la estructura. Debido a que se trata de una herramienta probabilística, su aplicación resulta más efectiva cuando se aplica masivamente a grupos de edificios de similares características estructurales.
- El algoritmo para generar las curvas de fragilidad ha sido planteado teniendo en cuenta una metodología general en las que muchas variables que participan en el comportamiento sísmico pueden contener incertidumbre y aleatoriedad. Sin embargo, en este estudio solo se ha considerado las más variables más importantes, a fin de minimizar el esfuerzo de cálculo que demanda un proceso de simulación.
- El programa “Fragilidad” implementado en Matlab genera de manera eficiente las curvas de fragilidad. Una de las desventajas es el tiempo de ejecución. En promedio se realizan 500 análisis por hora. Para generar curvas de fragilidad consistentes se requiere de por lo menos 100 muestras para cada nivel de sismicidad. Si se consideran 20 niveles de sismicidad, el programa ejecuta las 2000 muestras en aproximadamente 4 horas.
- Para tomar en cuenta la variabilidad en los parámetros estructurales se ha considerando una densidad de probabilidad normal para la resistencia a compresión del concreto y una densidad de probabilidad lognormal para el esfuerzo de fluencia del acero. Ambos son preponderantes en la definición de los diagramas momentos curvatura de las rótulas plásticas. Para simplificar la generación de parámetros estructurales, en el programa “Fragilidad” se ha considerado una densidad de probabilidad normal para los momentos fluencia.
- Para tomar en cuenta la variabilidad en los parámetros sísmicos se utiliza un programa que genera señales sintéticas. En cada ejecución, el acelerograma generado es siempre distinto al anterior en contenidos de frecuencias y en amplitud. Sin embargo todas las señales corresponden a un mismo espectro de respuesta, el cual es compatible con el espectro de diseño de la norma peruana.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Finalmente, por la experiencia lograda durante el desarrollo de este proyecto se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- Debido a que existe una cantidad importante de colegios diseñados con la norma previa al año 1997 (“780 antiguo”), esta metodología puede aplicarse para evaluar el riesgo sísmico (costos de reparación) de estas edificaciones ante diversos escenarios de sismos. También se pueden proponer algunos sistemas de refuerzo y evaluar su desempeño mediante sus curvas de fragilidad.
- La metodología propuesta tiene muchas simplificaciones, pero puede mejorarse si se toman en cuenta otras variables particulares del sitio (acción sísmica) y de la estructura. En un trabajo futuro la metodología podría refinarse para generar curvas de fragilidad más precisas. Las recomendaciones son: incluir sismos reales en vez de señales sintéticas, considerar la definición de los estados de daño como dependiente de los parámetros estructurales y utilizar como parámetro indicador de la intensidad sísmica al pseudo-desplazamiento o la pseudo-aceleración elástica de la estructura ya que representan mejor la demanda sísmica.
- La metodología se puede aplicar a gran escala para evaluar el riesgo sísmico de grandes grupos de edificios. Estos grupos de edificios podrían estar constituidos por tipologías estructurales similares dentro de una misma ciudad. Debido a que la metodología integra información de peligro y vulnerabilidad, se puede generar un mapa de riesgo sísmico. En este mapa se pueden identificar las zonas que requieren de especial atención por ser las más vulnerables. Un ejemplo de mapa de riesgo sísmico se observa en la figura 5.1. De esta manera podrían implementarse un plan de refuerzo de las edificaciones potencialmente vulnerables.
- Se pueden evaluar sistemas de refuerzo de manera probabilística generando sus respectivas curvas de fragilidad. De esta manera se puede saber, al menos de manera relativa, cuál sistema resulta ser más efectivo en reducir la vulnerabilidad sísmica.



**Figura 5.1** Ejemplo de mapa de riesgo sísmico. Daño medio de los edificios de mampostería no reforzada de elevación media y alta de l'Eixample - Escenario ICC - determinista (Lantada, 2003).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

Aguilar, R., Astorga, M.A. 2006. *Desempeño sismorresistente de las edificaciones educativas peruanas*. Tesis para optar el grado de Magíster. PUCP. Lima. Perú.

Alva, J. 1993. *Distribución de Isoaceleraciones*. UNI – CISMID Lima, Perú.

Anagnos, T., Rojahn, C. y Kiremidjian, A. S. 1995. *NCEER-ATC joint study of fragility of buildings*. Technical report. NCEER-95-2003. National Center for Earthquake Engineering Research. State University of New York at Buffalo.

Applied Technology Council (ATC). 1985. *Earthquake Damage Evaluation data for California*. ATC-13. Redwood City, California.

Applied Technology Council (ATC). 2000. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*. ATC-21/FEMA 154. Washington, USA.

Barbat, A. 1998. *El riesgo sísmico en el diseño de edificios, calidad siderúrgica* Madrid, España.

Bommer J., Salazar, W. y Samayoa, R. 1998. *Riesgo sísmico en la región metropolitana de San Salvador*. Programa Salvadoreño de Investigación sobre desarrollo y medio ambiente. San Salvador, El Salvador.

Bonett, Ricardo. 2003. *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Braga F., Dolce M., Liberatore D. 1986. *Assessment of the relationships between macroseismic intensity, type of building and damage, based on recent Italy earthquake data*. Proceeding of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.

Bratley, P., Fox, B. L., Schrage, L. E. 1987. *A Guide to Simulation*. Springer Verlag. New York.

Casaverde, L. y Vargas, J. 1980. *Zonificación Sísmica del Perú*. II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente, OEA y PUCP. Lima, Perú.

Castillo, J., Alva, J. 1993. *Peligro Sísmico en el Perú*. VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.

Chong, W. H. y Soong, T. T. 2000. *Sliding fragility of unrestrained equipment in critical facilities*. Technical report. MCEER-00-0005. Multidisciplinary Center of Earthquake Engineering Research.

Cornell, C. A., and Vanmarcke, E. H. 1969. *The Major Influences on Seismic Risk, Proceedings. Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I.*

Cornell, C. A., and Benjamin, J. R. 1970. *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers.*

EASI. 2002. *ST-ORM. A meta-computing simulation environment for stochastic optimization and robustness management. User's manual.* Easi Engineering. Germany.

Ellingwood, B. R. 2001. *Earthquake risk assessment of building structures. Reliability engineering system safety.* USA.

Erberik, M., and Elnashai, A. 2004. *Vulnerability Analysis of Flat Slab Structures.* Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 3102. Vancouver, August, 2004.

FEMA 1988. Federal Emergency Management Agency. *FEMA 154 :Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook.* Washington. USA.

FEMA. 1999. Federal Emergency Management Agency. *HAZUS 99 SR2: Earthquake Loss Estimation Methodology. Technical Manual.* USA.

Florian, A. 1992. *An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube.*

Fourier d'Albe, E. 1988. *An approach to earthquake risk management.* Engineering Structures.

Hong, H. P., and Lind, N. C. 1996. *Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results.* Structural Safety, 18(4), 329–339.

Hwang, H. H. M., and Huo, J-R. 1994. *Generation of Hazard-Consistent Fragility Curves for Seismic Loss Estimation Studies.* Technical Report NCEER-94-0015.

Hwang, H., and Lin, Y.W. 2002. *Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings.* Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE).

Kuroiwa, J. 2002. *Reducción de desastres – Viviendo en armonía con la naturaleza.* Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Lima, Perú.

Lantada, N. 2003. *Aplicación de Técnicas GIS a Estimación de Riesgos Naturales: Riesgo Sísmico.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. En Redacción.

MathWorks Inc. 2002. *MATLAB. The Language of Technical Computing.*

León, H. y Quintana, U. 2004. *Evaluación del desempeño sismorresistente de los colegios peruanos modernos.* Tesis para optar el grado de Ingeniero Civil. PUCP. Lima. Perú.



- McGuire, R. 1976. *EQRISK. Evaluation of Sites for Earthquake Risk, Open File Report 79-97*. USGS, EEUU.
- Monroy M., Bolaños L. 2004. *Espectros de peligro sísmico uniforme. Programa MRIESGO*. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. PUCP.
- Muñoz, A., Blondet, M. 2006. *Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa Peruana*. Proyecto de investigación auspiciado por la Dirección Académica de Investigación. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Sarria A. 1995. *Ingeniería Sísmica*. Ediciones Uniandes. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Prakah, V., Powel, G. H. y Campbell, S. 1993. *DRAIN-2DX*. University of California, Berkeley.
- Ripley, B. D. 1987. *Stochastic Simulation*. John Wiley and Sons, New York.
- Rubinstein, R. Y. 1981. *Simulation and the Montecarlo Method*. John Wiley and Sons, New York.
- SENCICO 1997. *Norma Técnica de Edificación NTE-.030. Diseño Sismorresistente*.
- Silgado M., Giesecke A. 1981. *Terremotos en el Perú*. Lima: Ediciones Richkay Perú.
- Structural Engineers Association of California. SEAOC (1999). *Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book)*. California.
- Vanmarcke, E. H., Cornell, C.A., Gasparini, D. A. & Hou, S. N. 1976. *Program SIMQKE-1. Simulation of Earthquake Ground Motions*. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Yamazaky, F. and Murao, O. 2000. *Fragility curves for buildings in Japan based on experience from the 1995 Kobe earthquake*.

## ANEXOS

### ANEXO A. ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO DEL CAMPUS PUCP

La alta ocurrencia de eventos sísmicos en nuestro país evidencia la necesidad de cuantificar los efectos de los sismos en nuestras estructuras. Para cuantificar estos eventos sísmicos debe tenerse en cuenta la sismicidad del lugar y también la respuesta de las estructuras a dicha sismicidad.

El peligro sísmico se puede cuantificar mediante el valor máximo de algún parámetro que representa el movimiento del terreno, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno. También es usual utilizar algún parámetro correspondiente a la respuesta estructural como es la pseudo-aceleración (parámetro que permite calcular los desplazamientos máximos en una estructura).

Para representar el peligro sísmico se pueden emplear dos enfoques, el determinista y el probabilista. El enfoque determinista cuantifica el peligro considerando el sismo más destructivo que pueda ocurrir en el lugar de análisis. El enfoque probabilista expresa la aceleración de diseño (parámetro que representa el movimiento del terreno) para diferentes niveles de probabilidad de excedencia.

#### A.1. Sismicidad regional y local

El campus PUCP está ubicado en la ciudad de Lima que se encuentra cerca al margen de la placa tectónica convergente activa entre las placas de Nazca al oeste y Sudamericana al este. Sus coordenadas geográficas son 12°07' Latitud Sur y 77°11' Longitud Oeste (figura A.1).

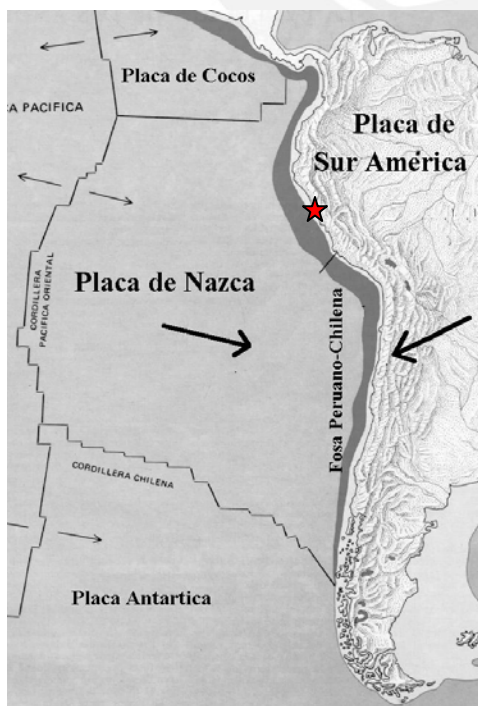


Figura A.1. Ubicación del campus PUCP (Placas Tectónicas).

El proceso de subducción de la placa de Nazca presenta tres zonas importantes de actividad tectónica: la zona de subducción de interfase poco profunda, la zona de subducción de intraplaca profunda y la zona de corteza continental de la placa Sudamericana (figura A.2).

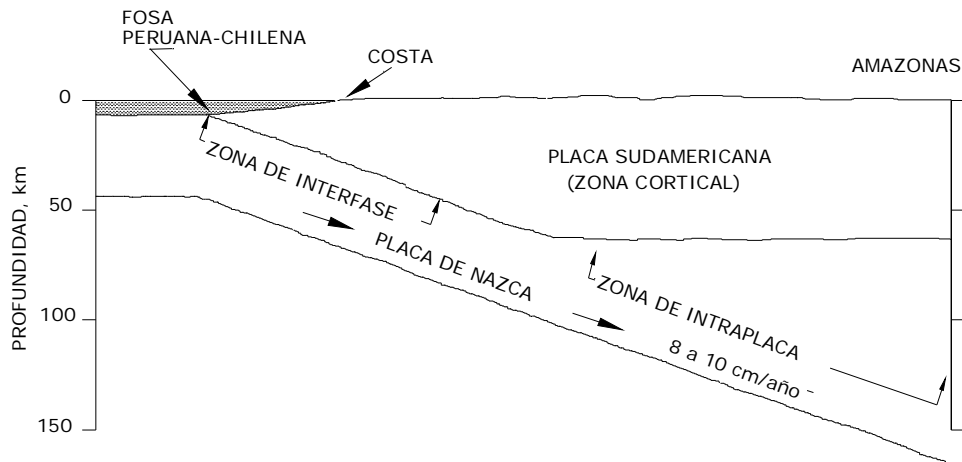


Figura A.2. Sección transversal del proceso tectónico en la zona de subducción.

La sismicidad histórica en el Perú ha sido registrada desde la conquista y colonización de los españoles. Los investigadores que realizaron los aportes más importantes a la historia sísmica peruana fueron Silgado (1968, 1978, 1985), Dorbath et al. (1990) y Alva et al. (1984).

Los terremotos históricos más importantes que han ocurrido en Lima a lo largo de la historia se muestran en la siguiente tabla.

Tabla A.1. Terremotos Históricos en Lima (Silgado 1985).

Fecha del Terremoto	Hora	Intensidad	Magnitud
9 de julio de 1586	7:00 p.m.	-	-
13 de noviembre de 1655	2:38 p.m.	-	-
20 de octubre de 1687	4:15 p.m.	-	-
28 de octubre de 1746	11:30 a.m.	X-XI MM	8.1 Ms
1 de diciembre de 1806	6:00 p.m.	-	-
30 de marzo de 1828	7:35 a.m.	-	-
24 de mayo de 1940	11:35 a.m.	VII-VIII MM	7.9 Ms
17 de octubre de 1966	4:14 p.m.	VIII MM	7.7 Ms
3 de octubre de 1974	9:21 a.m.	VII MM	7.9 Ms

## A.2. Evaluación del Peligro Sísmico

En los últimos 30 años la aplicación de los conceptos de probabilidades en la ingeniería sísmica ha permitido que las incertidumbres en la magnitud, la ubicación, la variación del movimiento del suelo y en la respuesta estructural puedan ser explícitamente consideradas en la evaluación del peligro sísmico.

Un análisis probabilista del peligro sísmico se desarrolla mediante la representación adecuada de la actividad sísmica de la zona en estudio y la elección de alguna relación entre la amplitud del movimiento del suelo o de la respuesta estructural, alguna medida del sismo (magnitud o intensidad) y la distancia entre el foco y la distancia de interés.

Para relacionar la amplitud del movimiento, el tamaño del sismo y la distancia se pueden emplear leyes de atenuación. Las incertidumbres en la ocurrencia, ubicación y el nivel de respuesta sísmica esperada (movimiento del suelo o respuesta estructural) son consideradas mediante funciones de densidad de probabilidades.

### Aceleración máxima del terreno en el Campus

Se ha estimado el peligro sísmico del campus, empleando la metodología propuesta por McGuire (1976) que se basa en el “teorema de probabilidad total”. Este teorema se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$P[A] = \iint P[A | S, R] f_S(S) f_R(R) dS dR \quad (A.1)$$

$P[A]$  representa la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento  $A$ .  $S$  y  $R$  son variables continuas e independientes que influyen en  $A$ . Por tanto, la probabilidad de que el evento  $A$  ocurra puede calcularse integrando el producto de la probabilidad de  $A$  para determinados valores de  $S$  y de  $R$  y las probabilidades de ocurrencia de  $S$  y  $R$ .

Para la estimación de la aceleración máxima,  $P[A]$  representa la probabilidad de excedencia del valor de la aceleración máxima,  $A$ . El evento  $S$  representa la ocurrencia de un sismo de magnitud  $S$ . El evento  $R$  representa la ocurrencia del sismo de magnitud  $S$  a una distancia  $R$  del foco.

Para la evaluación del riesgo sísmico se han elegido tres escenarios de sismicidad representados por los niveles de peligro sísmico sugeridos por el SEAOC (1999): Sismo Ocasional (50% de excedencia en 50 años), Sismo Raro (10% de excedencia en 50 años) y Sismo Muy Raro (5% de excedencia en 50 años).

Estos niveles de sismicidad se pueden expresar también a través del período de retorno, mediante la siguiente expresión:

$$P_{MÁX} [a > A] = 1 - e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (A.2)$$

donde:

$P_{MÁX} [a > A]$ , es la probabilidad de superar un valor aceleración  $A$ .

$t$ , es el tiempo de exposición (generalmente la vida útil de la edificación).

$T_R$ , es el período de retorno.

El peligro sísmico en el campus se estimó mediante el empleo del programa EQRisk (McGuire 1976). Se tomaron como datos de entrada las coordenadas del campus, las fuentes tectónicas sugeridas por Castillo y Alva (1993) y se empleó la ley de atenuación de Casaverde y Vargas (1980).

Además, se establecieron valores de recurrencia (inversa del período de retorno) para los cuales se estimó la aceleración pico asociada. Con estas aceleraciones se generó la curva período de retorno versus aceleración para el campus PUCP mostrada en la figura A.3.

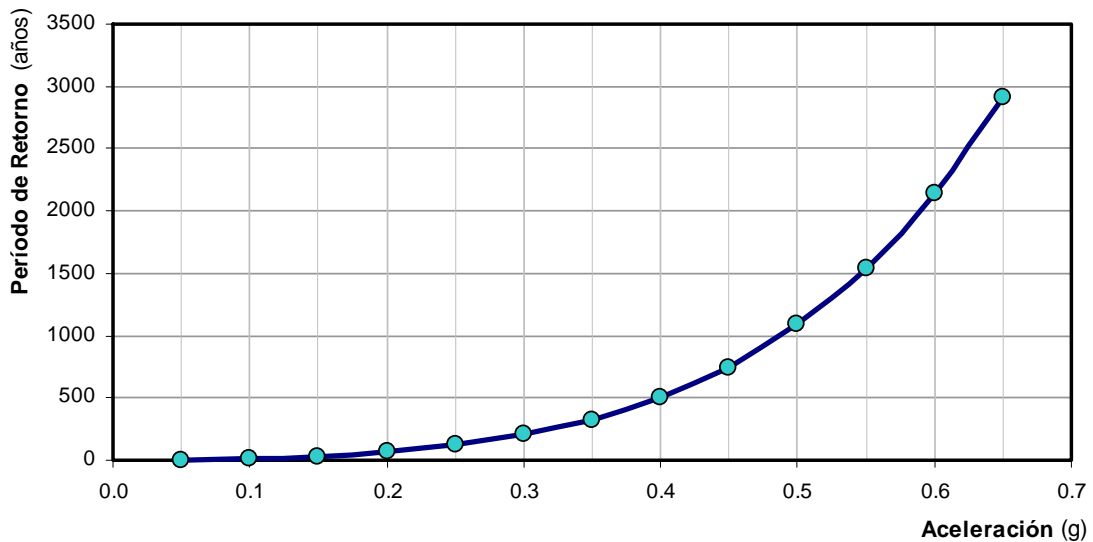


Figura A.3. Curva período de retorno vs. aceleración asociada para las coordenadas del campus de la PUCP.

Los valores de aceleración pico para los tres niveles de sismicidad se muestran en la tabla A.2.

Tabla A.2. Aceleración pico asociada a los tres niveles de sismicidad seleccionados

Nivel de Peligro Sísmico		Aceleración Pico (g)	Período de Retorno (años)
Sismo Ocasional	(50% de excedencia / 50 años)	0,20	72
Sismo Raro	(10% de excedencia / 50 años)	0,40	475
Sismo Muy Raro	(5% de excedencia / 50 años)	0,50	975

Se puede comprobar que los resultados de la tabla anterior coinciden con las aceleraciones estimadas por el programa MRIESGO (Monroy y Bolaños 2004), como se observa en el mapa de distribución de aceleraciones mostrado en la figura A.4.



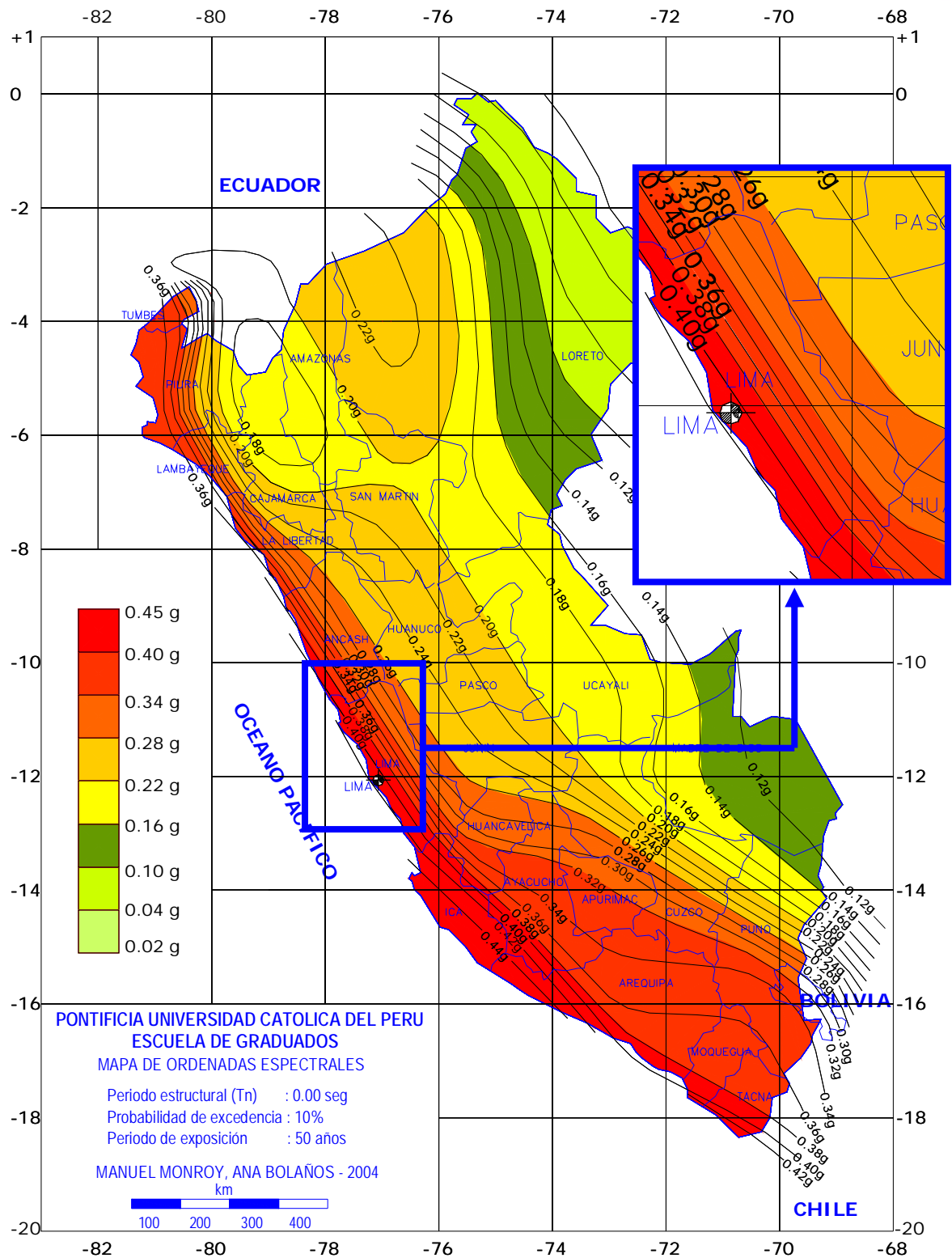


Figura A.4. Distribución de aceleraciones en el Perú para un periodo de exposición de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia (Monroy y Bolaños 2004).

## ANEXO B. PROGRAMA “FRAGILIDAD” VERSIÓN 1.0

### B.1. Descripción general del programa

El programa “Fragilidad” versión 1.0 permite generar Curvas de Fragilidad para estructuras planas (por ejemplo: pórticos planos). Este programa ha sido desarrollado en el lenguaje de programación MatLab (Mathworks 2002). Toma en cuenta la variabilidad en la demanda sísmica mediante señales sintéticas y la variabilidad en los parámetros estructurales mediante funciones de distribución de probabilidad. Esta primera versión solo considera la función de distribución normal. El algoritmo utilizado ha sido explicado en detalle en el capítulo 3. En resumen el programa realiza un proceso de simulación en el que las muestras se componen de los parámetros estructurales (momentos de fluencia para estructuras de concreto armado) y señales sintéticas (acelerogramas) para cada nivel de sismicidad. Estos valores son emparejados de manera aleatoria. El proceso de generación de muestras y el de emparejamiento se realiza mediante la técnica del Hipercubo Latino (Florian 1992). Para lograr una convergencia en los resultados se recomienda utilizar por lo menos 100 juegos de muestras para cada nivel de sismicidad, y al menos 10 niveles de sismicidad. El programa realiza el análisis dinámico no-lineal de estructuras planas modeladas de acuerdo a cada juego de parámetros estructurales. Cada una de las estructuras modeladas es sometida a una señal sintética escogida aleatoriamente. El programa almacena en cada ejecución del análisis dinámico, las respuestas de desplazamientos máximos y sus derivas máximas correspondientes. Al final del proceso de simulación, y mediante un procedimiento estadístico se construyen curvas de probabilidad acumulada de la deriva de entrepiso para cada nivel de sismicidad. A partir de estas curvas de probabilidad acumulada, se construyen las curvas de fragilidad asociada a estados discretos de daño predefinidos.

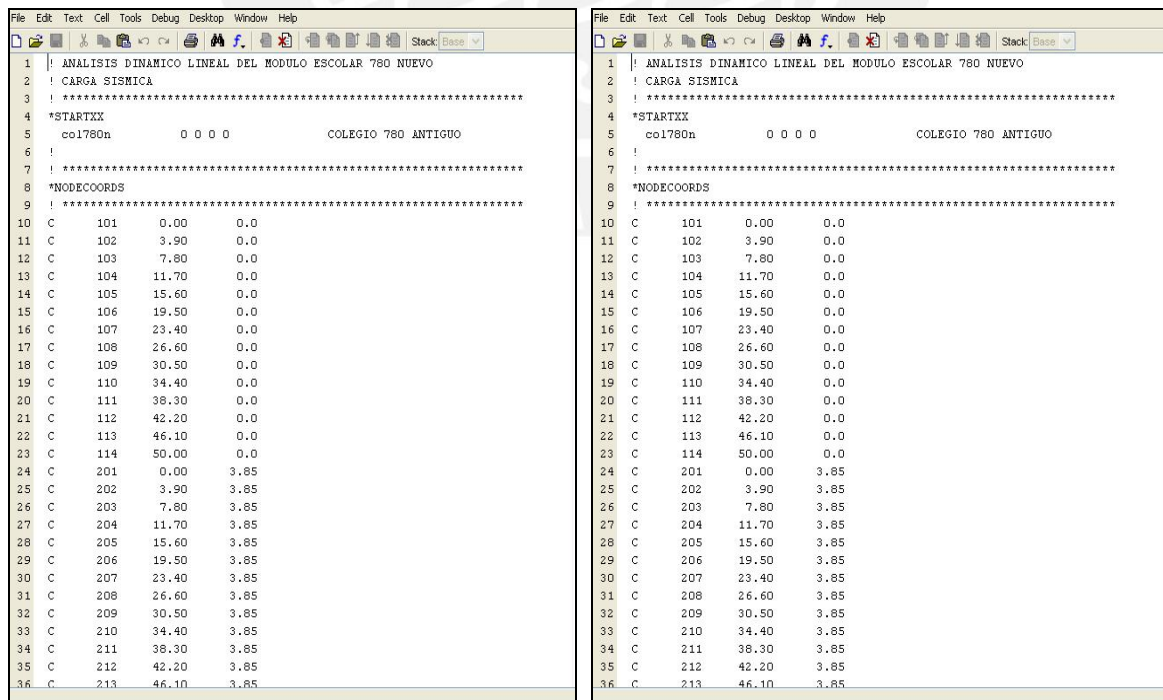
El programa Fragilidad requiere del uso de los programas SIMQKE y DRAIN 2DX (Prakah et al. 1993). Ambos están incluidos en la lista de archivos. El archivo “Simqke.exe” es el ejecutable del programa SIMQKE y se encarga de generar las señales sintéticas. El archivo “d2dx.exe” es el ejecutable del programa DRAIN 2DX y se encarga de realizar el análisis dinámico no-lineal de cada una de las muestras. Estos programas son utilizados de manera automática y en forma no-interactiva (es decir, sin intervención del usuario) desde los módulos del programa Fragilidad. Es posible actualizar las versiones de estos ejecutables siempre que se tome en cuenta la forma de ejecutarlos dentro del código fuente del programa Fragilidad.

Cabe resaltar que esta primera versión ha sido desarrollada sin interfase gráfica para el usuario final, puesto que se necesita probar de manera exhaustiva cada uno de los módulos. Se ha puesto especial énfasis en la puesta a punto de cada uno de los módulos. Todos han sido probados y trabajan con suficiente precisión y eficiencia. Sin embargo, es posible generar una interfase gráfica en una próxima versión.

Antes de ejecutar el programa se deben preparar algunos archivos. Los archivos tienen como nombre en la parte inicial el correspondiente al nombre de la estructura. En los archivos descritos a continuación “NomEst” se refiere al nombre de la estructura.

- **NomEst1.inp:** Primera parte del archivo de entrada de datos (archivo de texto) para el programa DRAIN 2DX. Para preparar cada uno de los bloques es necesario referirse al manual del programa DRAIN 2DX (Prakah et al. 1993). Este archivo solo debe abarcar los bloques desde el inicio hasta antes de la primera línea de datos para la definición de Momentos de Fluencia. Se recomienda ver los ejemplos “col780a1.inp” y “col780n1.inp”.
- **NomEst3.inp:** Tercera parte del archivo de entrada de datos (archivo de texto) para el programa DRAIN 2DX. Este archivo solo debe abarcar los bloques desde el que le sigue al bloque de definición de Momentos de Fluencia hasta el final. Se recomienda ver los ejemplos “col780a3.inp” y “col780n3.inp”. Cabe mencionar que la segunda parte del archivo de entrada de datos es generado desde dentro del programa con los datos proporcionados por el usuario
- **NomEstIni.m:** Archivo MatLab en el que se inician las variables del programa. Podría considerarse como un archivo de entrada de datos con la diferencia que debe estar en el formato MatLab. Aquí se indican los siguientes datos de entrada: nombre de archivos, datos de la estructura, variables correspondientes a los parámetros sísmicos, variables correspondientes a los parámetros estructurales, variables para la simulación Montecarlo y muestreo, y variables para generar las curvas de fragilidad. Se recomienda ver los ejemplos “Col780aIni.m” y “Col780nIni.m”. Luego de preparar este archivo es necesario actualizar el archivo “Fragilidad.m” (programa principal). Se debe reemplazar la primera línea de comando por “NomEstIni.m”.

En la figura B.1 se muestran las 2 partes del archivo de entrada de datos DRAIN 2DX y que es necesario para la ejecución del programa Fragilidad.



```

1 | ANALISIS DINAMICO LINEAL DEL MODULO ESCOLAR 780 NUEVO
2 | ! CARGA SISMICA
3 | ! *****
4 | *STARTXX
5 | col780n      0 0 0 0          COLEGIO 780 ANTIGUO
6 | !
7 | ! *****
8 | *NODECOORDS
9 | ! *****
10 C 101 0.00 0.0
11 C 102 3.90 0.0
12 C 103 7.80 0.0
13 C 104 11.70 0.0
14 C 105 15.60 0.0
15 C 106 19.50 0.0
16 C 107 23.40 0.0
17 C 108 26.60 0.0
18 C 109 30.50 0.0
19 C 110 34.40 0.0
20 C 111 38.30 0.0
21 C 112 42.20 0.0
22 C 113 46.10 0.0
23 C 114 50.00 0.0
24 C 201 0.00 3.85
25 C 202 3.90 3.85
26 C 203 7.80 3.85
27 C 204 11.70 3.85
28 C 205 15.60 3.85
29 C 206 19.50 3.85
30 C 207 23.40 3.85
31 C 208 26.60 3.85
32 C 209 30.50 3.85
33 C 210 34.40 3.85
34 C 211 38.30 3.85
35 C 212 42.20 3.85
36 C 213 46.10 3.85
    
```

**Figura B.1.** Entrada de datos para el programa DRAIN 2DX: Primera parte (izquierda) y tercera parte (derecha).

Una vez preparados los 3 archivos mencionados líneas arriba, se ejecuta el programa mediante el comando “Fragilidad” en la ventana de comandos. Se recomienda tener todos los archivos del programa en un mismo directorio. El proceso de simulación podría tomar muchas horas dependiendo de la capacidad de la computadora, del número de muestras, del número de parámetros estructurales y del número de niveles de sismicidad. En una computadora Pentium IV con 1.7 GHz y 256 Mb de RAM, el programa se ejecuta con una velocidad de 500 muestras por hora. Un ejemplo típico de 100 muestras y 20 niveles de sismicidad (2000 muestras en total) dura aproximadamente 4 horas.

La ejecución del programa puede ser interrumpido en cualquier momento ya sea por el usuario o eventualmente por algún error generado en tiempo de ejecución. Sin embargo el proceso puede reanudarse desde la muestra en que se quedó. Para ello hay que referirse a la función “SimCont.m”.

Durante el proceso de ejecución se generan archivos de texto con información sobre las muestras y las curvas de fragilidad. En cualquier momento, ya sea durante o después de la ejecución del programa pueden consultarse estos archivos (figura B.2). Los archivos generados son los siguientes:

- **NomEst.sim:** Este archivo de texto contiene los datos generales de la estructura simulada, las muestras de valores generadas para los parámetros estructurales y los resultados del proceso de simulación (análisis dinámico no-lineal) de las estructuras generadas). En cada matriz de muestras generadas para un parámetro estructural, el número de filas corresponde al número de muestras y el número de columnas al número de niveles de sismicidad.
- **NomEst.frg:** Este archivo de texto contiene los datos para graficar las funciones de distribución acumulada de la deriva máxima de entrepiso y las curvas de fragilidad.

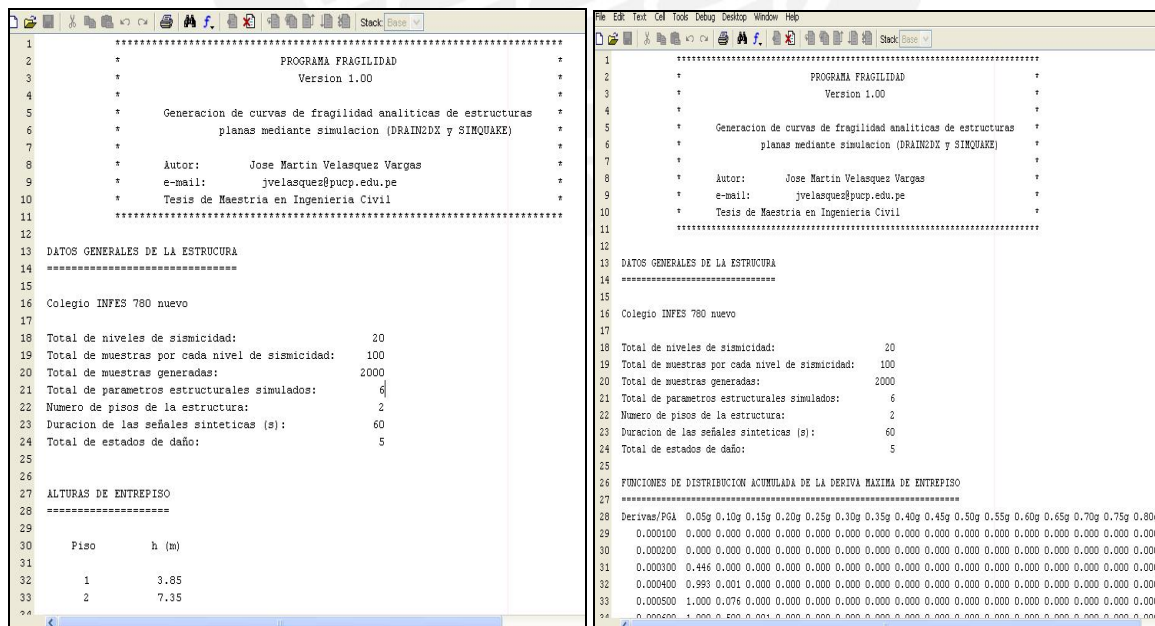


Figura B.2. Archivos de salida del programa Fragilidad: Archivo NomEst.sim que muestra los datos de entrada (izquierda) y archivo NomEst.frg que muestra los resultados (derecha).



## B.2. Módulos del programa

El programa ha sido dividido en módulos y funciones, de tal manera de facilitar su mantenimiento y documentación. En la figura B.3. se muestra la organización de los módulos del programa.

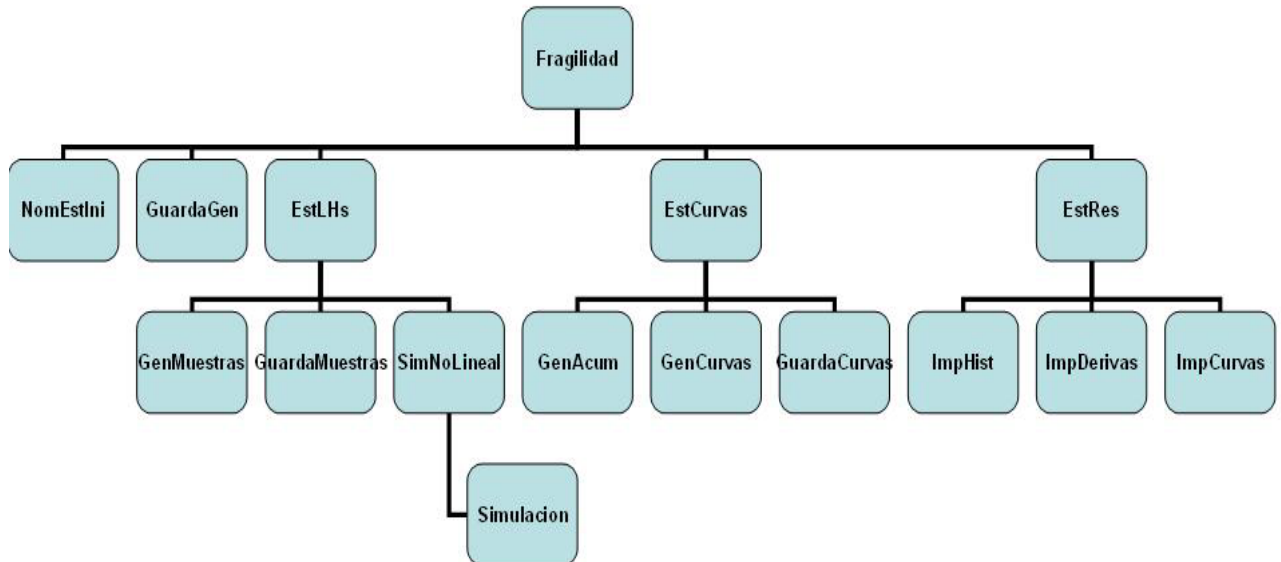


Figura B.3. Módulos principales del programa Fragilidad

A continuación se describen los principales módulos del programa:

- **Fragilidad.m:** Programa principal que ejecuta los módulos NomEstIni.m, Guarden.m, EstLHS.m, EstCurvas.m y EstRes.m.
- **NomEstIni.m:** Módulo que contiene los datos de entrada para todo el programa. Se ha descrito en detalle en la sección B.1.
- **GuardaGen.m:** Módulo que se encarga de almacenar la información en los archivos de salida. Todos los archivos de salida pueden revisarse mediante cualquier editor de textos.
- **EstLHS.m:** Módulo que genera las muestras mediante Hipercubo Latino y ejecuta el análisis dinámico no-lineal de cada de las muestras. Este módulo ejecuta los programas GenMuestras.m, GuardaMuestras.m y SimNoLineal.m.
- **EstCurvas.m:** Módulo que genera las curvas de fragilidad luego de concluir todo el proceso de simulación. Este módulo ejecuta los programas GenAcum.m, GenCurvas.m y GuardaCurvas.m.
- **EstRes.m:** Módulo que imprime y grafica los resultados. Este módulo ejecuta los programas ImpHist.m, ImpDerivas.m e ImpCurvas.m.

Las funciones que son llamadas por los módulos son las siguientes:

- **ajustepoli2.m:** Realiza el ajuste de una curva mediante polinomios cúbicos normales. Por defecto la función de reajuste es de grado 3. Sin embargo, en algunos casos el ajuste de las curvas no es satisfactorio pero se puede cambiar el grado de la función dentro del código de la función para mejor el ajuste.



- **derivamax.m:** Calcula la deriva máxima de entrepiso a partir de los desplazamientos de cada entrepiso.
- **Gsismo.m:** Genera señales sintéticas con la ayuda del programa SIMQKE. Los parámetros de la función son la aceleración máxima del terreno y la duración de la señal sísmica.
- **Simulacion.m:** Reanuda o inicia el análisis no-lineal de las muestras generadas. Si el proceso fue interrumpido, llamar a la función con SimCont. Si se inicia el proceso de simulación, llamar a la función desde SimNoLineal.

### B.3. Resultados generados por el programa

A continuación se muestran algunas pantallas de resultados que el programa Fragilidad tiene posibilidades de calcular.

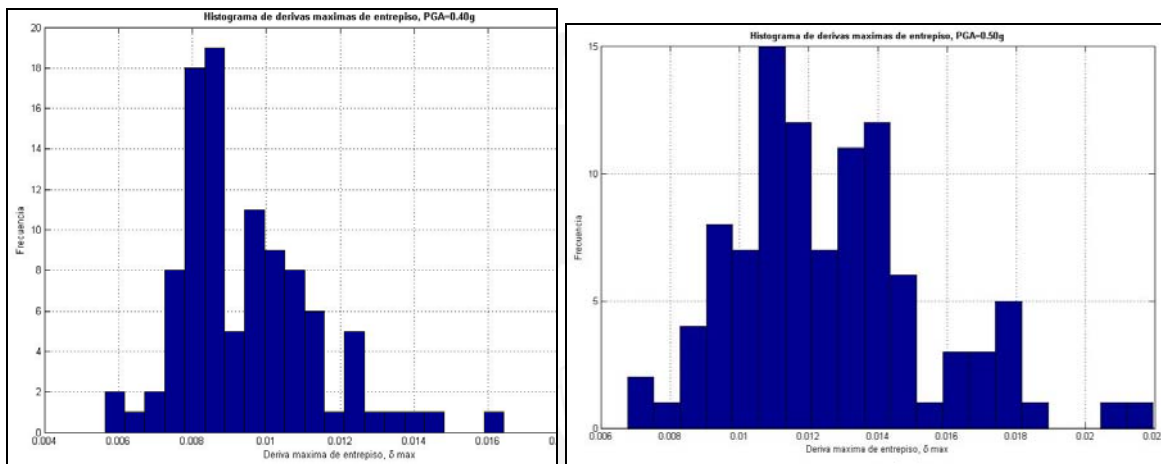


Figura B.4. Histogramas de los parámetros estructurales generados para el proceso de simulación.

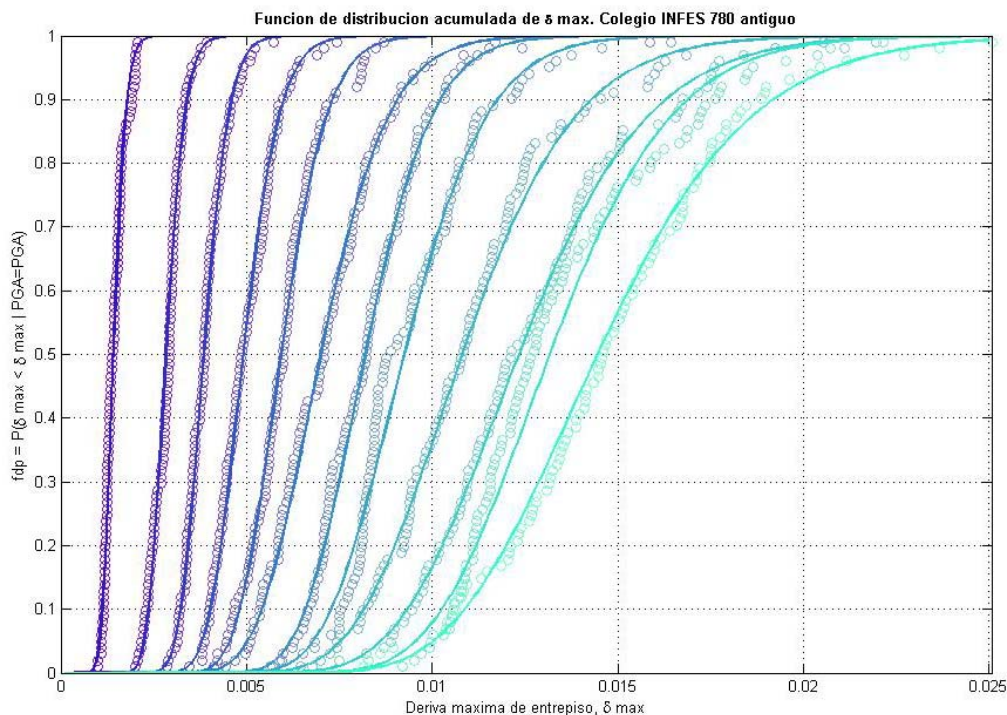


Figura B.5. Funciones de distribución de probabilidad acumulada de la deriva máxima de entrepiso. Se generan para cada nivel de intensidad sísmica.

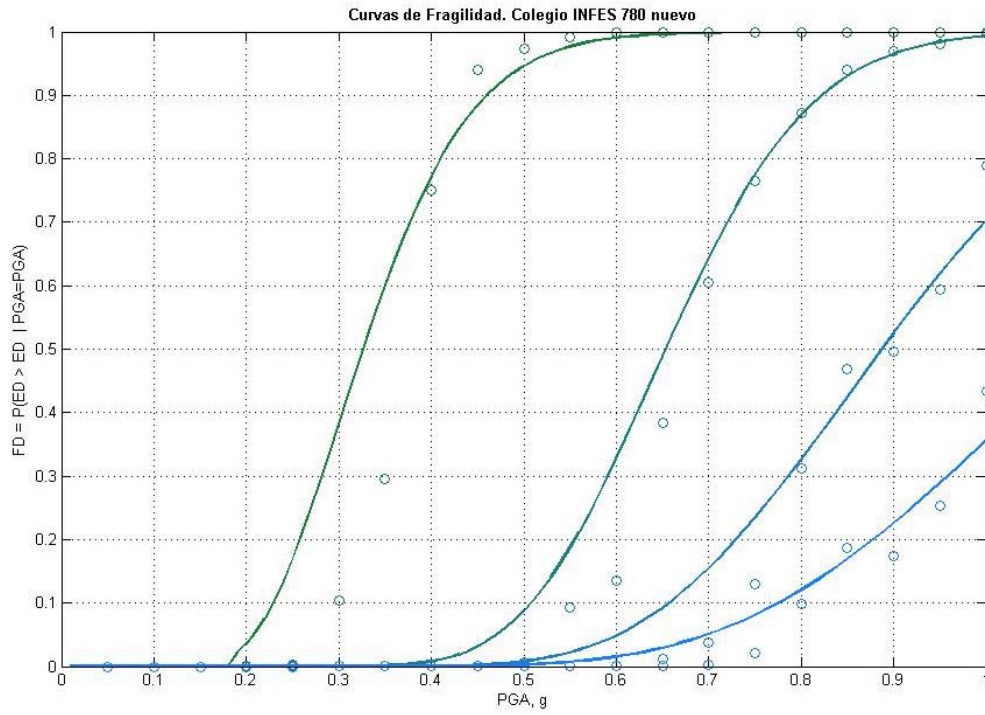
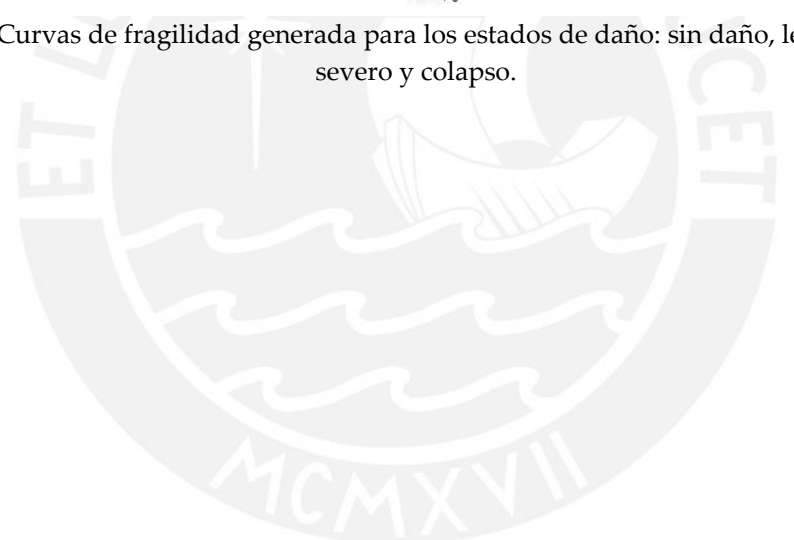


Figura B.6. Curvas de fragilidad generada para los estados de daño: sin daño, leve, moderado, severo y colapso.



Pontificia Universidad Católica del Perú  
Departamento de Ingeniería  
Sección Ingeniería Civil



**PROYECTO DAI #1187**

**Riesgo sísmico del campus PUCP ~ Segunda Fase: Desarrollo de una metodología para evaluar el riesgo sísmico de edificios peruanos**

**INFORME FINAL**

**Investigadores**  
Dr. Marcial Blondet  
Ing. Alejandro Muñoz

**Asistente de investigación**  
Ing. José Velásquez

**Lima - Perú**

**Octubre 2005**

## RIESGO SÍSMICO DEL CAMPUS PUCP: SEGUNDA FASE INFORME FINAL

### CONTENIDO

#### RESUMEN

#### 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Antecedentes
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Metodología y plan de trabajo

#### 2. PELIGRO SÍSMICO DEL CAMPUS

- 2.1. Sismicidad regional y local
- 2.2. Evaluación del Peligro Sísmico
  - Aceleración pico en el Campus
  - Señales Sintéticas

#### 3. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS

- 3.1. Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica
  - Descripción del procedimiento
  - Tipologías estructurales
- 3.2. Estimación del riesgo sísmico mediante curvas de fragilidad
  - 3.2.1. Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño
  - 3.2.2. Curvas de fragilidad analíticas
  - 3.2.3. Implementación de la metodología
  - 3.2.3. Aplicación a 2 edificaciones educativas peruanas
    - Curvas de fragilidad
    - Estimación de pérdidas por sismo

#### 4. CONCLUSIONES

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## Riesgo sísmico del campus PUCP

### RESUMEN

El proyecto consiste en el estudio del peligro sísmico del campus PUCP y en el desarrollo de una metodología para evaluar las pérdidas por sismo en edificios peruanos. Esta metodología se aplicó a la estimación del riesgo sísmico de dos edificaciones educativas. En este informe final se describe el desarrollo teórico y analítico de los métodos y técnicas a utilizar y su adaptación a los objetivos propuestos.

El peligro sísmico del campus se ha cuantificado mediante la aceleración máxima del terreno para varios escenarios de sismos (espectros de diseño y señales sintéticas). Esta estimación se basa en un enfoque probabilístico que toma en cuenta la sismicidad histórica, las fallas activas cercanas y las condiciones topográficas del lugar en estudio.

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones educativas se propone un método sofisticado que permite estimar las pérdidas (riesgo sísmico) mediante curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad son una manera de representar las probabilidades de alcanzar determinados niveles de daño y son generadas para un tipo de estructura mediante simulación Montecarlo.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En el Perú no existe una metodología definida de estimación de pérdidas por sismos mientras que en otros países, estudios de riesgo sísmico han permitido tomar medidas preventivas de reforzamiento en edificaciones vulnerables. La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) ha propuesto desarrollar e implementar una metodología de evaluación de riesgo sísmico para edificios peruanos que puede aplicarse a las edificaciones del campus PUCP. Para lograr este objetivo se necesita conocer por un lado el grado de la amenaza sísmica a la que está expuesto el campus PUCP (peligro sísmico) y por otro lado, la capacidad que tienen sus edificaciones de resistir esta amenaza (vulnerabilidad sísmica). Al combinar el peligro con la vulnerabilidad se pueden estimar las pérdidas por sismo (riesgo sísmico).

La metodología probabilística para estimar el peligro sísmico fue desarrollada por Cornell (1969 y 1970). Esta metodología integra información sismo-tectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relacionan la aceleración máxima del terreno y la probabilidad anual de excedencia para un determinado tiempo de exposición. Recientemente, Monroy y Bolaños (2004) aplicaron esta metodología para generar mapas de peligro uniforme para el Perú.

Uno de los primeros intentos para cuantificar la vulnerabilidad sísmica fue desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) que plasmó sus resultados en el reporte ATC-13 (1985). Este reporte cuantifica la probabilidad de daño sísmico de diferentes tipologías de edificios basándose en la opinión de expertos. El ATC desarrolló un método de evaluación visual rápida de edificios ante un potencial peligro sísmico. El procedimiento de este método se describe en el reporte FEMA 154 (ATC- 21 2000). Actualmente se está adaptando esta metodología para edificios peruanos (Muñoz y Blondet 2004) con el objetivo de reforzar la infraestructura educativa.



El riesgo sísmico se puede representar mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño (Bonett 2003). Las curvas de fragilidad caracterizan la vulnerabilidad de un tipo de estructura y permiten estimar las pérdidas por sismo. El principal objetivo del proyecto es generar estas curvas mediante un método analítico y calibrar estos resultados a partir de la opinión de expertos. Las curvas de fragilidad generadas para las tipologías representativas de edificaciones educativas serán implementadas en la metodología de estimación de pérdidas que se aplicará a un edificio del campus.

El proyecto riesgo sísmico PUCP utilizará la metodología de evaluación visual rápida propuesta por Muñoz (2004). Sin embargo, el objetivo primordial lo constituye la herramienta de estimación de riesgo sísmico basada en curvas de fragilidad ya que permite estimar las pérdidas en forma cuantitativa.

Este proyecto se ha dividido en dos partes. La primera parte se ocupa del peligro sísmico del campus y la segunda, de la estimación de las pérdidas por sismo en edificaciones peruanas (riesgo sísmico).

## 1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es desarrollar las herramientas y técnicas necesarias para la evaluación del riesgo sísmico de edificaciones peruanas. Los objetivos específicos del proyecto son:

- a) Implementar una metodología para la determinación del peligro sísmico de una zona.
- b) Estimar el peligro sísmico del campus PUCP de San Miguel.
- c) Generar un procedimiento para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones educativas.
- d) Aplicar las técnicas y herramientas desarrolladas, para estimar el riesgo sísmico de un edificio peruano.

Como aplicación de la metodología desarrollada para estimar el riesgo sísmico se estiman las pérdidas por sismo de 2 colegios típicos peruanos. Los edificios del campus PUCP serán evaluados en la siguiente etapa de este proyecto.

## 1.3. Metodología y plan de trabajo

### I) Peligro sísmico del campus

- a) Metodología de estimación de peligro sísmico de una zona.
  - Estudio de la metodología probabilista de estimación del peligro sísmico.
  - Estudio de las leyes de atenuación de ondas sísmicas en terremotos de subducción.
- b) Determinación del peligro sísmico del campus.
  - Investigación de la sismicidad histórica de Lima.
  - Distribución temporal de sismos en la zona central del país.
  - Determinación y ubicación de fallas activas.
  - Estudios de las condiciones geológicas y del suelo del campus.
  - Selección de niveles probables de peligro sísmico.
  - Estimación del movimiento correspondiente a los niveles de peligro.

- Generación de espectros de diseño y de señales de aceleración sintéticas.

## II) Vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios del campus

- a) Tipologías de edificaciones educativas.
  - Revisión de las tipologías propuestas en el proyecto DAI “Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú” (Muñoz 2004).
  - Selección de las tipologías estructurales correspondientes a los edificios del campus.
- b) Desarrollo del procedimiento para cuantificar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la PUCP.
  - Revisión de la metodología de evaluación visual rápida desarrollada en el proyecto DAI “Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú” (Muñoz 2004).
- c) Desarrollo del procedimiento para estimar las pérdidas por sismo en los edificios de la PUCP.
  - Estudio de la metodología probabilista de estimación de pérdidas por sismo basada en curvas de fragilidad.
  - Estudio de la metodología para generar curvas de fragilidad mediante un método analítico (Bonett 2003).
  - Implementación de la metodología para generar curvas de fragilidad analíticas mediante un programa en Matlab.
  - Generación de curvas de fragilidad para 2 edificios educativos peruanos.
  - Desarrollo de la metodología para estimar las pérdidas por sismo utilizando las curvas de fragilidad obtenidas.
- d) Estimación de las pérdidas por sismo de los 2 edificios educativos peruanos.

## 2. PELIGRO SÍSMICO DEL CAMPUS

La alta ocurrencia de eventos sísmicos en nuestro país evidencia la necesidad de cuantificar los efectos de los sismos en nuestras estructuras. Para cuantificar estos eventos sísmicos debe tenerse en cuenta la sismicidad del lugar y también la respuesta de las estructuras a dicha sismicidad

El peligro sísmico se puede cuantificar mediante el valor máximo de algún parámetro que representa el movimiento del terreno, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno. También es usual utilizar algún parámetro correspondiente a la respuesta estructural como es la pseudo-aceleración (parámetro que permite calcular los desplazamientos máximos en una estructura).

Para representar el peligro sísmico se pueden emplear dos enfoques, el determinista y el probabilista. El enfoque determinista cuantifica el peligro considerando el sismo más destructivo que pueda ocurrir en el lugar de análisis. El enfoque probabilista expresa la aceleración de diseño (parámetro que representa el movimiento del terreno) para diferentes niveles de probabilidad de excedencia.

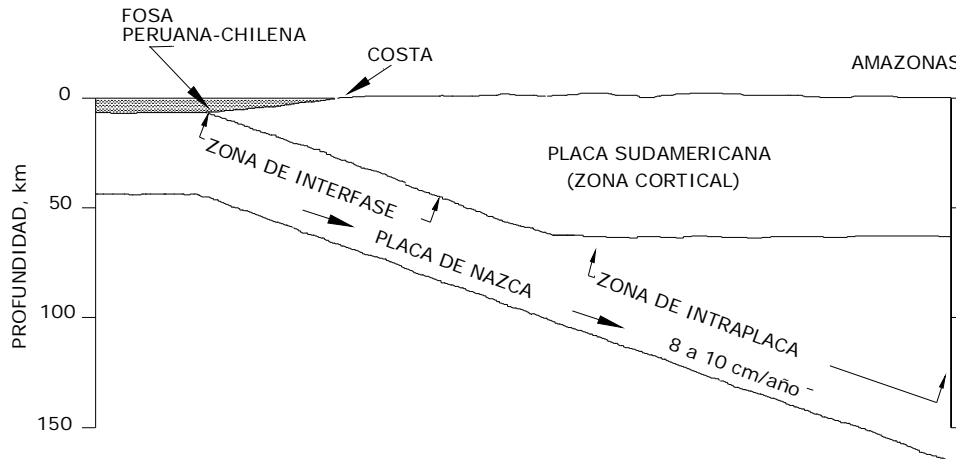
### 2.1. Sismicidad regional y local

El campus PUCP está ubicado en la ciudad de Lima que se encuentra cerca al margen de la placa tectónica convergente activa entre las placas de Nazca al oeste y Sudamericana al este. Sus coordenadas geográficas son 12°07' Latitud Sur y 77°11' Longitud Oeste.



**Figura 2.1.** Ubicación del campus PUCP (Placas Tectónicas).

El proceso de subducción de la placa de Nazca presenta tres zonas importantes de actividad tectónica: la zona de subducción de interfase poco profunda, la zona de subducción de intraplaca profunda y la zona de corteza continental de la placa Sudamericana (figura 2.2).



**Figura 2.2.** Sección transversal del proceso tectónico en la zona de subducción (Bariola 2001).

La sismicidad histórica en el Perú ha sido registrada desde la conquista y colonización de los españoles. Los investigadores que realizaron los aportes más importantes a la historia sísmica peruana fueron Silgado (1968, 1978, 1985), Dorbath et al. (1990) y Alva et al. (1984).

Los terremotos históricos más importantes que han ocurrido en Lima a lo largo de la historia se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2.1.** Terremotos Históricos en Lima (Silgado 1985).

Fecha del Terremoto	Hora	Intensidad	Magnitud
9 de julio de 1586	7:00 p.m.	-	-
13 de noviembre de 1655	2:38 p.m.	-	-
20 de octubre de 1687	4:15 p.m.	-	-
28 de octubre de 1746	11:30 a.m.	X-XI MM	8.1 Ms
1 de diciembre de 1806	6:00 p.m.	-	-
30 de marzo de 1828	7:35 a.m.	-	-
24 de mayo de 1940	11:35 a.m.	VII-VIII MM	7.9 Ms
17 de octubre de 1966	4:14 p.m.	VIII MM	7.7 Ms
3 de octubre de 1974	9:21 a.m.	VII MM	7.9 Ms

## 2.2. Evaluación del Peligro Sísmico

En los últimos 30 años la aplicación de los conceptos de probabilidades en la ingeniería sísmica ha permitido que las incertidumbres en la magnitud, la ubicación, la variación del movimiento del suelo y en la respuesta estructural puedan ser explícitamente consideradas en la evaluación del peligro sísmico.

Un análisis probabilista del peligro sísmico se desarrolla mediante la representación adecuada de la actividad sísmica de la zona en estudio y la elección de alguna relación entre la amplitud del movimiento del suelo o de la respuesta estructural, alguna medida del sismo (magnitud o intensidad) y la distancia entre el foco y la distancia de interés.

Para relacionar la amplitud del movimiento, el tamaño del sismo y la distancia se pueden emplear leyes de atenuación. Las incertidumbres en la ocurrencia, ubicación y el nivel de respuesta sísmica esperada (movimiento del suelo o respuesta estructural) son consideradas mediante funciones de densidad de probabilidades.

### Aceleración pico en el Campus

Se ha estimado el peligro sísmico del campus, empleando la metodología propuesta por McGuire (1976) que se basa en el “teorema de probabilidad total”. Este teorema se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$P[A] = \iint P[A | S, R] f_S(S) f_R(R) dS dR \quad (1)$$

$P[A]$  representa la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento  $A$ .  $S$  y  $R$  son variables continuas e independientes que influyen en  $A$ . Por tanto, la probabilidad de que el evento  $A$  ocurra puede calcularse integrando el producto de la probabilidad de  $A$  para determinados valores de  $S$  y de  $R$  y las probabilidades de ocurrencia de  $S$  y  $R$ .

Para la estimación de la aceleración máxima,  $P[A]$  representa la probabilidad de excedencia del valor de la aceleración máxima,  $A$ . El evento  $S$  representa la ocurrencia de un sismo de magnitud  $S$ . El evento  $R$  representa la ocurrencia del sismo de magnitud  $S$  a una distancia  $R$  del foco.

Para la evaluación del riesgo sísmico se han elegido tres escenarios de sismicidad representados por los niveles de peligro sísmico sugeridos por el SEAOC (1999): Sismo Ocasional (50% de excedencia en 50 años), Sismo Raro (10% de excedencia en 50 años) y Sismo Muy Raro (5% de excedencia en 50 años).

Estos niveles de sismicidad se pueden expresar también a través del período de retorno, mediante la siguiente expresión:

$$P_{MÁX} [a > A] = 1 - e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (2)$$

Donde,

$P_{MÁX} [a > A]$ , es la probabilidad de superar un valor aceleración  $A$ .

$t$ , es el tiempo de exposición (generalmente la vida útil de la edificación).

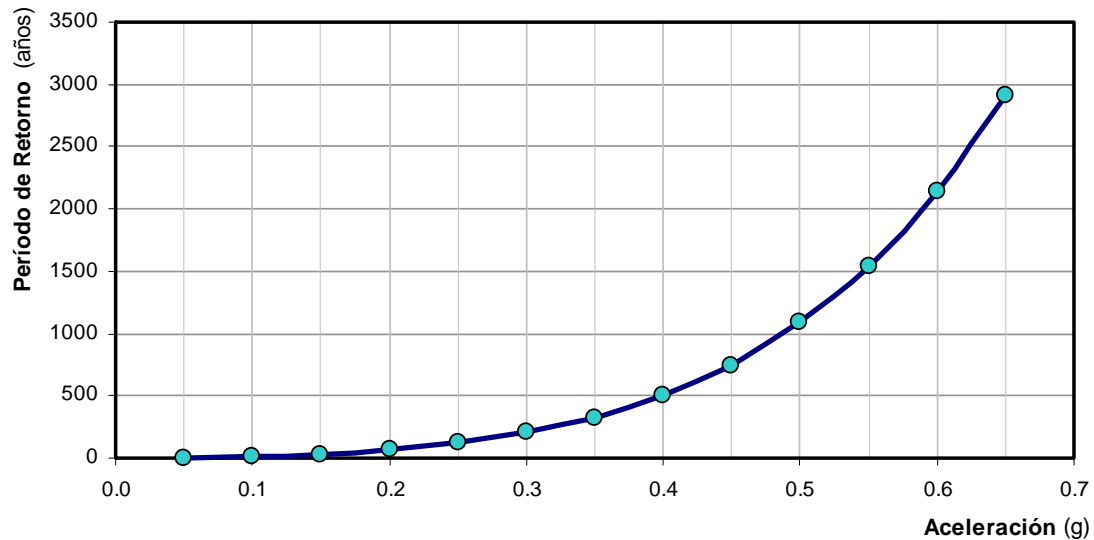
$T_R$ , es el período de retorno.

El peligro sísmico en el campus se estimó mediante el empleo del programa EQRisk (McGuire, 1976). Se tomaron como datos de entrada las coordenadas del campus, las fuentes



sismogénicas sugeridas por Castillo y Alva (1993) y se empleó la ley de atenuación de Casaverde y Vargas (1980).

Además, se establecieron valores de recurrencia (inversa del período de retorno) para los cuales se estimó la aceleración pico asociada. Con estas aceleraciones se generó la curva período de retorno versus aceleración para el campus PUCP mostrada en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Curva período de retorno vs. aceleración asociada para las coordenadas del campus de la PUCP.

Los valores de aceleración pico para los tres niveles de sismicidad se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Aceleración pico asociada a los tres niveles de sismicidad seleccionados

Nivel de Peligro Sísmico		Aceleración Pico (g)	Período de Retorno (años)
Sismo Ocasional	(50% de excedencia / 50 años)	0,20	72
Sismo Raro	(10% de excedencia / 50 años)	0,40	475
Sismo Muy Raro	(5% de excedencia / 50 años)	0,50	975

Se puede comprobar que los resultados de la tabla anterior coinciden con las aceleraciones estimadas por el programa MRIESGO (Monroy y Bolaños 2004), como se observa en el mapa de distribución de aceleraciones mostrado en la figura 2.4.

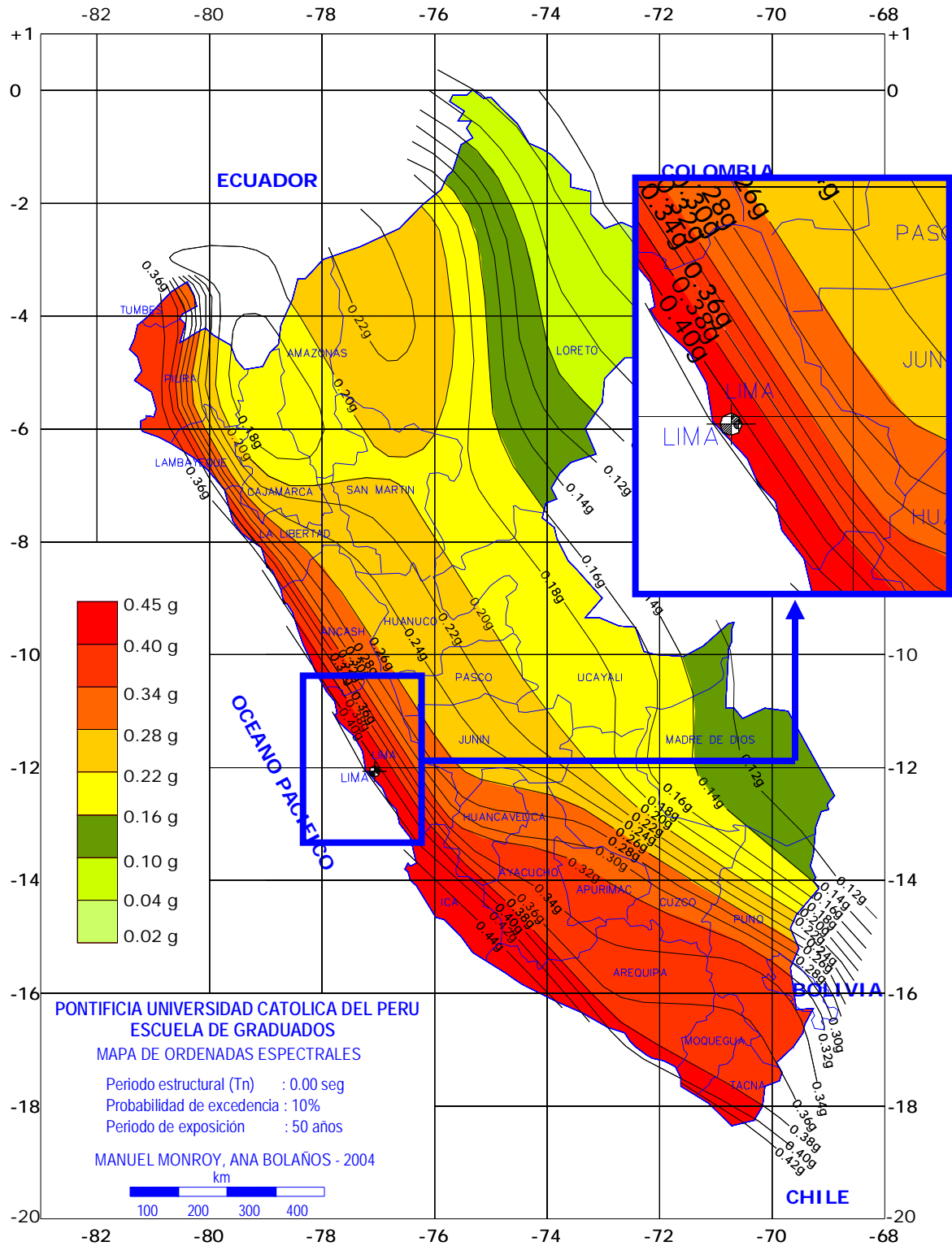
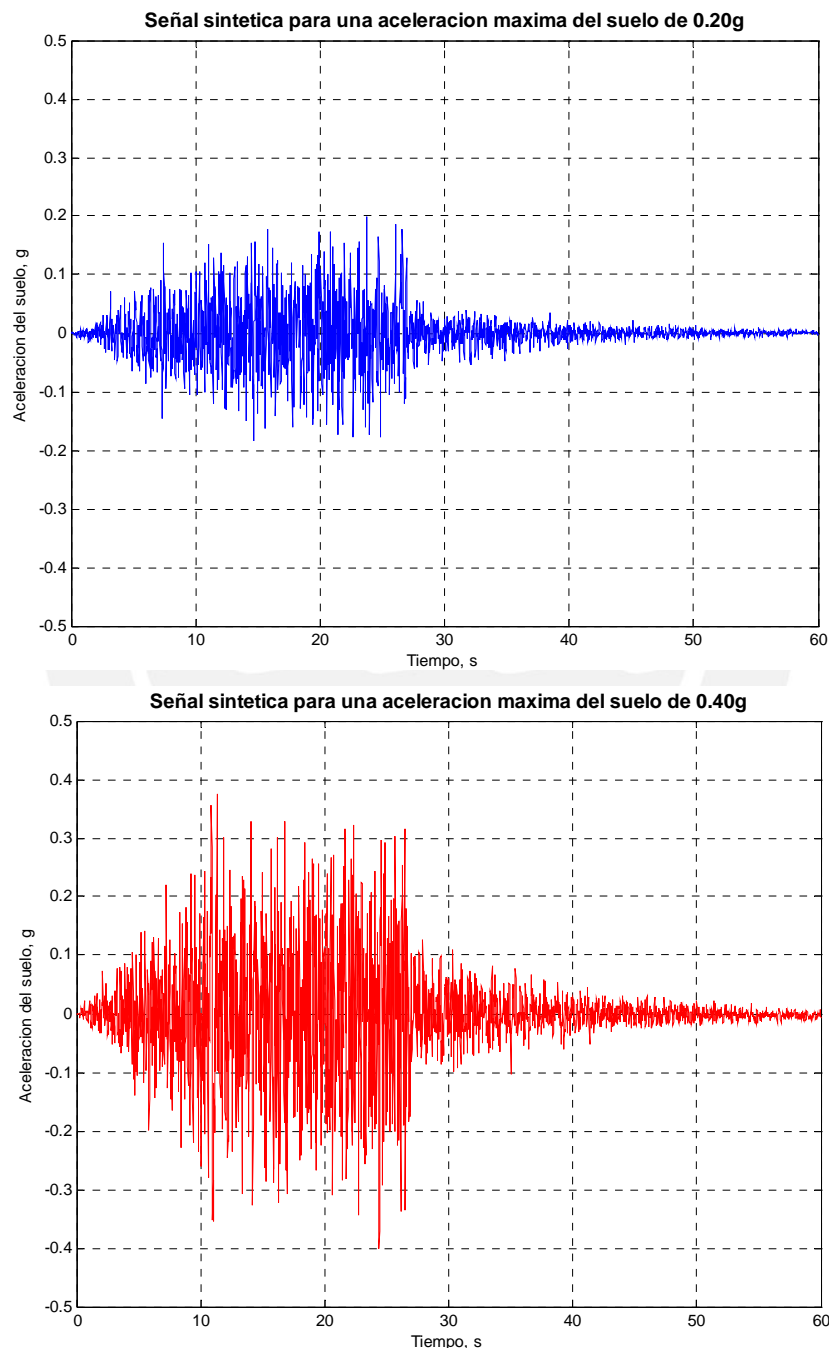


Figura 2.4. Distribución de aceleraciones en el Perú para un periodo de exposición de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia (Monroy y Bolaños 2004).

## Señales Sintéticas

Las señales sintéticas son registros de señales sísmicas aleatorias y que se utilizan para representar el comportamiento estocástico del movimiento del suelo. En este trabajo se han generado señales sintéticas compatibles con el espectro de diseño de la norma peruana. Estas señales se usan para estudiar la vulnerabilidad de los edificios mediante curvas de fragilidad.

En la figura 2.5 se muestran señales sintéticas representativas de los niveles de peligro sísmico para el campus PUCP.



**Figura 2.5.** Señales sintéticas para sismos ocasionales (arriba) y sismos raros (abajo).

### 3. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS

Como parte del presente trabajo se ha estudiado una primera metodología que permite evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones educativas de una manera visual y rápida (Muñoz 2004). La segunda metodología permitirá estimar el riesgo sísmico, es decir, los costos de reposición de las edificaciones mediante el desarrollo de curvas de fragilidad. Esta última constituye la mayor parte del trabajo realizado en este proyecto.

#### 3.1. Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica

##### Descripción del procedimiento

Este procedimiento requiere de la ejecución de encuestas de opinión a expertos en estructuras y en evaluación de daños producidos por sismos.

La evaluación visual de un edificio en particular, se lleva cabo mediante el llenado de un formulario. El resultado es la obtención de un puntaje estructural P, el cual toma en cuenta la tipología estructural del edificio y las características individuales que pueden ser observadas desde su exterior. El puntaje estructural P se relaciona con la probabilidad de que el edificio presente un nivel daño que amenace la vida de los ocupantes ante la ocurrencia de un sismo severo en la región en estudio. Mediante el puntaje P, se puede decidir qué edificios requieren una evaluación más detallada.

El procedimiento de evaluación visual rápida podrá ser aplicable en el Perú teniendo en cuenta las variaciones en los parámetros de entrada como son la tipología estructural, los puntajes estructurales básicos y los puntajes modificadores.

##### Tipologías estructurales

La caracterización de las tipologías se realiza para poder agrupar un gran número de edificios con características similares y obtener un único modelo representativo. De esta manera analizando el modelo representativo se puede extrapolar los resultados para todo el grupo que representa.

Las tipologías de edificaciones educativas más importantes son :

- Pórticos de concreto armado rellenos con muros de albañilería
- Placas de concreto armado rellenos con muros de albañilería
- Mampostería de adobe
- Mampostería con bloques de concreto

A partir de las tipologías definidas, se calculan los puntajes básicos y los puntajes modificadores. Estos puntajes son obtenidos a partir de las encuestas realizadas a los expertos.

### 3.2. Estimación del riesgo sísmico mediante curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad son una herramienta probabilística que constituyen la base para la estimación del riesgo sísmico. Los métodos para generar estas curvas son diversos y entre ellos destacan los métodos experimentales, los métodos basados en opinión de expertos y los métodos analíticos.

#### 3.2.1. Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Las curvas de fragilidad se pueden generar mediante observaciones de campo, basándose en la opinión de expertos y utilizando métodos analíticos (Bonett 2003). Cuando no se dispone de suficiente información de campo, las curvas de fragilidad pueden generarse analíticamente mediante simulación (Hwang y Huo 1994).

La figura 3.1 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La intensidad sísmica se ha definido por la aceleración pico del suelo. Se observa que para una aceleración de 0,30g, la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo será de 37%. El 35% de edificios de este tipo sufrirían daño severo, el 20% daño moderado y solo el 8% daño leve, ante la misma intensidad sísmica.

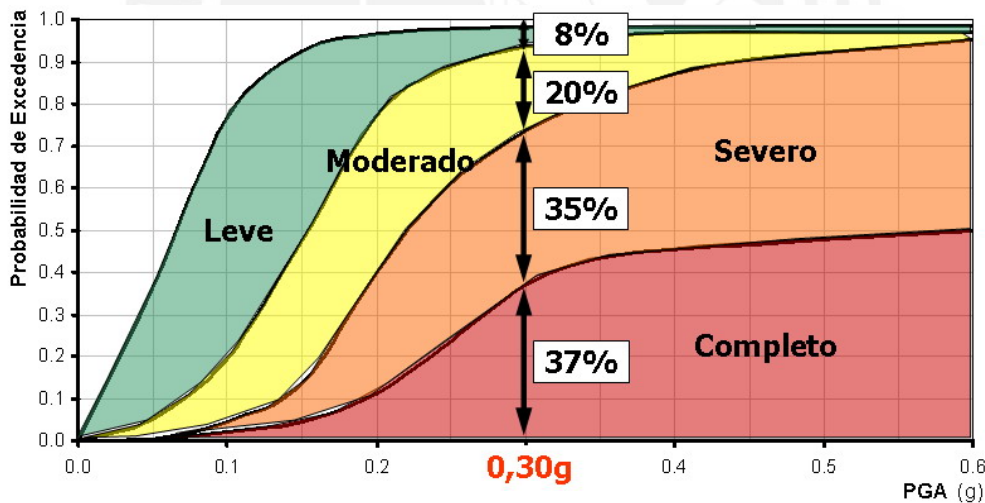


Fig. 3.1. Ejemplo de curvas de fragilidad

Las matrices de probabilidad de daño son otra forma de relacionar (en forma discreta) la intensidad sísmica con los estados de daño. Estas matrices expresan la probabilidad de obtener un determinado nivel de daño para una estructura sujeta a un sismo con un nivel de severidad determinado (Braga et al 1986).

En la tabla 3.1 se muestra un ejemplo de matriz de probabilidad de daño para otro tipo de estructura. Se observa que para un sismo de intensidad IX en la escala de Mercalli Modificada (MMI) se tiene una probabilidad de 3,0% de alcanzar daño ligero; 68,1% para daño moderado y 28,9% para daño pesado.



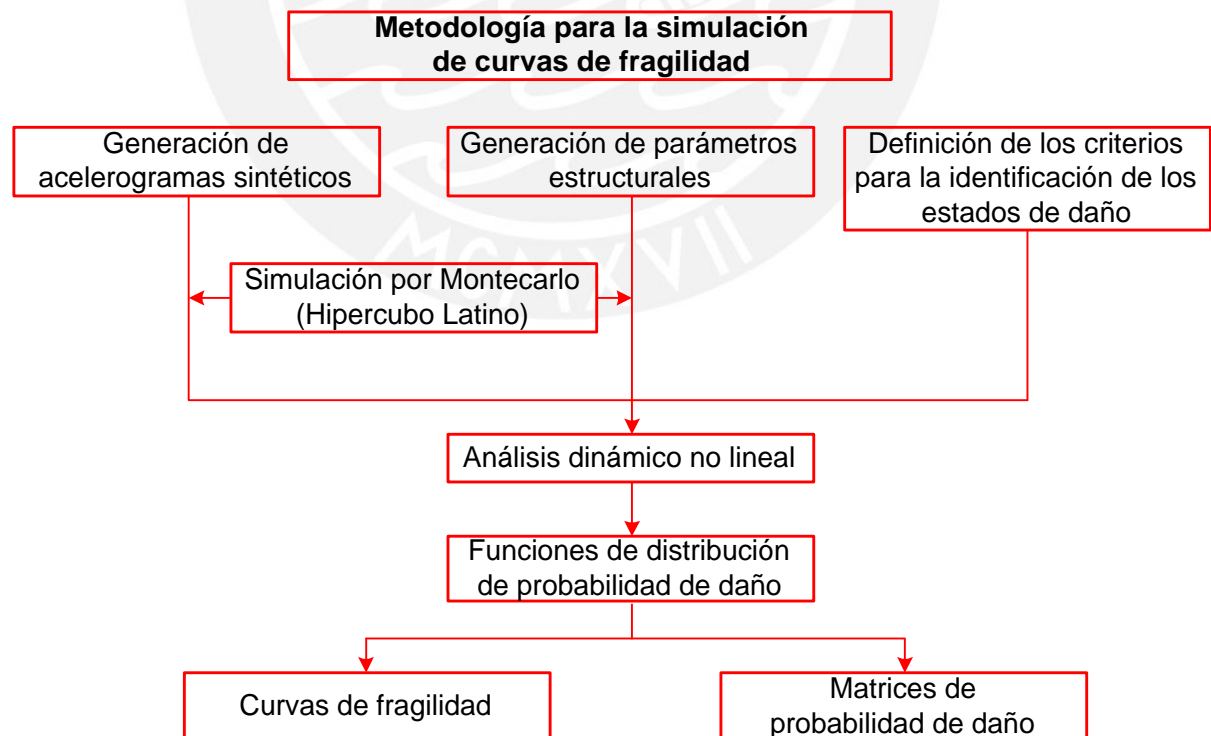
**Tabla 3.1.** Matriz de probabilidad de daño propuesta por el ATC-13 para una tipología (1985)

Estado de Daño	Rango Factor Daño (%)	Factor Central Daño (%)	Probabilidad de daño en porcentaje para c/IMM y estado de daño							
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1-Sin Daño	0	0,0	0,1							
2-Mínimo	0 - 1	0,5	27,0	2,2						
3-Ligero	1 - 10	5,0	72,9	89,3	32,2	3,0				
4-Moderado	10 - 30	20,0		8,5	66,9	68,1	19,9	3,9	0,1	
5-Pesado	30 - 60	45,0			0,9	28,9	74,2	57,8	12,4	
6-Mayor	60 - 100	80,0					5,9	38,3	84,3	
7-Destrucción	100	100,0							3,2	

### 3.2.2. Curvas de fragilidad analíticas

El método analítico para generar curvas de fragilidad se emplea en zonas donde no se dispone de información de daños producidos por sismos, ni de suficientes ensayos de laboratorio (Bonett 2003).

El procedimiento para generar curvas de fragilidad consiste en calcular la respuesta de un grupo significativo de estructuras ante diferentes niveles de demanda sísmica. Del procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado se obtienen las curvas de fragilidad. Para generar la muestra se toman en cuenta las variaciones en las propiedades estructurales, en la demanda sísmica y en los estados de daño representado por un parámetro indicador del daño (PID). Usando luego procedimientos de análisis dinámico no-lineal, se calcula la respuesta y se construyen funciones de distribución de probabilidad para el daño alcanzado. Finalmente, en base a estas funciones se logra representar la vulnerabilidad mediante curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño (figura 3.2).



**Figura 3.2.** Metodología para la simulación de las curvas de fragilidad (Adaptado de Bonett 2003)

### a. Variabilidad considerada

El método de Montecarlo es una técnica de simulación que permite estimar la respuesta de procesos estocásticos. A partir de funciones de distribución de probabilidad de las variables del proceso se pueden estimar las respuestas (Bonett 2003, Erberik y Elnashai 2004). Para estudiar la vulnerabilidad de edificios, se genera un conjunto de muestras de las variables que representan los parámetros sísmicos y estructurales. Los valores para cada parámetro se eligen en forma aleatoria a partir de su distribución de probabilidad. Para obtener resultados confiables se requiere de un gran número de ejecuciones. Para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hipercubo Latino (Florian 1992). Esta técnica permite reducir la muestra a 100 modelos estructurales que representan razonablemente bien las incertidumbres en las variables sísmicas y estructurales.

### Parámetros sísmicos

Para representar la acción sísmica en el análisis no-lineal se utilizan señales sintéticas (acelerogramas aleatorios). Se generan señales compatibles con el espectro de peligro uniforme del sitio. Estas señales sintéticas se generan para un Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS). El PIS utilizado es la aceleración máxima del suelo (PGA) debido a que el peligro sísmico está definido en función de este parámetro en todo el territorio peruano. En la figura 2.5 se observan acelerogramas generados para un determinado sitio con PGAs de 0,20g y 0,40g compatibles con el espectro elástico de diseño de la norma peruana.

### Parámetros estructurales

Los parámetros estructurales considerados fueron la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ). De acuerdo a datos experimentales el  $f_y$  se ajusta mejor a una distribución lognormal. Para el  $f_y$  de 4200kg-f/cm<sup>2</sup> se usa una media de 4800kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 6%. En el concreto, es típico utilizar la distribución normal y para un concreto con  $f'_c$  de 280 kg-f/cm<sup>2</sup> se adopta una media de 320 kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 15%.

### Estados de Daño

Para estudiar el efecto de los sismos se utiliza el factor de daño que representa la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición (reemplazo total) del edificio. Los valores mostrados en la tabla 3.2 son los recomendados por Hwang y Lin (2002) y que han sido utilizados en esta metodología. Por ejemplo, a partir de esta tabla, podríamos afirmar que para reparar una estructura que ha sufrido daño moderado el costo de reparación equivale al 20% del costo de reposición.

Debido a que los elementos estructurales y no-estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, en este estudio se usa la deriva máxima de entrepiso,  $\delta_{m\acute{a}x}$ , como PID. A partir de la curva de capacidad de la estructura se definen los rangos de  $\delta_{m\acute{a}x}$  asociados con los estados de daño (SEAOC 1999).

**Tabla 3.2.** Estados de daño y factores de daño sugeridos por Hwang y Lin (2002)

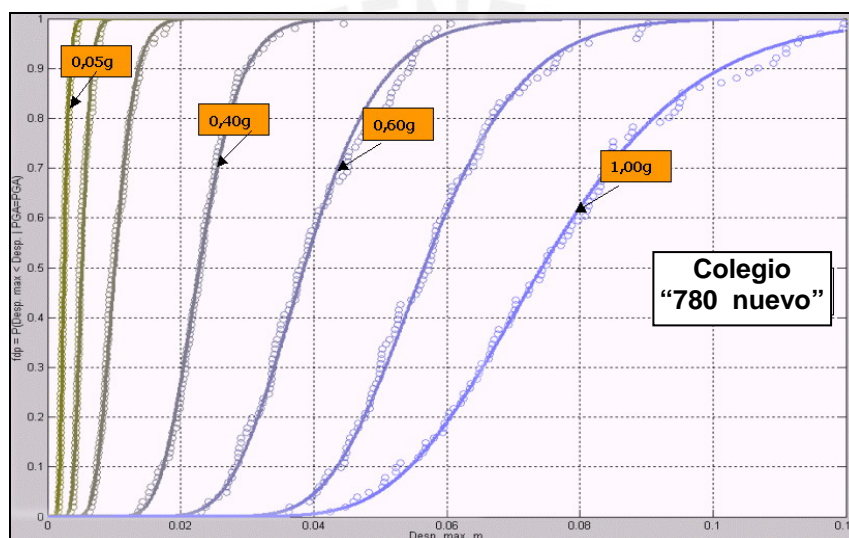
Estado de Daño	Factor de Daño
Sin Daño	0%
Leve	5%
Moderado	20%
Severo	65%
Completo	100%

### b. Análisis Dinámico No-lineal

El modelo estructural considera elementos unidimensionales con rótulas concentradas por flexión y rótulas concentradas por corte, de tal manera que se toma en cuenta la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo. Los modelos simulados son sometidos a las señales sintéticas que representan el movimiento sísmico. Para realizar el análisis no-lineal se utiliza el programa DRAIN-2DX (Prakah et al. 1993).

### c. Función de distribución de probabilidad del daño

A partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación, se obtienen las funciones de distribución de probabilidad del PID para cada nivel de intensidad sísmica (PIS). La figura 3.3 muestra un ejemplo para los desplazamientos laterales máximos de un colegio típico peruano. Estas curvas fueron ajustadas mediante polinomios cúbicos normales (Hong y Lind 1996).



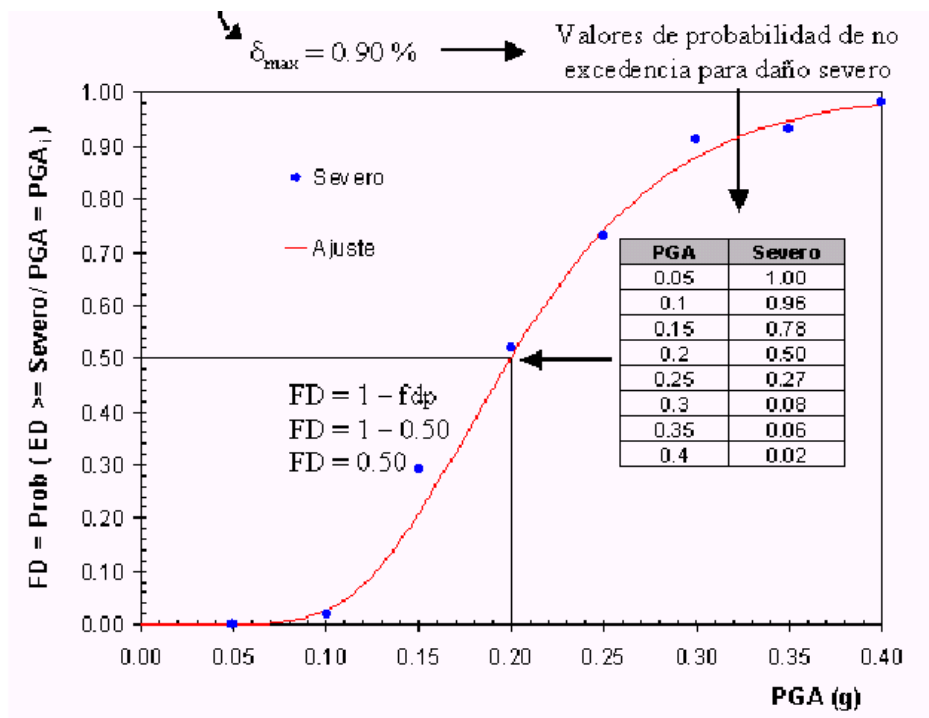
**Fig. 3.3.** Función de distribución de probabilidad acumulada (fdp) de los desplazamientos laterales máximos para un modelo de colegio típico peruano.

### d. Curvas de fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural (figura 3.3) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño ED<sub>i</sub> (Bonett 2003). Ésto es:

$$FD = P[ED \geq ED_i | PIS = PIS_i] \quad (3.1)$$

La figura 3.4 muestra el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para un PGA de 0,20 g, y  $\delta_{\text{máx}} = 0,90\%$  correspondiente al estado de daño severo, se tiene una fdp de 0,50. La probabilidad de excedencia se obtiene como  $FD = 1 - fdp = 1 - 0,50 = 0,50$ , que representa una probabilidad del 50% de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno de 0,20g. Los puntos así obtenidos se pueden también ajustar a los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o una distribución lognormal. Se aplica el mismo procedimiento para los demás estados de daño y se obtienen curvas como las mostradas en la figura 3.1.



**Figura 3.4.** Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad a partir de las  $f_{dp}$  y de los umbrales de los estados discretos de daño. a) Para el umbral de daño severo ( $\delta_{max} = 0.9\%$ ) se leen las  $f_{dp}$ 's correspondientes a cada PGA. b)  $FD_i$  se obtiene como  $1 - f_{dp_i}$  y se ajusta la curva de probabilidad a los puntos obtenidos. (Bonett 2003).

### 3.2.3. Implementación de la metodología

El proceso para generar las curvas de fragilidad se ha sistematizado mediante un programa desarrollado en MatLab (MathWorks 2002) denominado “Fragilidad”. Este programa tiene la intención de ser de propósito general, es decir, que pueda aplicarse al estudio de cualquier tipología estructural. En el futuro se pretende mejorar la interfase y habilitar más opciones para que pueda aplicarse en la estimación del riesgo sísmico de los edificios de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Actualmente el programa está en fase de prueba.

El código ha sido desarrollado de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 3.2. Cada bloque representa un módulo del programa y puede documentarse, optimizarse y en general, mantenerse en forma independiente. El programa “Fragilidad” requiere de un archivo de entrada de datos donde se debe proporcionar información sobre el modelo estructural, parámetros sísmicos y estructurales, funciones de distribución de probabilidad, definición de los estados de daño y parámetros del proceso de simulación.

```

73 ! CENTRO DE MASA
74 $ 011 200
75 $ 011 300
76 ! *****
77 *SLAVING
78 $ 100 200 201 214
79 $ 100 300 301 314
80 ! *****
81 *MASSES
82 $ 100 28.6 200 2.650
83 $ 100 15.5 300 2.650
84 ! *****
85 *ELEMENTGROUP
86 ! *****
87 ! DEFINICION DE ELEMENTOS
88 2 0 0 0.0 COLUMNS Y VIGA
89 ! *****
90 ! DEFINICION DE ELEMENTOS TIPO 2
91 6 0 6
92 ! *****
93 ! DEFINICION DE RIGIDECES
94 ! E SHR Ag Ix kii kjj kij
95 1 2200000.0 0.046 0.1438 3.961E-03 4.0 4.0 2.0
96 2 2200000.0 0.027 0.2850 1.560E-02 4.0 4.0 2.0
97 3 2200000.0 0.027 0.2250 1.520E-02 4.0 4.0 2.0
98 4 2200000.0 0.047 0.1375 3.466E-03 4.0 4.0 2.0
99 5 2200000.0 0.042 0.1375 3.466E-03 4.0 4.0 2.0
00 6 2200000.0 0.045 0.1750 7.146E-03 4.0 4.0 2.0
01 ! *****
02 ! DEFINICION DE DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA (NO CONSIDERA P-M)
03 ! My+ My- Pt Pc
04 1 1 12.80 12.80
05 2 1 31.75 31.75
06 3 1 24.02 24.02
07 4 1 11.50 11.50
08 5 1 12.03 12.03
09 6 1 15.85 20.61
10 ! *****
11 ! GENERACION DE ELEMENTOS
12 1 0101 0201 1 1 1 1
13 2 0102 0202 1 2 2 2
14 3 0103 0203 1 3 3 3
15 4 0104 0204 1 2 2 2
    
```

Figura 3.5. Archivo de entrada de datos para los programas DRAIN-2DX y “Fragilidad”.

### 3.2.4. Aplicación a 2 edificaciones educativas peruanas

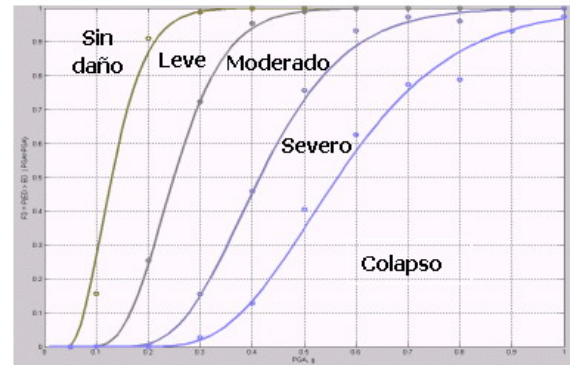
#### Curvas de fragilidad

Como aplicación de esta metodología se seleccionó 2 colegios típicos peruanos: un sistema aporticado relativamente antiguo que ha tenido pobre desempeño sísmico, “780 antiguo”, y un sistema de diseño más reciente cuyo excelente desempeño ha sido probado en el sismo de Arequipa del 2001, el “780 moderno”. La denominación “780” se debe a que ambos colegios tiene aulas de 7,80m de largo. Las curvas de fragilidad se muestran en la figura 3.6. Se puede observar claramente que el colegio “780 Moderno” tiene una mejora radical en su desempeño sísmico y por lo tanto baja probabilidad de daños severos para sismos moderados. Esto se debe al aumento en la exigencia de rigidez lateral impuesta por la norma sismorresistente de 1997 (SENCICO 1997).





780 Antigo



780 Moderno

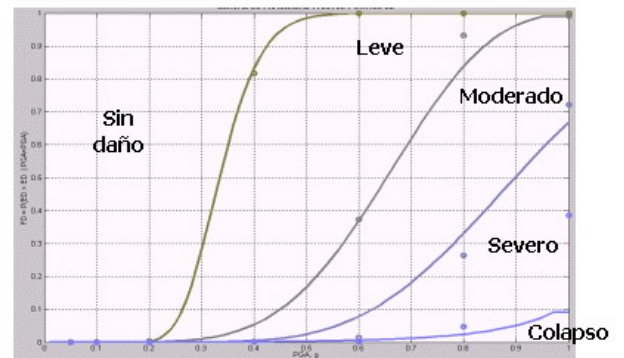


Figura 3.6. Curvas de fragilidad para los 2 colegios típicos peruanos.

### Estimación de pérdidas por sismo

Las curvas de fragilidad de estos colegios permiten calcular directamente los costos de reparación, escogiendo adecuadamente escenarios de intensidad sísmica. Cabe mencionar que no se toma en cuenta el daño producido en los elementos no-estructurales. El procedimiento consiste en determinar las probabilidades para los diversos estados de daño y los factores de daño (FD), que permiten calcular un Factor de Daño Medio, FDM (Hwang y Lin 2002). En la figura 3.7 se muestra la forma de obtener el FDM para el colegio “780 antiguo” y para una intensidad sísmica representada por un PGA de 0,4g. A partir de esta tabla se puede afirmar que la estructura se daña, en promedio, un 43,75%.

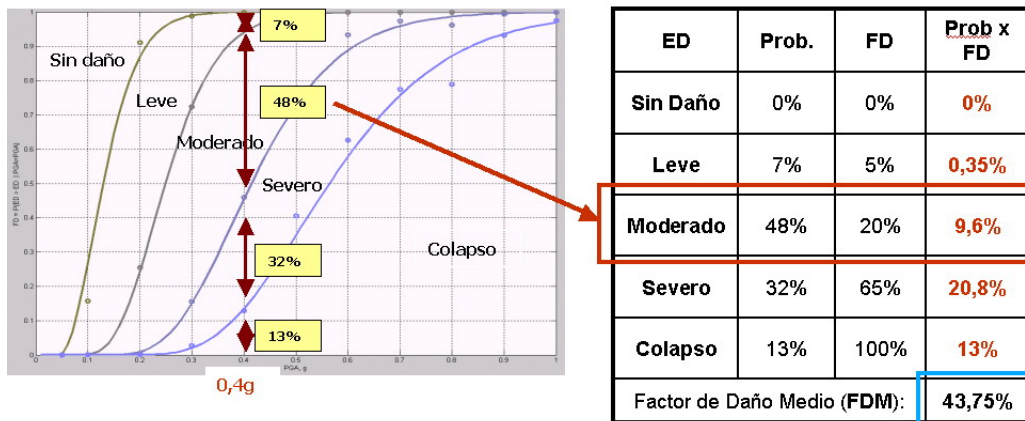


Figura 3.7. Determinación del Factor de Daño Medio a partir de las Curvas de Fragilidad.

Considerando un colegio tipo “780 antiguo” de  $450\text{m}^2$  de área construida y cuyo costo de reposición es de aproximadamente  $\text{US}\$250/\text{m}^2$ , se estima un costo de reparación de su estructura ante un sismo de  $0,40\text{g}$  de  $43,75\% \times 450\text{m}^2 \times \text{US}\$250/\text{m}^2 = \text{US}\$ 49219$ . En la tabla 3.3 se muestran los costos de reparación estimados para ambos colegios típicos y para los 3 niveles de peligro sísmico..

**Tabla 3.3.** Costos de reparación estructural de los 2 colegios típicos peruanos

Intensidad Sísmica	Aceleración pico (g)	Costo de reparación (miles de US\$)	
		780 antiguo	780 moderno
Sismo Ocasional	0,20	9,3	0,0
Sismo Raro	0,40	49,2	5,5
Sismo Muy Raro	0,50	74,0	10,1

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que las curvas de fragilidad permiten estimar razonablemente bien las pérdidas por sismo, ya que toman en cuenta las incertidumbres tanto en la demanda sísmica como en la respuesta de la estructura. Debido a que se trata de una herramienta probabilística, su aplicación resultará más efectiva si se aplica masivamente a grupos de edificios de similares características estructurales.

Debido a que existe una cantidad importante de colegios diseñados con la norma previa al año 1997 (“780 antiguo”), esta metodología puede aplicarse para evaluar el riesgo sísmico (costos de reparación) de estas edificaciones ante diversos escenarios de sismos. También se pueden proponer algunos sistemas de refuerzo y evaluar su desempeño mediante sus curvas de fragilidad. Esta metodología puede ser utilizada para estimar las pérdidas por sismo en los edificios del campus PUCP.

La metodología para generar curvas de fragilidad tiene muchas simplificaciones, pero puede mejorarse si se toman en cuenta otras variables particulares del sitio (acción sísmica) y de la estructura. En un trabajo futuro la metodología podría refinarse para generar curvas de fragilidad más consistentes. Las recomendaciones son: incluir sismos reales en vez de señales sintéticas, considerar la definición de los estados de daño como dependiente de los parámetros estructurales y utilizar como parámetro indicador de la intensidad sísmica al pseudo-desplazamiento o la pseudo-aceleración de la estructura ya que son más representativos de la demanda sísmica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Applied Technology Council (ATC). 1985. "Earthquake Damage Evaluation data for California". ATC-13. Redwood City, California.
- Applied Technology Council (ATC). 2000. "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook." ATC-21/FEMA 154. Washington, USA.
- Bonett, Ricardo. 2003. "Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Braga F., Dolce M., Liberatore D. 1986. "Assessment of the relationships between macroseismic intensity, type of building and damage, based on recent Italy earthquake data". Proceeding of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.
- Casaverde L. y Vargas J. 1980. "Zonificación Sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente, OEA y PUCP Lima, Perú.
- Castillo, J., Alva, J. 1993. "Peligro Sísmico en el Perú", VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.
- Cornell, C. A., and Benjamin, J. R. 1970. "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers".
- Cornell, C. A., and Vanmarcke, E. H. 1969. "The Major Influences on Seismic Risk, Proceedings". Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I.
- Erberik, M., and Elnashai, A. 2004. "Vulnerability Analysis of Flat Slab Structures". Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Paper No. 3102. Vancouver, August, 2004.
- Florian, A. 1992. "An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling". Probabilistic Engineering Mechanics, 7, 123—130.
- Hong, H. P. y Lind, N. C. 1996. "Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results". Structural Safety, 18(4), 329—339.
- Hwang, H. H. M., and Huo, J-R. 1994. "Generation of Hazard-Consistent Fragility Curves for Seismic Loss Estimation Studies". Technical Report NCEER-94-0015.
- Hwang, H., and Lin, Y.W. 2002. "Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings". Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE).
- MathWorks Inc. 2002. MATLAB. The Language of Technical Computing.
- McGuire, R. 1976. "EQRISK. Evaluation of Sites for Earthquake Risk, Open File Report 79-97". USGS, EEUU.
- Monroy M., Bolaños L. 2004. "Espectros de peligro sísmico uniforme. Programa MRIESGO". Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. PUCP.
- Muñoz A. y Blondet M. 2004. "Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú". Proyecto de Investigación auspiciado por la DAI. Primer Informe. Pontificia Universidad Católica del Perú.



Prakah, V., Powel, G. H. y Campbell, S. (1993). DRAIN-2DX. University of California, Berkeley.

SENCICO 1997. “Norma Técnica de Edificación NTE-.030. Diseño Sismorresistente”. Reglamento Nacional de Construcciones. Comité Peruano Permanente de Diseño Sismorresistente. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Silgado M., Giesecke A. 1981. “Terremotos en el Perú”. Lima: Ediciones Richkay Perú.

Structural Engineers Association of California (SEAOC). 1999. “Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book)”. California: SEAOC.





Pontificia Universidad Católica del Perú  
Departamento de Ingeniería  
Sección Ingeniería Civil



**PROYECTO DAI #1187**

**Riesgo sísmico del campus PUCP ~ Segunda Fase: Desarrollo de una metodología para evaluar el riesgo sísmico de edificios peruanos**

**PRIMER INFORME**

**Investigadores**

Jorge Marcial Blondet Saavedra

Juan Alejandro Muñoz Pelaez

**Lima - Perú**

**Diciembre 2004**



## Riesgo sísmico del campus PUCP Primer Informe

### Contenido

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodología y plan de trabajo	5
1.4. Resultados esperados	6
1.5. Avance realizado	6
2. PELIGRO SÍSMICO DEL CAMPUS	7
2.1. Sismicidad regional y local	7
2.2. Evaluación del Peligro Sísmico	9
Aceleración pico en el Campus	9
Señales Sintéticas	12
Resumen	12
3. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS	13
3.1. Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica	13
Descripción del procedimiento	13
Tipologías estructurales	13
3.2. Estimación del riesgo sísmico mediante curvas de fragilidad	15
Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño	15
Curvas de fragilidad analíticas	16
Curvas de fragilidad basadas en opinión de expertos	22
Estimación de pérdidas por sismo	23
Resumen	24
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

Con formato: Numeración y viñetas

Con formato: Numeración y viñetas

## Riesgo sísmico del campus PUCP

### RESUMEN

El proyecto consiste en el estudio del peligro sísmico del campus PUCP y en el desarrollo de una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones educativas. Esta metodología se aplicará en la estimación del riesgo sísmico de un edificio del campus. Este primer informe describe el desarrollo teórico y analítico de los métodos y técnicas a utilizar y su adaptación a los objetivos propuestos.

El peligro sísmico del campus se ha cuantificado mediante la aceleración máxima del terreno para varios escenarios de sismos (espectros de diseño y señales sintéticas). Esta estimación se basa en un enfoque probabilista que toma en cuenta la sismicidad histórica, las fallas activas cercanas y las condiciones topográficas del lugar en estudio.

Para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones educativas se propone un método de evaluación visual rápida basado en puntajes asociados a determinadas características estructurales. Un estudio más sofisticado de la vulnerabilidad sísmica permitirá estimar las pérdidas (riesgo sísmico) y para ello se propone utilizar curvas de fragilidad generadas mediante simulación Montecarlo y calibradas a partir de la opinión de expertos.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En el Perú no existe una metodología definida de estimación de pérdidas por sismos mientras que en otros países, estos estudios de riesgo sísmico han permitido tomar medidas preventivas de reforzamiento en edificaciones vulnerables. La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) ha propuesto desarrollar e implementar una metodología de evaluación de riesgo sísmico para edificios peruanos y que puede aplicarse a edificaciones educativas.

Este proyecto se ha dividido en dos bloques. El primer bloque se ocupa del peligro sísmico del campus y el segundo, de la estimación de la vulnerabilidad de edificaciones educativas y riesgo sísmico. A continuación se describen los antecedentes de estudios realizados en cada bloque.

La metodología probabilista para estimar el peligro sísmico fue desarrollada por Cornell (1969 y 1970). Esta metodología integra información sismo-tectónica, parámetros sismológicos y leyes de atenuación regionales para los diferentes mecanismos de ruptura. El resultado es una curva de peligro sísmico, donde se relacionan la aceleración máxima del terreno y la probabilidad anual de excedencia para un determinado tiempo de exposición. Recientemente, Monroy y Bolaños (2004) aplicaron esta metodología para generar mapas de peligro uniforme para el Perú.

Uno de los primeros intentos para cuantificar la vulnerabilidad sísmica fue desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) que plasmó sus resultados en el reporte ATC-13 (1985). Este reporte cuantifica la probabilidad de daño sísmico de diferentes tipologías de edificios basándose en la opinión de expertos. El ATC desarrolló un método de evaluación visual rápida de edificios ante un potencial peligro sísmico. El procedimiento de este método se describe en el reporte FEMA 154 (ATC- 21 2000). Actualmente se está adaptando esta metodología para edificios peruanos (Muñoz 2004) con el objetivo de reforzar la infraestructura educativa.

El riesgo sísmico se puede representar mediante curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño (Bonett 2003). Las curvas de fragilidad caracterizan la vulnerabilidad de un tipo de estructura y permiten estimar las pérdidas por sismo. El principal objetivo del proyecto es generar estas curvas mediante un método analítico y calibrar estos resultados a partir de la opinión de expertos. Las curvas de fragilidad generadas para las tipologías representativas de edificaciones educativas serán implementadas en la metodología de estimación de pérdidas que se aplicará a un edificio del campus.

El proyecto riesgo sísmico PUCP utilizará la metodología de evaluación visual rápida propuesta por Muñoz (2004). Sin embargo, el objetivo primordial lo constituye la herramienta de estimación de riesgo sísmico basada en curvas de fragilidad ya que permite estimar las pérdidas en forma cuantitativa.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es desarrollar las herramientas y técnicas necesarias para la evaluación del riesgo sísmico de edificaciones peruanas. Los objetivos específicos del proyecto son:

- a) Implementar una metodología para la determinación del peligro sísmico de una zona.
- b) Estimar el peligro sísmico del campus PUCP de San Miguel.
- c) Generar un procedimiento para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones educativas.
- d) Aplicar la técnicas y herramientas desarrolladas, para estimar el riesgo sísmico de un edificio del campus.

Con formato: Numeración y viñetas

### 1.3. Metodología y plan de trabajo

#### I) Peligro sísmico del campus

- a) Metodología de estimación de peligro sísmico de una zona.
  - Estudio de la metodología probabilista de estimación del peligro sísmico.
  - Estudio de la atenuación de ondas sísmicas en terremotos de subducción.
- b) Determinación del peligro sísmico del campus.
  - Investigación de la sismicidad histórica de Lima.
  - Distribución temporal de sismos en la zona central del país.
  - Determinación y ubicación de fallas activas.
  - Estudios de las condiciones geológicas y del suelo del campus.
  - Selección de niveles probables de peligro sísmico.
  - Estimación del movimiento correspondiente a los niveles de peligro.
  - Generación de espectros de diseño y de señales de aceleración sintéticas.

#### II) Vulnerabilidad y riesgo sísmico de los edificios del campus

- a) Tipologías de edificaciones educativas.
  - Revisión de las tipologías propuestas en el proyecto DAI “Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú” (Muñoz 2004).
  - Selección de las tipologías estructurales correspondientes a los edificios del campus.
- b) Desarrollo del procedimiento para cuantificar la vulnerabilidad sísmica de los edificios de la PUCP.
  - Revisión y utilización de la metodología de evaluación visual rápida desarrollada en el proyecto DAI “Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú” (Muñoz 2004).
- c) Desarrollo del procedimiento para estimar las pérdidas por sismo en los edificios de la PUCP.
  - Estudio de la metodología probabilista de estimación de pérdidas por sismo basada en curvas de fragilidad (HAZUS 1999).
  - Estudio de la metodología para generar curvas de fragilidad mediante un método analítico (Bonett 2003).
  - Implementación de la metodología para generar curvas de fragilidad analíticas mediante un programa en Matlab.

- Generación de curvas de fragilidad para las tipologías propuestas.
  - Verificación de las curvas de fragilidad analíticas con las generadas a partir de la opinión de expertos propuestas por Muñoz (2004).
  - Desarrollo de la metodología para estimar las pérdidas por sismo utilizando las curvas de fragilidad obtenidas. Adaptación de la metodología HAZUS (FEMA 1999).
- d) Aplicación de los procedimientos obtenidos a un edificio del campus PUCP de San Miguel.

#### 1.4. Resultados esperados

Con formato: Numeración y viñetas

En resumen, los resultados esperados son:

- a) Aceleración máxima del terreno, espectro de peligro uniforme asociado y señales sintéticas (acelerogramas) representativas para varios escenarios de sismos.
- b) Tipologías estructurales representativas de los edificios del campus.
- c) Metodología de evaluación visual rápida adaptada de Muñoz (2004).
- d) Curvas de fragilidad para las tipologías representativas de los edificios de la PUCP.
- e) Metodología de estimación de pérdidas basada en curvas de fragilidad.
- f) Estimación del riesgo sísmico de un edificio del campus de la PUCP mediante la metodología propuesta.

Con formato: Numeración y viñetas

#### 1.5. Avance realizado

Con formato: Numeración y viñetas

Este primer informe detalla el avance realizado hasta el momento y que comprende:

- a) Determinación de las aceleraciones máximas del terreno del campus para varios escenarios de sismos.
- b) Propuesta de la metodología de evaluación visual rápida desarrollada por Muñoz (2004).
- c) Desarrollo de la metodología analítica para generar curvas de fragilidad.

El capítulo 2 se ocupa del peligro sísmico del campus y el 3, de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de las edificaciones educativas.

En términos globales, el avance actual representa aproximadamente un 50% del trabajo total.



## 2. PELIGRO SÍSMICO DEL CAMPUS

La alta ocurrencia de eventos sísmicos en nuestro país evidencia la necesidad de cuantificar los efectos de los sismos en nuestras estructuras. Para cuantificar estos eventos sísmicos debe tenerse en cuenta la sismicidad del lugar y también la respuesta de las estructuras a dicha sismicidad

El peligro sísmico se puede cuantificar mediante el valor máximo de algún parámetro que representa el movimiento del terreno, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno. También es usual utilizar algún parámetro correspondiente a la respuesta estructural como es la pseudo-aceleración (parámetro que permite calcular los desplazamientos máximos en una estructura).

Para representar el peligro sísmico se pueden emplear dos enfoques, el determinista y el probabilista. El enfoque determinista cuantifica el peligro considerando el sismo más destructivo que pueda ocurrir en el lugar de análisis. El enfoque probabilista expresa la aceleración de diseño (parámetro que representa el movimiento del terreno) para diferentes niveles de probabilidad de excedencia.

### 2.1. Sismicidad regional y local

El campus PUCP está ubicado en la ciudad de Lima que se encuentra cerca al margen de la placa tectónica convergente activa entre las placas de Nazca al oeste y Sudamericana al este. Sus coordenadas geográficas son 12°07' Latitud Sur y 77°11' Longitud Oeste.

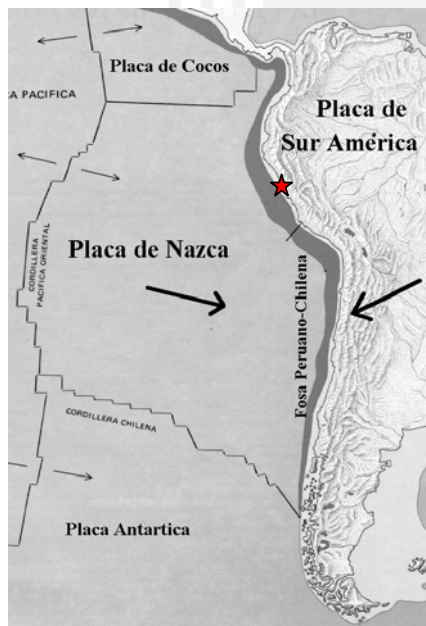


Figura 2.1. Ubicación del campus PUCP (Placas Tectónicas).

El proceso de subducción de la placa

de Nazca presenta tres zonas importantes de actividad tectónica: la zona de subducción de interfase poco profunda, la zona de subducción de intraplaca profunda y la zona de corteza continental de la placa Sudamericana (figura 2.2).

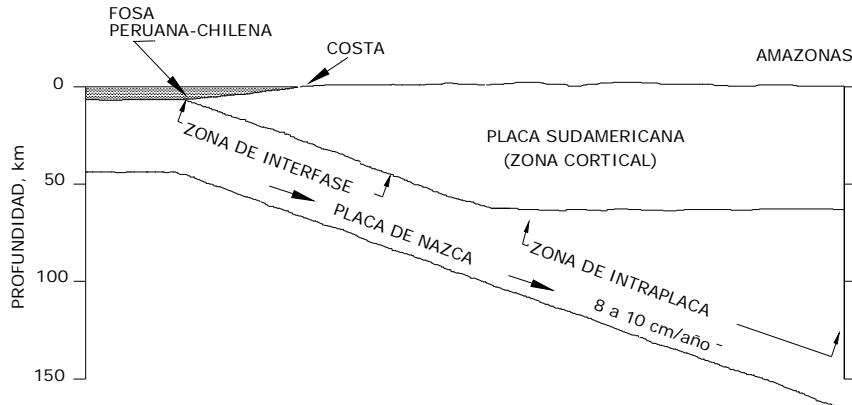


Figura 2.2. Sección transversal del proceso tectónico en la zona de subducción (Bariola 2001).

La sismicidad histórica en el Perú ha sido registrada desde la conquista y colonización de los españoles. Los investigadores que realizaron los aportes más importantes a la historia sísmica peruana fueron Silgado (1968, 1978, 1985), Dorbath et al. (1990) y Alva et al. (1984).

Los terremotos históricos más importantes que han ocurrido en Lima a lo largo de la historia se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Terremotos Históricos en Lima (Silgado 1985).

Fecha del Terremoto	Hora	Intensidad	Magnitud
9 de julio de 1586	7:00 p.m.	-	-
13 de noviembre de 1655	2:38 p.m.	-	-
20 de octubre de 1687	4:15 p.m.	-	-
28 de octubre de 1746	11:30 a.m.	X-XI MM	8.1 Ms
1 de diciembre de 1806	6:00 p.m.	-	-
30 de marzo de 1828	7:35 a.m.	-	-
24 de mayo de 1940	11:35 a.m.	VII-VIII MM	7.9 Ms
17 de octubre de 1966	4:14 p.m.	VIII MM	7.7 Ms
3 de octubre de 1974	9:21 a.m.	VII MM	7.9 Ms

## 2.2. Evaluación del Peligro Sísmico

En los últimos 30 años la aplicación de los conceptos de probabilidades en la ingeniería sísmica ha permitido que las incertidumbres en la magnitud, la ubicación, la variación del movimiento del suelo y en la respuesta estructural puedan ser explícitamente consideradas en la evaluación del peligro sísmico.

Un análisis probabilista del peligro sísmico se desarrolla mediante la representación adecuada de la actividad sísmica de la zona en estudio y la elección de alguna relación entre la amplitud del movimiento del suelo o de la respuesta estructural, alguna medida del sismo (magnitud o intensidad) y la distancia entre el foco y la distancia de interés.

Para relacionar la amplitud del movimiento, el tamaño del sismo y la distancia se pueden emplear leyes de atenuación. Las incertidumbres en la ocurrencia, ubicación y el nivel de respuesta sísmica esperada (movimiento del suelo o respuesta estructural) son consideradas mediante funciones de densidad de probabilidades.

### Aceleración pico en el Campus

Se ha estimado el peligro sísmico del campus, empleando la metodología propuesta por McGuire (1976) que se basa en el “teorema de probabilidad total”. Este teorema se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$P[A] = \int \int P[A | S, R] f_S(S) f_R(R) dS dR \quad (1)$$

$P[A]$  representa la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento  $A$ .  $S$  y  $R$  son variables continuas e independientes que influyen en  $A$ . Por tanto, la probabilidad de que el evento  $A$  ocurra puede calcularse integrando el producto de la probabilidad de  $A$  para determinados valores de  $S$  y de  $R$  y las probabilidades de ocurrencia de  $S$  y  $R$ .

Para la estimación de la aceleración máxima,  $P[A]$  representa la probabilidad de excedencia del valor de la aceleración máxima,  $A$ . El evento  $S$  representa la ocurrencia de un sismo de magnitud  $S$ . El evento  $R$  representa la ocurrencia del sismo de magnitud  $S$  a una distancia  $R$  del foco.

Para la evaluación del riesgo sísmico se han elegido tres escenarios de sismicidad representados por los niveles de peligro sísmico sugeridos por el SEAOC (1999): Sismo Ocasional (50% de excedencia en 50 años), Sismo Raro (10% de excedencia en 50 años) y Sismo Muy Raro (5% de excedencia en 50 años).

Estos niveles de sismicidad se pueden expresar también a través del período de retorno, mediante la siguiente expresión (Muñoz 1999):

$$P_{MÁX} [a > A] = 1 - e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (2)$$

Donde,

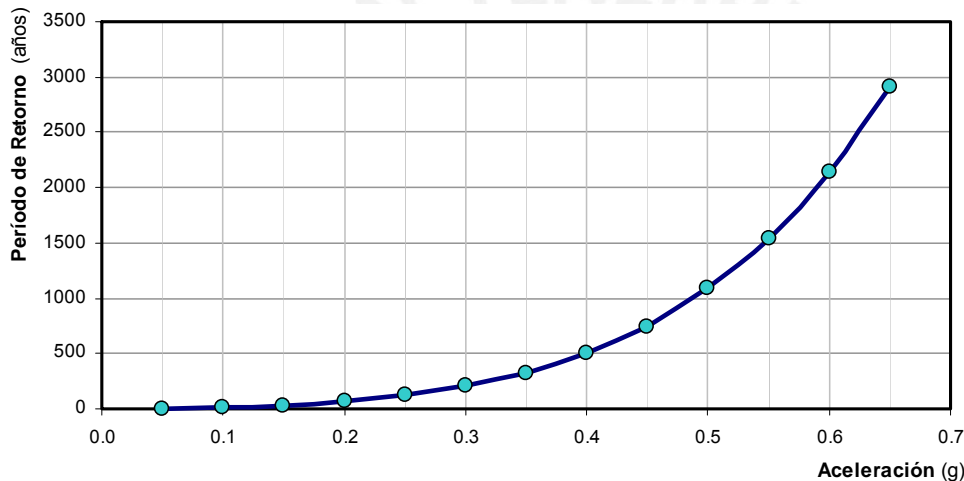
$P_{MÁX} [a > A]$ , es la probabilidad de superar un valor aceleración A.

t, es el tiempo de exposición (generalmente la vida útil de la edificación).

$T_R$ , es el período de retorno.

El peligro sísmico en el campus se estimó mediante el empleo del programa EQRisk (McGuire, 1976). Se tomaron como datos de entrada las coordenadas del campus, las fuentes sismogénicas sugeridas por Castillo y Alva (1993) y se empleó la ley de atenuación de Casaverde y Vargas (1980).

Además, se establecieron valores de recurrencia (inversa del período de retorno) para los cuales se estimó la aceleración pico asociada. Con estas aceleraciones se generó la curva período de retorno versus aceleración para el campus PUCP mostrada en la figura 2.2.



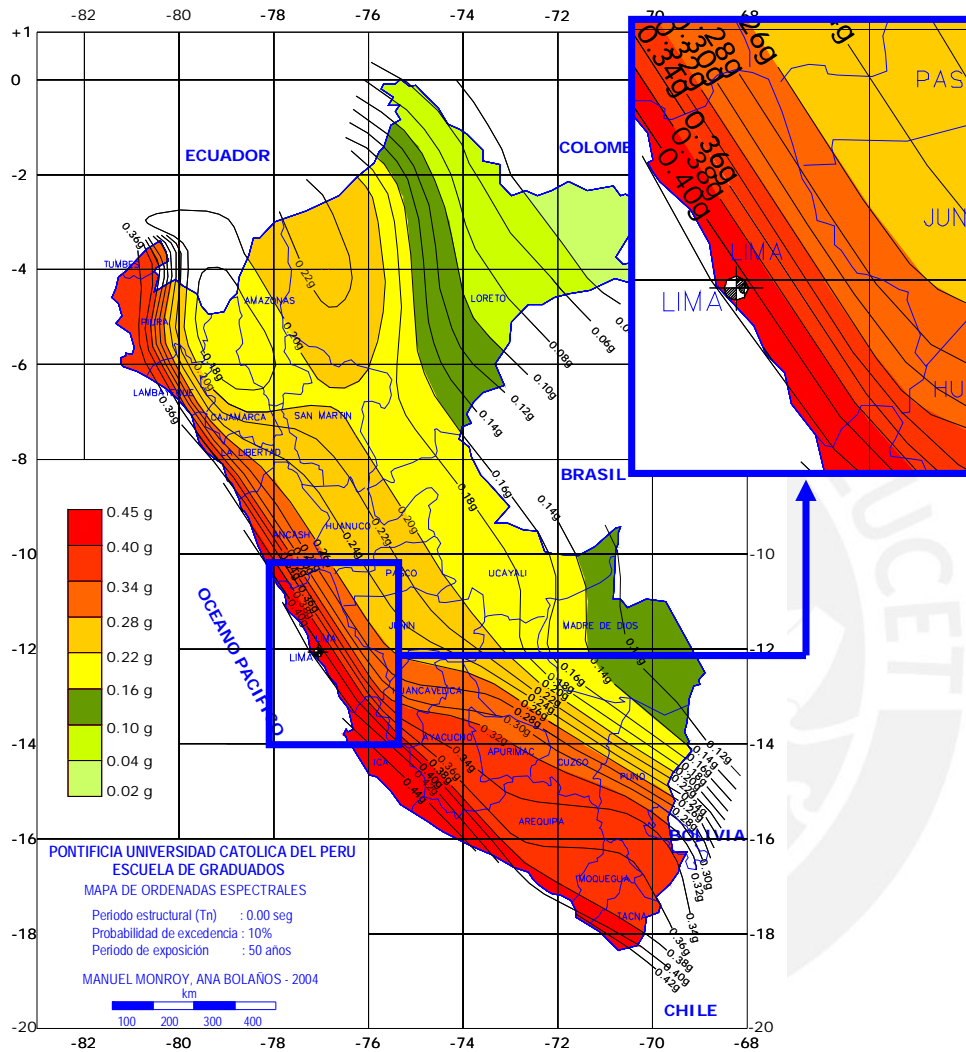
**Figura 2.2.** Curva período de retorno vs. aceleración asociada para las coordenadas del campus de la PUCP.

Los valores de aceleración pico para los tres niveles de sismicidad se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Aceleración pico asociada a los tres niveles de sismicidad seleccionados

Nivel de Peligro Sísmico		Aceleración Pico (g)	Período de Retorno (años)
Sismo Ocasional	(50% de excedencia / 50 años)	0,20	72
Sismo Raro	(10% de excedencia / 50 años)	0,40	475
Sismo Muy Raro	(5% de excedencia / 50 años)	0,50	975

Se puede comprobar que los resultados de la tabla anterior coinciden con las aceleraciones estimadas por el programa MRIESGO (Monroy y Bolaños 2004), como se observa en el mapa de distribución de aceleraciones mostrado en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Distribución de aceleraciones en el Perú para un periodo de exposición de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia (Monroy y Bolaños 2004).





## Señales Sintéticas

Parte del presente trabajo incluirá la generación de señales sintéticas compatibles con los espectros de diseño de la Norma Peruana. Estas señales abarcarán un determinado rango de aceleraciones máximas y serán generadas en forma aleatoria. Estas señales se usarán para estudiar la vulnerabilidad de los edificios mediante curvas de fragilidad.

## Resumen

El avance en cuanto al estudio de peligro sísmico del campus es de aproximadamente 70%. Se han determinado las aceleraciones máximas para varios escenarios de sismo y están pendientes la determinación de los espectros de peligro uniforme y las señales sintéticas para los escenarios de sismo elegidos.



### 3. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS

Como parte del presente trabajo se implementarán 2 metodologías. La primera metodología permitirá una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones educativas de una manera visual y rápida y ya está siendo desarrollada por Muñoz (2004). La segunda metodología permitirá estimar el riesgo sísmico, es decir, los costos de reposición de las edificaciones mediante el desarrollo de curvas de fragilidad. Esta última constituye la mayor parte del trabajo realizado en este proyecto.

#### 3.1. Evaluación visual rápida de la vulnerabilidad sísmica (Muñoz 2004)

##### Descripción del procedimiento

Este procedimiento forma parte del estudio realizado por Muñoz cuyo objetivo es reforzar la infraestructura educativa peruana. Requiere de la ejecución de encuestas de opinión a expertos en estructuras y en evaluación de daños producidos por sismos.

La evaluación visual de un edificio en particular, se lleva cabo mediante el llenado de un formulario. El resultado es la obtención de un puntaje estructural P, el cual toma en cuenta la tipología estructural del edificio y las características individuales que pueden ser observadas desde su exterior. El puntaje estructural P se relaciona con la probabilidad de que el edificio presente un nivel daño que amenace la vida de los ocupantes ante la ocurrencia de un sismo severo en la región en estudio. Mediante el puntaje P, se puede decidir qué edificios requieren una evaluación más detallada.

El procedimiento de evaluación visual rápida podrá ser aplicable en el Perú teniendo en cuenta las variaciones en los parámetros de entrada como son la tipología estructural, los puntajes estructurales básicos y los puntajes modificadores.

En la figura 3.1 se presenta la propuesta tentativa del formulario de evaluación.

##### Tipologías estructurales

La caracterización de las tipologías se realiza para poder agrupar un gran número de edificios con características similares y obtener un único modelo representativo. De esta manera analizando el modelo representativo se puede extrapolar los resultados para todo el grupo que representa.

Las tipologías de edificaciones educativas más importantes son :

- Pórticos de concreto armado rellenos con muros de albañilería
- Placas de concreto armado rellenos con muros de albañilería

- Mampostería de adobe
- Mampostería con bloques de concreto

A partir de las tipologías definidas, se calculan los puntajes básicos y los puntajes modificadores. Estos puntajes son obtenidos a partir de las encuestas realizadas a los expertos.

FORMATO DE EVALUACION VISUAL RAPIDA DE		DIRECCION:							
EDIFICACIONES POTENCIALMENTE SISMICAS PERUANAS		ZIP:							
		OTRAS CARACTERISTICAS							
		No PISOS:				AÑO CONSTR.:			
		EVALUADOR:				FECHA:			
		AREA TOTAL DE LA EDIFICACION.							
		NOMBRE DE LA EDIFICACION:							
		USO:							
USO		PUNTAJES ESTRUCTURALES BASICOS Y MODIFICADORES							
RESIDENCIAL	No PERSONAS	TIPOLOGIA	AD	AC	C1	C2	C3	M1	M2
COMERCIAL		PUNTAJE BASICO	?	?	?	?	?	?	?
OFICINA	0 - 10	ALTURA	?	?	?	?	?	?	?
INDUSTRIAL	11 - 100	COND. POBRE	?	?	?	?	?	?	?
PUBLICICO	100 +	IRREGULARIDAD VERTICAL	?	?	?	?	?	?	?
COLEGIO		PISO BLANDO	?	?	?	?	?	?	?
EDIF. GOBIERNO		DENSIDAD MUROS	?	?	?	?	?	?	?
SEKV. EMERG		IRREGULARIDAD EN PLANTA	?	?	?	?	?	?	?
EDIF. HISTOR.		CHOQUE	?	?	?	?	?	?	?
PELIGRO	<input type="checkbox"/>	COLUMNA CORTA	?	?	?	?	?	?	?
NO ESTRUCTURAL	<input type="checkbox"/>	NORMA ACTUAL	?	?	?	?	?	?	?
		SUELO BLANDO	?	?	?	?	?	?	?
		SUELO INTERMEDIO	?	?	?	?	?	?	?
		SUELO DURO	?	?	?	?	?	?	?
		PUNTAJE FINAL P							
COMENTARIOS								¿REQUIERE EVALUACION POSTERIOR?	
								SI NO	
AD	ADOBE								
AC	ACERO								
C1	PLACAS DE CONCRETO ARMADO								
C2	PORTICOS DE CONCRETO ARMADO								
C3	PORTICOS RELLENOS CON MUROS DE ALBAÑILERIA								
M1	MAMPOSTERIA SIN REFORZAR								
M2	MAMPOSTERIA REFORZADA								

Figura 3.1. Propuesta tentativa del Formulario de Evaluación Visual Rápida para las tipologías de edificaciones educativas peruanas (Muñoz 2004).

### 3.2. Estimación del riesgo sísmico mediante curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad son una herramienta probabilística que constituyen la base para la estimación del riesgo sísmico. Los métodos para generar estas curvas son diversos y entre ellos destacan los métodos experimentales, los métodos basados en opinión en expertos y los métodos analíticos.

#### Curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño

Con formato: Numeración y viñetas

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que la respuesta de una estructura exceda un determinado estado daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con tipologías estructurales similares o para una estructura en particular como por ejemplo, una estructura esencial. Las curvas de fragilidad son generadas analíticamente mediante análisis numéricos y utilizan la simulación Montecarlo para considerar la incertidumbre en los parámetros sísmicos y estructurales.

En la figura 3.2 se muestran las curvas de fragilidad obtenidas para un tipo de estructura en particular. Se observa que para un desplazamiento espectral  $D$  (parámetro que define la intensidad sísmica), la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo (colapso) será de 0,1/1,0 ó 10%. De igual manera 70 % para daño severo y 20 % para daño moderado.

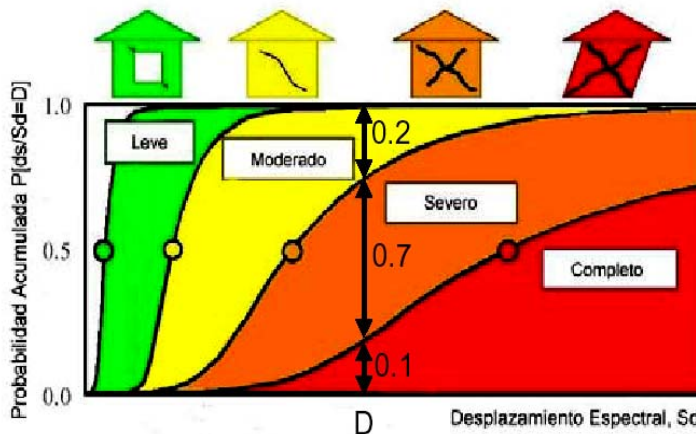


Figura 3.2. Ejemplo de curvas de fragilidad (Muñoz 2004).

Las matrices de probabilidad de daño son otra forma de relacionar (en forma discreta) la intensidad sísmica con los estados de daño. Estas matrices expresan la probabilidad de obtener un determinado nivel de daño para una estructura sujeta a un sismo con un nivel de severidad determinado (Braga et al 1986).

En la tabla 3.1 se muestra un ejemplo de matriz de probabilidad de daño para otro tipo estructura. Se observa que para un sismo de intensidad IX en la escala de Mercalli Modificada (MMI) se tiene una probabilidad de 3,0% de alcanzar daño ligero, 68,1% para daño moderado y 28,9% para daño pesado.

**Tabla 3.1.** Matriz de probabilidad de daño propuesta por el ATC-13 para una tipología (1985)

Estado de Daño	Rango Factor Daño (%)	Factor Central Daño (%)	Probabilidad de daño en porcentaje para c/IMM y estado de daño							
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1-Sin Daño	0	0,0	0,1							
2-Mínimo	0 - 1	0,5	27,0	2,2						
3-Ligero	1 - 10	5,0	72,9	89,3	32,2	3,0				
4-Moderado	10 - 30	20,0		8,5	66,9	68,1	19,9	3,9	0,1	
5-Pesado	30 - 60	45,0			0,9	28,9	74,2	57,8	12,4	
6-Mayor	60 - 100	80,0					5,9	38,3	84,3	
7-Destrucción	100	100,0								3,2

Los porcentajes de daños obtenidos son asociados posteriormente a pérdidas económicas a fin de realizar estimaciones del costo de reposición de la edificación.

### Curvas de fragilidad analíticas

Con formato: Numeración y viñetas

El método analítico para generar curvas de fragilidad se emplea en zonas donde no se dispone de información de daños producidos por sismos, ni de suficientes ensayos de laboratorio (Bonett 2003).

La metodología propuesta toma como datos a modelos estructurales que representan tipologías de edificaciones educativas y a las señales sintéticas (acelerogramas) que representan la acción sísmica. Los principales parámetros sísmicos y estructurales se definen como variables aleatorias para considerar las incertidumbres asociadas a cada uno de ellos. Se generan muestras de estas variables mediante el método de simulación Montecarlo. Se realiza el análisis no-lineal de cada uno de los modelos simulados para obtener la función de distribución de la deriva de entrepiso (parámetro utilizado para cuantificar el daño) y las correspondientes curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño. En la figura 3.3 se muestra el algoritmo para generar curvas de fragilidad. A continuación se explica cada uno de los bloques.



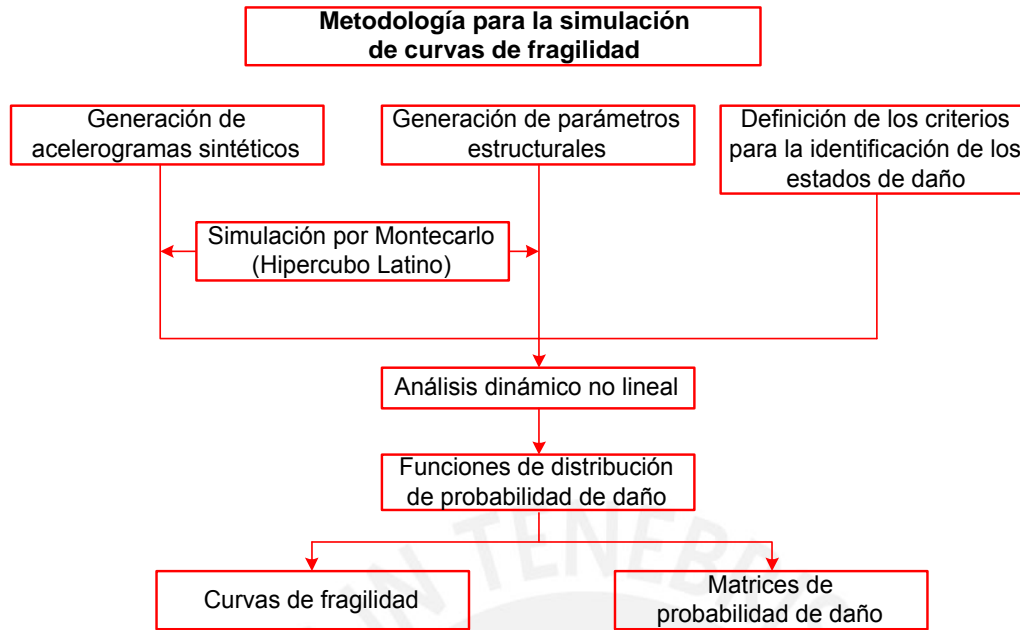


Figura 3.3. Metodología para la simulación de las curvas de fragilidad [\(Adaptado de Bonett 2003\)](#)

#### Definición de los estados de daño

El modelo de definición del daño se usa para representar el daño. Los estados de daño normalmente se clasifican como: sin daño, leve, moderado, severo y colapso. Debido a que los elementos estructurales y no estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, se propone en este método usar la deriva máxima de entrepiso  $\delta_{\text{máx}}$  como Parámetro Indicador del Daño Estructural (PID).

#### Generación de acelerogramas sintéticos

Para representar la acción sísmica en el análisis no lineal se utilizarán señales sintéticas. Las señales sintéticas son acelerogramas que son generados aleatoriamente a partir de las propiedades predominantes del sitio. Las señales generadas serán compatibles con el espectro de peligro uniforme desarrollado para el campus. Estas señales sintéticas se generan para un Parámetro Indicador de la Intensidad Sísmica (PIS). En este estudio, el PIS será la aceleración máxima del terreno (PGA) debido a que el peligro sísmico está definido en función de este parámetro en todo el territorio peruano.

#### Generación de parámetros estructurales

Los parámetros estructurales que afectan la capacidad de la estructura son la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ), el esfuerzo de fluencia del

acero de refuerzo ( $f_y$ ), la razón de amortiguamiento estructural ( $\beta$ ), las dimensiones físicas de los elementos y la cantidad de acero. Por ahora solo se cuenta con estudios estadísticos detallados de la resistencia de los materiales, lo cual no descarta que se investigue posteriormente la influencia de los demás parámetros.

En el caso del concreto se consideran las funciones de distribución de probabilidad para la resistencia última a la compresión  $f'_c$ , su deformación asociada  $\varepsilon'_c$  y su deformación última  $\varepsilon_{cu}$ . En cuanto al acero, se considera la incertidumbre en tres parámetros: el esfuerzo de fluencia  $f_y$ , el módulo de elasticidad  $E_s$  y el módulo de endurecimiento  $E_{sh}$ . Estos parámetros se definen como variables aleatorias con una distribución estadística normal (Figura 3.4-a) y en algunos casos log-normal (Figura 3.4-b). Estas funciones son típicas para variables continuas.

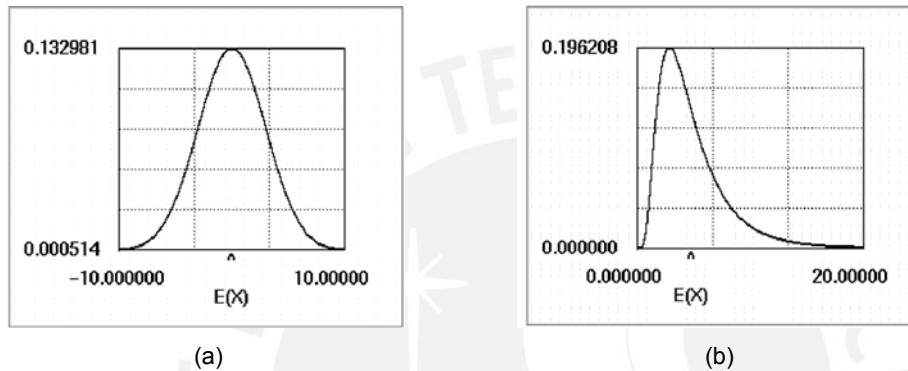


Figura 3.4. Distribución Normal (a) y Log-normal (b) típicas.

Los parámetros estadísticos serán recopilados a partir de la información proveniente de laboratorios de estructuras, de fábricas de concreto y acero y del Reglamento Nacional de Construcciones. La tabla 3.2 recopila los valores obtenidos para una tipología en particular.

Tabla 3.2. Valores estimados para algunos parámetros estructurales.

Variable	Distribución	Media	Desviación	Unidad
$f'_c$	Normal	24	3	MPa
$\varepsilon_c$	Normal	0,2	0,01	%
$f_y$	Log-normal	470	40	MPa
$E_s$	Normal	$2.14 \times 10^5$	$0.11 \times 10^5$	MPa
$E_{sh}$	Normal	3400	340	MPa

### Simulación Montecarlo

La simulación Montecarlo es un proceso estocástico, es decir, no determinista. Ha sido ampliamente reconocido como el más preciso para los cálculos que requieren el conocimiento de la función de distribución de probabilidad, fdp, de las respuestas de ciertos sistemas bajo ciertas excitaciones (Bonett 2003). Por medio de algoritmos adecuados se genera un conjunto de muestras de cada una de las variables que representan los parámetros sísmicos y estructurales. Los valores para cada parámetro se eligen aleatoriamente a partir de su histograma o función de distribución de probabilidad (figura 3.4).

Para obtener resultados confiables el método requiere de un gran número de ciclos de simulación, usualmente 100. Sin embargo, para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hipercubo Latino (Florian 1992).

### Análisis dinámico no-lineal

La selección del modelo estructural involucra la representación adecuada de la masa, resistencia y rigidez del edificio así como los parámetros de comportamiento inelástico. Debido a que los modelos tridimensionales requieren de un alto esfuerzo computacional se optará por modelos 2D con modificaciones que representen los efectos tridimensionales (torsión, piso blando). Los modelos simulados son sometidos a las señales sintéticas que representan el movimiento sísmico. El análisis de la respuesta de la estructura a estos registros considera la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo.

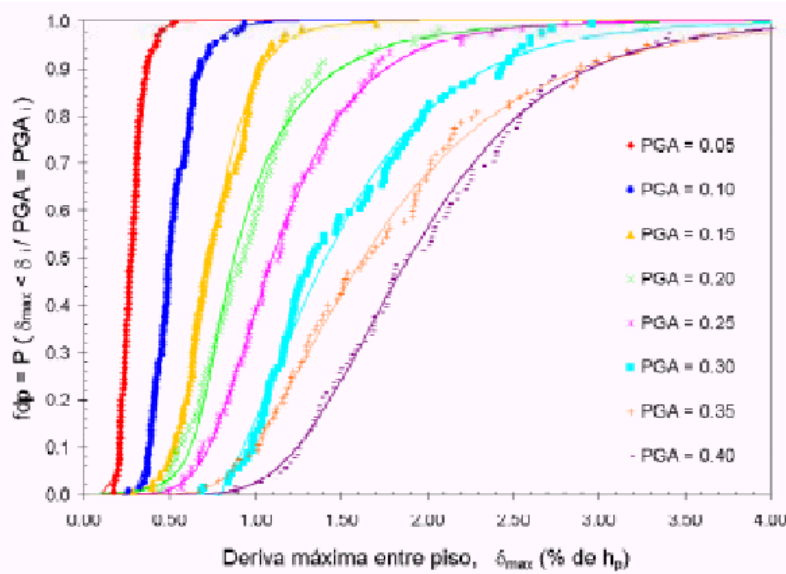
Para llevar a cabo esta tarea se están probando programas basados en elementos finitos como el DRAIN-2DX, RUAUMOKO y SAP2000.

### Funciones de distribución de probabilidad de daño

A partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación Montecarlo, se obtienen las curvas que representan las funciones de distribución de probabilidad del parámetro indicador del daño (PID) para cada nivel de intensidad sísmica ( $PIS_i$ ) tal como se muestra en la figura 3.5. Los puntos de estas curvas representan la probabilidad, fdp, que el PID no exceda un cierto valor para una determinada intensidad sísmica ( $PIS_i$ ), esto es:

$$fdp = P [PID \leq PID_i | PIS = PIS_j]$$

Las curvas son ajustadas mediante polinomios de tercer grado o la distribución lognormal.



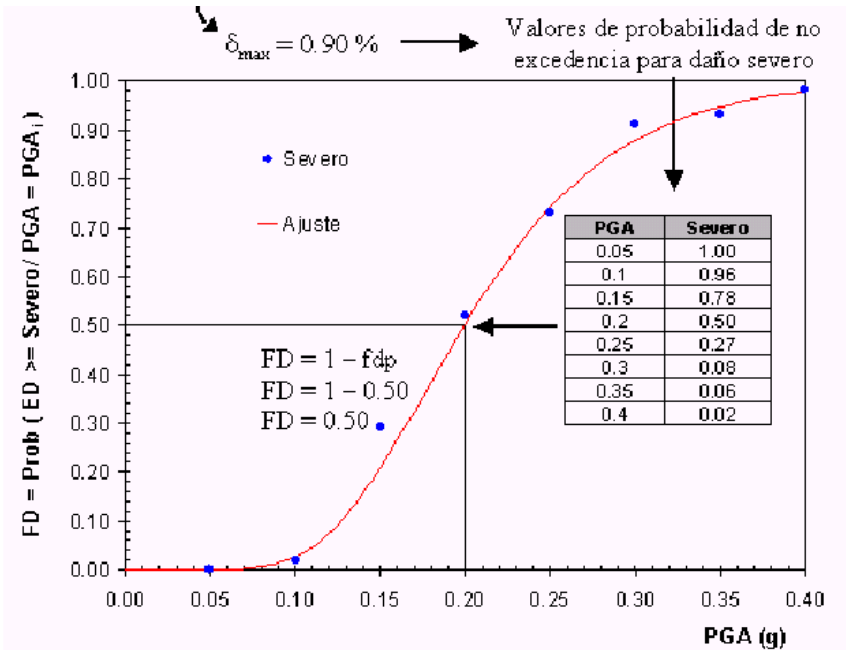
**Figura 3.5.** Funciones de distribución de probabilidad de no excedencia de una deriva entre piso. (Bonett 2003).

Curvas de fragilidad

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural  $f_{dp}$  (figura 3.5) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el parámetro indicador de la intensidad sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño determinado  $ED_i$ , ésto es:

$$FD = P [ED \geq ED_i | PIS = PIS_i]$$

La figura 3.6 muestra el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para un PGA de 0,20 g, y  $\delta_{m\acute{a}x} = 0,90$  % correspondiente al estado de daño severo, se tiene una  $f_{dp}$  de 0,48. La probabilidad de excedencia se obtiene como  $FD = 1 - f_{dp} = 1 - 0,48 = 0,52$ , que representa una probabilidad del 52 % de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno del 20% de g (aceleración de la gravedad). Los puntos así obtenidos se pueden también ajustar a los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o una distribución lognormal. Se aplica el mismo procedimiento para los demás estados de daño para finalmente obtener las curvas de fragilidad tal como las que se muestran en la figura 3.2.



**Figura 3.6.** Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad a partir de las fdp y de los umbrales de los estados discretos de daño. a) Para el umbral de daño severo ( $\delta_{max} = 0.9\%$ ) se leen las fdp's correspondientes a cada PGA. b)  $FD_i$  se obtiene como  $1 - fdp_i$  y se ajusta la curva de probabilidad a los puntos obtenidos. (Bonett 2003).

### Matrices de probabilidad de daño

Las matrices de probabilidad de daño se generan a partir de las funciones de distribución ajustadas para representar las curvas de fragilidad. Entonces las probabilidades asociadas a cada uno de los estados de daño se calculan usando la siguiente ecuación:

$$P(ED = ED_i / PIS_j) = P(ED \geq ED_i) - P(ED \geq ED_{i+1})$$

De esta manera se obtienen las matrices de probabilidad de daño asociadas a las curvas de fragilidad tal como la que se muestra en la tabla 2.

### Implementación de la metodología de generación de curvas de fragilidad

El proceso para generar las curvas de fragilidad se está sistematizando mediante un programa en Matlab. Este programa tiene la intención de ser de propósito general, es decir, que pueda aplicarse al estudio de cualquier tipología estructural.



### Curvas de fragilidad basadas en opinión de expertos (Muñoz 2004)

Este trabajo también forma parte del estudio realizado por Muñoz (2004). A continuación se describe en forma resumida el contenido de este trabajo.

El primer paso en esta metodología es definir los estados de daño y la variable que se utilizará para identificar el nivel de daño físico de las estructuras. La variable que define el nivel de daño físico de las estructuras es el Factor de Daño (FD) y se define con la siguiente relación.

$$\text{Factor de Daño (FD)} = \frac{\text{Pérdida en dolares}}{\text{Valor de reemplazo}}$$

Los estados de daño y sus rangos de aplicación que utiliza el reporte ATC-13 son los que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 3.3.** Estados de daño propuestos por el ATC-13.

ESTADO DE DAÑO (ED)	RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	FACTOR DE DAÑO CENTRAL (FDC)
NINGUNO	0	0
LIGERO	0-1	0.5
LEVE	1-10	5
MODERADO	10-30	20
SEVERO	30-60	45
MAYOR	60-100	80
DESTRUIDO	100	100

A los expertos se les entrega una encuesta para que estimen el nivel de daño físico de una estructura ante cierto nivel de intensidad del movimiento sísmico. En la metodología desarrollada se identifica diversas tipologías estructurales y por lo tanto se determina el nivel de daños de cada una de ellas. El resultado final es la obtención de matrices de probabilidad de daños para cada tipología estructural (ver ejemplo en tabla 3.1).

El procedimiento para obtener y procesar las opiniones de expertos se modela mediante el método Delphi. El método consiste en la formulación de cuestionarios, obtención de respuestas e iteración de los resultados varias veces (Muñoz 2004).

En el presente proyecto se pretende verificar las curvas de fragilidad analíticas con las generadas a partir de la opinión de expertos.

### Estimación de pérdidas por sismo

A partir del desarrollo de las curvas de fragilidad, FEMA desarrolló la metodología HAZUS (FEMA 1999). Esta metodología se basa fundamentalmente en los conceptos de curva de capacidad, punto de desempeño y curva de fragilidad. La ventaja de HAZUS es su posibilidad de estimar el daño ante un evento sísmico no solo en edificios, sino también en sistemas de transporte, sistemas de seguridad, etc. La principal desventaja del método es su complejidad. HAZUS es una herramienta completa y poderosa que necesita muchos datos para ser implementada.

Las curvas de fragilidad obtenidas por el método analítico y calibradas mediante la opinión de expertos serán implementadas en la metodología HAZUS para estimar el riesgo sísmico (pérdidas) de los edificios de la PUCP. El resultado del estudio de riesgo involucra el cálculo de costos de reposición. La metodología empleada relaciona costos con estados de daño mediante índices que serán estudiados y adaptados a nuestro entorno. El enfoque global de esta metodología conceptos se ilustra en la figura 3.7.

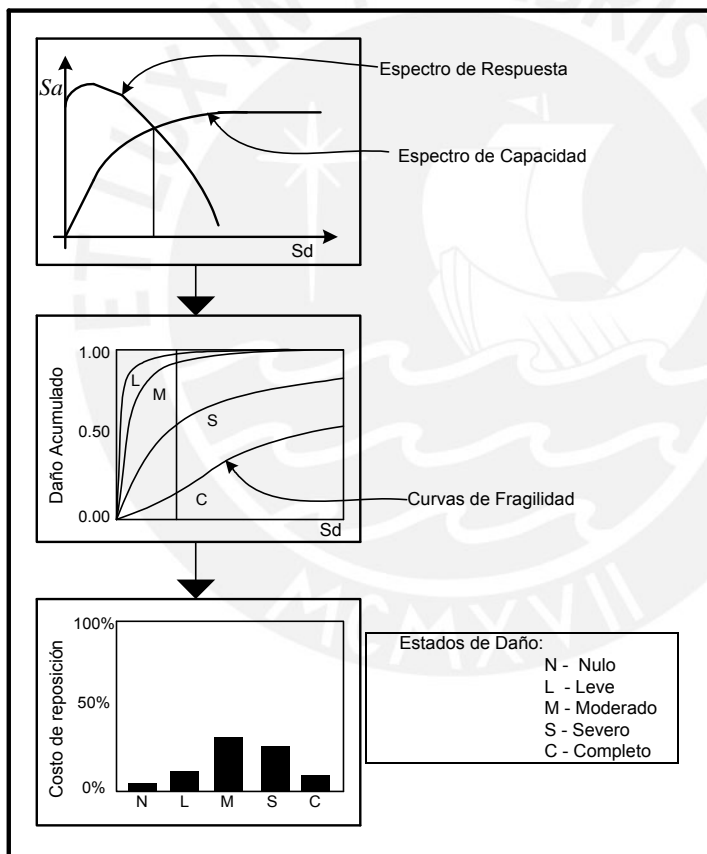


Figura 3.7. Metodología de estimación de pérdidas por sismo (Adaptado de HAZUS 1999).



## Resumen

El avance en cuanto al desarrollo de las metodologías de evaluación de vulnerabilidad y riesgo sísmico es aproximadamente 50%. Están pendientes la determinación de las tipologías estructurales representativas de los edificios de la PUCP, la generación de las curvas de fragilidad para las tipologías propuestas, el desarrollo detallado de la metodología de estimación de pérdidas usando las curvas de fragilidad y el ejemplo de aplicación a un edificio de la PUCP.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Applied Technology Council (ATC). 1985. "Earthquake Damage Evaluation data for California". ATC-13. Redwood City, California.
- Applied Technology Council (ATC). 2000. "Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook." ATC-21/FEMA 154. Washington, USA.
- Bonett, Ricardo. 2003. "Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Braga F., Dolce M., Liberatore D. 1986. "Assessment of the relationships between macroseismic intensity, type of building and damage, based on recent Italy earthquake data". Proceeding of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.
- Casaverde L. y Vargas J. 1980. "Zonificación Sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente, OEA y PUCP Lima, Perú.
- Castillo, J., Alva, J. 1993. "Peligro Sísmico en el Perú", VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, Perú.
- Cornell, C. A., and Vanmarcke, E. H. 1969. "The Major Influences on Seismic Risk, Proceedings". Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. I.
- Cornell, C. A., and Benjamin, J. R. 1970. "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers".
- FEMA. 1999. Federal Emergency Management Agency. "HAZUS 99 SR2: Earthquake Loss Estimation Methodology". Technical Manual. USA
- Florian, A. 1992. "An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling". Probabilistic Engineering Mechanics, 7, 123—130.
- Hong, H. P. y Lind, N. C. 1996. "Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results". Structural Safety, 18(4), 329—339.
- McGuire, R. 1976. "EQRISK. Evaluation of Sites for Earthquake Risk, Open File Report 79-97". USGS, EEUU.
- Monroy M., Bolaños L. 2004. "Espectros de peligro sísmico uniforme. Programa MRIESGO". Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil. PUCP.

Muñoz A. 1999. "Ingeniería Sismorresistente". Departamento de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Muñoz A., Blondet M. 2004. "Plan Nacional de Protección Sísmica de la Infraestructura Educativa del Perú". Proyecto de Investigación auspiciado por la DAI. Primer Informe. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Silgado M., Giesecke A. 1981. "Terremotos en el Perú". Lima: Ediciones Richkay Perú.

Structural Engineers Association of California (SEAOC). 1999. "Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book)". California: SEAOC.







## Nº A04-11 ESTIMACION DE PÉRDIDAS SÍSMICAS EN EDIFICACIONES EDUCATIVAS PERUANAS

Marcial Blondet<sup>1</sup>, Alejandro Muñoz<sup>1</sup>, José Velásquez<sup>1</sup> y Henry León<sup>1</sup>

1.- Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú

Av. Universitaria cuadra 18 s/n, San Miguel, Lima, Perú.

E-mails: mblondet@pucp.edu.pe, amunoz@pucp.edu.pe, jvelasquez@pucp.edu.pe, leon.h@pucp.edu.pe

### RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología probabilística para estimar pérdidas por sismo en edificios educativos peruanos. Se generan curvas de fragilidad (vulnerabilidad) para 2 tipos de edificios representativos de colegios y se estiman pérdidas en escenarios de peligro sísmico definidos. Las curvas de fragilidad se generan analíticamente mediante simulación considerando las incertidumbres en la demanda sísmica y en los parámetros estructurales. La metodología puede aplicarse masivamente a los colegios antiguos para estimar el monto de pérdidas ante un eventual sismo. Ésto permitirá también evaluar sistemas de refuerzo.

*Palabras Clave: Fragilidad, Vulnerabilidad, Riesgo, Colegios, Simulación, Pérdidas.*

### 1 METODOLOGÍA PARA GENERAR CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Las curvas de fragilidad se pueden generar mediante observaciones de campo, basándose en la opinión de expertos y utilizando métodos analíticos

(Bonett 2003). Cuando no se dispone de suficiente información de campo, las curvas de fragilidad pueden generarse analíticamente mediante simulación (Hwang y Huo 1994).

La figura 1.1 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La intensidad sísmica se ha definido por la aceleración pico del suelo. Se observa que para una aceleración de 0,30g, la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo será de 37%. El 35 % de edificios de este tipo sufrirían daño severo, el 20 % daño moderado y solo el 8% daño leve, ante la misma intensidad sísmica.

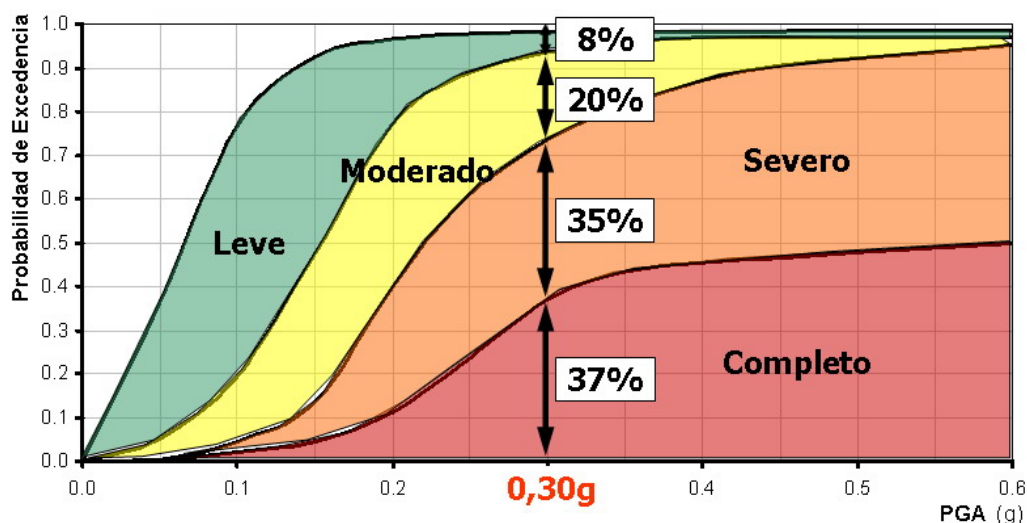
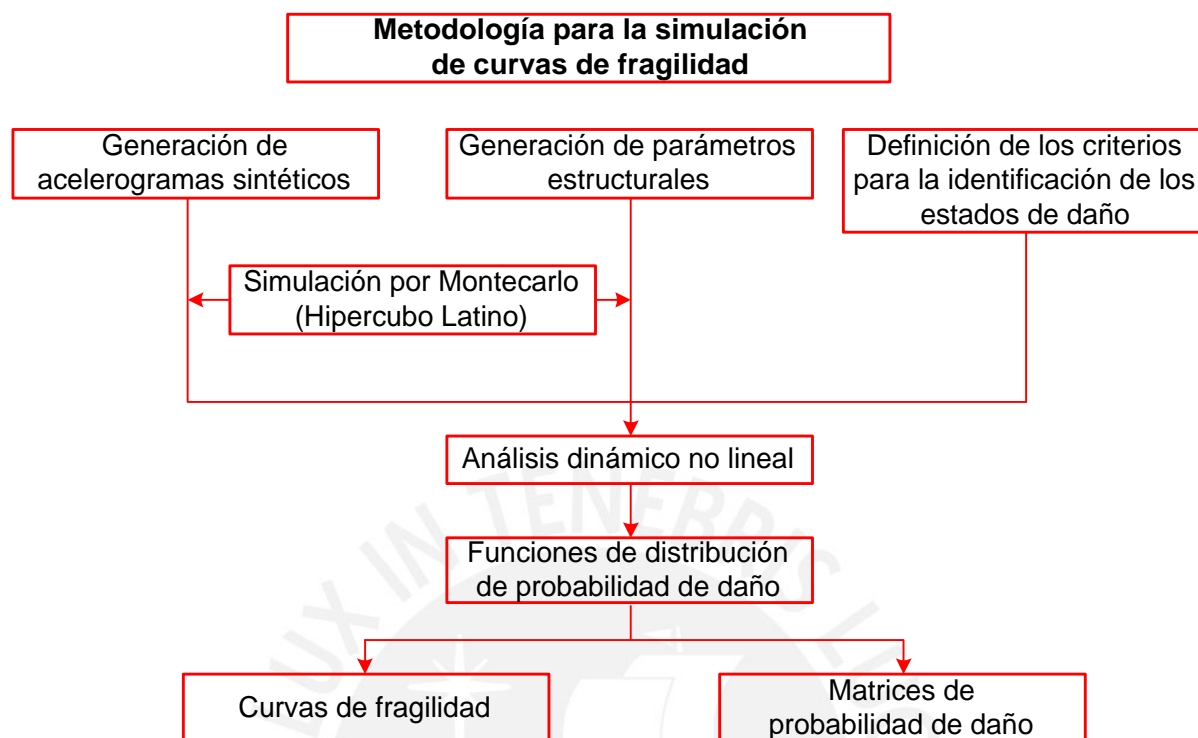


Fig. 1.1. Ejemplo de curvas de fragilidad

El procedimiento para generar curvas de fragilidad consiste en calcular la respuesta de un grupo significativo de estructuras ante diferentes niveles de demanda sísmica. Del procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado se obtienen las curvas de fragilidad. Para generar la muestra se toman en cuenta las variaciones en las propiedades estructurales, en la demanda sísmica y en los estados de daño representado por un parámetro indicador del daño (PID). Usando luego procedimientos de análisis dinámico no-lineal, se calcula la respuesta y se construyen funciones de distribución de probabilidad para el daño alcanzado. Finalmente, en base a estas funciones de logra representar la vulnerabilidad mediante curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño (figura 1.2).



**Fig. 1.2.** Metodología para generar analíticamente curvas de fragilidad (adaptado de Bonett 2003)

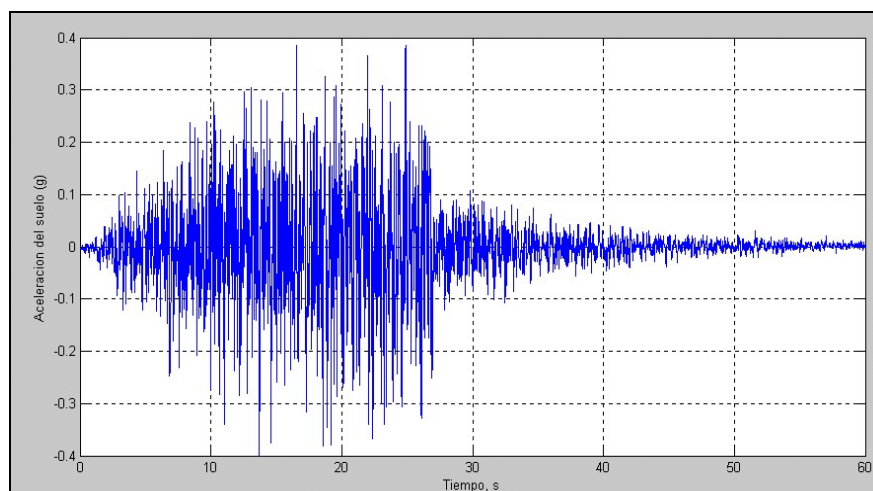
## 1.1 Variabilidad considerada

El método de Montecarlo es una técnica de simulación que permite estimar la respuesta de procesos estocásticos. A partir de funciones de distribución de probabilidad de las variables del proceso se pueden estimar las respuestas (Bonett 2003, Erberik y Elnashai 2004). Para estudiar la vulnerabilidad de edificios, se genera un conjunto de muestras de las variables que representan los parámetros sísmicos y estructurales. Los valores para cada parámetro se eligen en forma aleatoria a partir de su distribución de probabilidad. Para obtener resultados confiables se requiere de un gran número de ejecuciones. Para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hiper cubo Latino (Florian 1992). Esta técnica permite reducir la muestra a 100 modelos estructurales que representan razonablemente bien las incertidumbres en las variables sísmicas y estructurales.

### 1.1.1 Parámetros sísmicos

Para representar la acción sísmica en el análisis no-lineal se utilizan señales sintéticas (acelerogramas aleatorios). Se generan señales compatibles con el espectro de peligro uniforme del sitio. Estas señales sintéticas se generan para un Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS). El PIS utilizado es la aceleración máxima del suelo (PGA) debido a que el peligro sísmico está definido en función de este

parámetro en todo el territorio peruano. En la figura 1.3 se observa un acelerograma generado para un sitio con PGA de 0,4g compatible con el espectro elástico de diseño de la norma peruana.



**Fig. 1.3.** Acelerograma generado para un PGA de 0,4g compatible con el espectro de diseño peruano.

### 1.1.2 Parámetros estructurales

Los parámetros estructurales considerados fueron la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ). De acuerdo a datos experimentales el  $f_y$  se ajusta mejor a una distribución lognormal. Para el  $f_y$  de 4200kg-f/cm<sup>2</sup> se usa una media de 4800kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 6%. En el concreto, es típico utilizar la distribución normal y para un concreto con  $f'_c$  de 280 kg-f/cm<sup>2</sup> se adopta una media de 320 kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 15%.

### 1.1.3 Estados de Daño

Para estudiar el efecto de los sismos se utiliza el factor de daño que representa la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición (reemplazo total) del edificio. Los valores mostrados en la tabla 1.1. son los recomendados por Hwang y Lin (2002) y que han sido utilizados en esta metodología. Por ejemplo, a partir de esta tabla, podríamos afirmar que para reparar una estructura que ha sufrido daño moderado el costo de reparación equivale al 20% del costo de reposición.

Debido a que los elementos estructurales y no-estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, en este estudio se usa la deriva máxima de entrepiso,  $\delta_{m\acute{a}x}$ , como PID. A partir de la curva de capacidad de la estructura se definen los rangos de  $\delta_{m\acute{a}x}$  asociados con los estados de daño (SEAOC 1999).

**Tabla 1.1.** Estados de daño y factores de daño sugeridos por Hwang y Lin (2002)

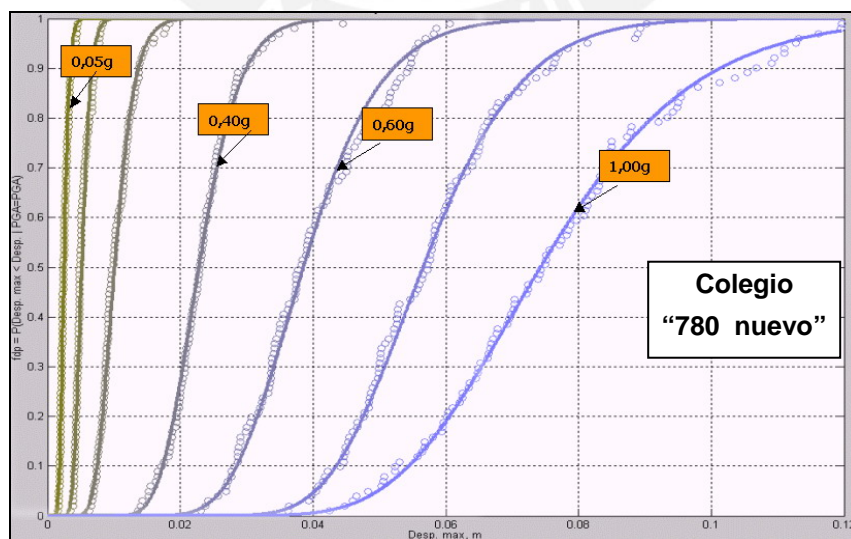
Estado de Daño	Factor de Daño
Sin Daño	0%
Leve	5%
Moderado	20%
Severo	65%
Completo	100%

### 1.2 Análisis Dinámico No-lineal

El modelo estructural considera elementos unidimensionales con rótulas concentradas por flexión y rótulas concentradas por corte, de tal manera que se toma en cuenta la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo. Los modelos simulados son sometidos a las señales sintéticas que representan el movimiento sísmico. Para realizar el análisis no-lineal se utiliza el programa DRAIN-2DX (Prakah et al. 1993).

### 1.3 Función de distribución de probabilidad del daño

A partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación, se obtienen las funciones de distribución de probabilidad del PID para cada nivel de intensidad sísmica (PIS). La figura 1.4. muestra un ejemplo para los desplazamientos laterales máximos de un colegio típico peruano. Estas curvas fueron ajustadas mediante polinomios cúbicos normales (Hong y Lind 1996).



**Fig. 1.4.** Función de distribución de probabilidad acumulada (fdp) de los desplazamientos laterales máximos para un modelo de colegio típico peruano.



### 1.4 Curvas de fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural (figura 1.4) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño ED<sub>i</sub> (Bonett 2003). Ésto es:

$$FD = P[ED \geq ED_i | PIS = PIS_i] \tag{1.1}$$

La figura 1.5 muestra el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para un PGA de 0,20 g, y  $\delta_{\max} = 0,90\%$  correspondiente al estado de daño severo, se tiene una fdp de 0,50. La probabilidad de excedencia se obtiene como  $FD = 1 - fdp = 1 - 0,50 = 0,50$ , que representa una probabilidad del 50% de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno de 0,20g. Los puntos así obtenidos se pueden también ajustar a los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o una distribución lognormal. Se aplica el mismo procedimiento para los demás estados de daño y se obtienen curvas como las mostradas en la figura 1.1.

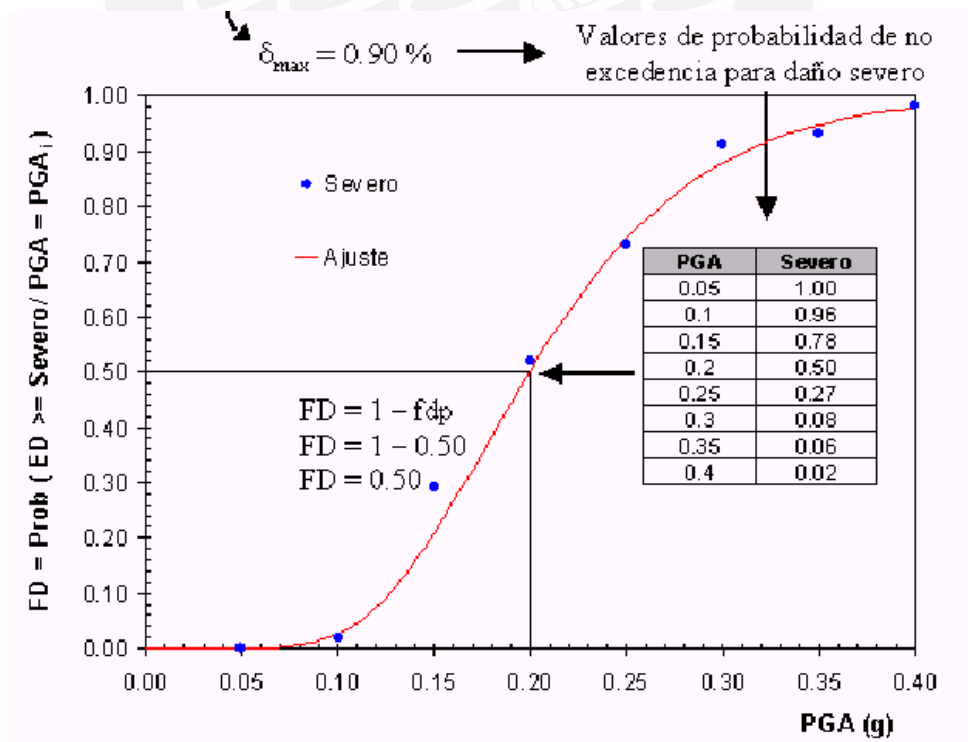


Figura 1.5. Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad (Bonett 2003).

## 2 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE 2 EDIFICIOS EDUCATIVOS PERUANOS

El proceso para generar las curvas de fragilidad se ha sistematizado mediante un programa desarrollado en MatLab (MathWorks 2002) denominado “Fragilidad”. Este programa tiene la intención de ser de propósito general, es decir, que pueda aplicarse al estudio de cualquier tipología estructural. En el futuro se pretende mejorar la interfase y habilitar más opciones para que pueda aplicarse en la estimación del riesgo sísmico de los edificios de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

El código ha sido desarrollado de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 1.2. Cada bloque representa un módulo del programa y puede documentarse, optimizarse y en general, mantenerse en forma independiente. El programa “Fragilidad” requiere de un archivo de entrada de datos donde se debe proporcionar información sobre el modelo estructural, parámetros sísmicos y estructurales, funciones de distribución de probabilidad, definición de los estados de daño y parámetros del proceso de simulación.

```

73 ! CENTRO DE MASA
74 $ 011      200
75 $ 011      300
76 ! *****
77 *SLAVING
78 $ 100      200      201      214
79 $ 100      300      301      314
80 ! *****
81 *MASSES
82 $ 100      28.6      200
83 $ 100      15.5      300
84 ! *****
85 *ELEMENTGROUP
86 ! *****
87 ! DEFINICION DE ELEMENTOS
88      2      0      0      0.0      COLUMNS Y VIGA
89 ! *****
90 ! DEFINICION DE ELEMENTOS TIPO 2
91      6      0      6
92 ! *****
93 ! DEFINICION DE RIGIDEZES
94 !
95      E      SHR      Ag      Ix      kii      kjj      kij
96      1 2200000.0  0.046  0.1438 3.961E-03  4.0  4.0  2.0
97      2 2200000.0  0.027  0.2850 1.560E-02  4.0  4.0  2.0
98      3 2200000.0  0.027  0.2250 1.520E-02  4.0  4.0  2.0
99      4 2200000.0  0.047  0.1375 3.466E-03  4.0  4.0  2.0
100     5 2200000.0  0.042  0.1375 3.466E-03  4.0  4.0  2.0
101     6 2200000.0  0.045  0.1750 7.146E-03  4.0  4.0  2.0
102 ! *****
103 ! DEFINICION DE DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA (NO CONSIDERA P-M)
104 !
105      My+      My-      Pt      Pc
106      1 1      12.80      12.80
107      2 1      31.75      31.75
108      3 1      24.02      24.02
109      4 1      11.50      11.50
110      5 1      12.03      12.03
111      6 1      15.85      20.61
112 ! *****
113 ! GENERACION DE ELEMENTOS
114      1      0101      0201      1      1      1      1
115      2      0102      0202      1      2      2      2
116      3      0103      0203      1      3      3      3
117      4      0104      0204      1      2      2      2
    
```

Figura 2.1. Archivo de entrada de datos para los programas DRAIN-2DX y “Fragilidad”.

Como aplicación de esta metodología se seleccionó 2 colegios típicos peruanos: un sistema aporticado relativamente antiguo que ha tenido pobre desempeño sísmico, “780 antiguo”, y un sistema de diseño más reciente cuyo excelente desempeño ha sido probado en el sismo de Arequipa del 2001, el “780 moderno”. La denominación “780” se debe a que ambos colegios tiene aulas de 7,80m de largo. Las curvas de fragilidad se muestran en la figura 2.2. Se puede observar claramente que el colegio “780 Moderno” tiene una mejora radical en su desempeño sísmico y por lo tanto baja probabilidad de daños severos para sismos moderados. Esto se debe al aumento en la exigencia de rigidez lateral impuesta por la norma sismorresistente de 1997 (SENCICO 1997).

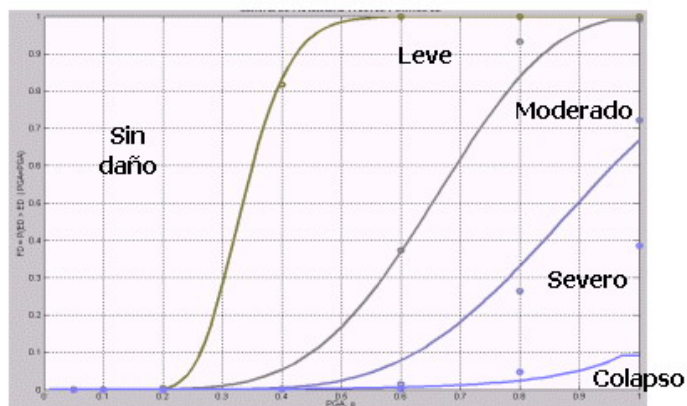
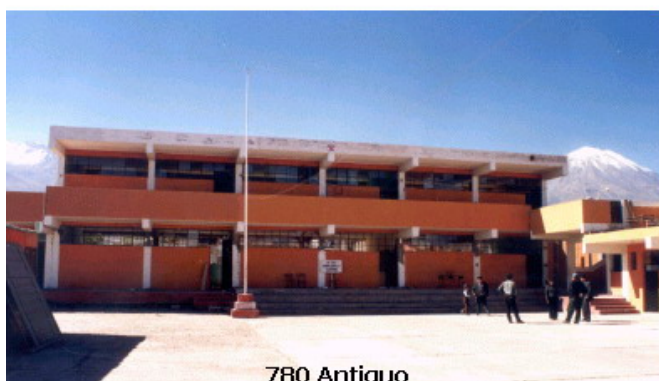


Figura 2.2. Curvas de fragilidad para los 2 colegios típicos peruanos.

### 3 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR SISMO EN EDIFICIOS EDUCATIVOS PERUANOS

Las curvas de fragilidad de estos colegios permiten calcular directamente los costos de reparación, escogiendo adecuadamente escenarios de intensidad sísmica. Cabe mencionar que no se toma en cuenta el daño producido en los elementos no-estructurales. El procedimiento consiste en determinar las probabilidades para los diversos estados de daño y los factores de daño (FD), que permiten calcular un Factor de Daño Medio, FDM (Hwang y Lin 2002). En la figura 3.1 se muestra la forma de obtener el

FDM para el colegio “780 antiguo” y para una intensidad sísmica representada por un PGA de 0,4g. A partir de esta tabla se puede afirmar que la estructura se daña, en promedio, un 43,75%.

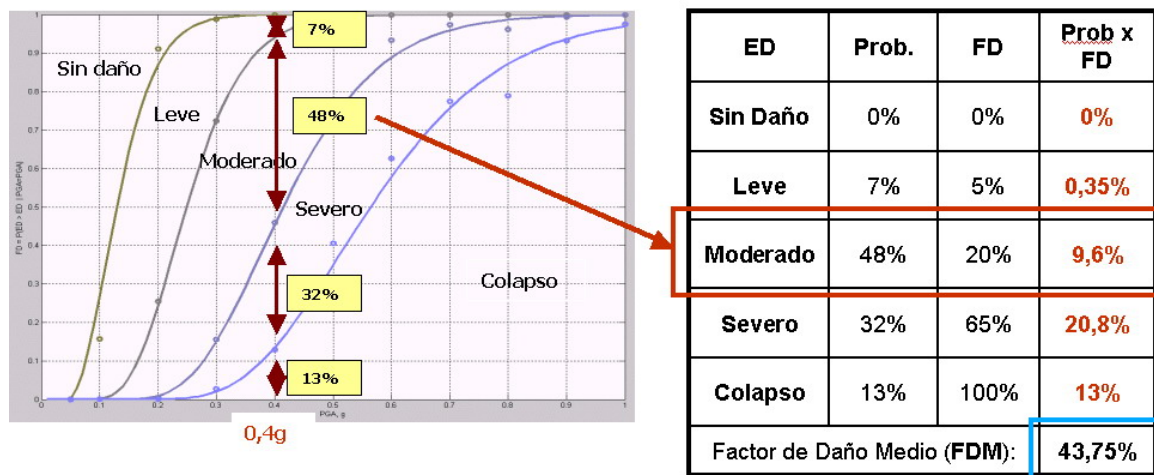


Figura 3.1. Determinación del Factor de Daño Medio a partir de las Curvas de Fragilidad.

Considerando un colegio tipo “780 antiguo” de 450m<sup>2</sup> de área construida y cuyo costo de reposición es de aproximadamente US\$250/m<sup>2</sup>, se estima un costo de reparación de su estructura ante un sismo de 0,40g de 43,75% x 450m<sup>2</sup> x US\$250/m<sup>2</sup> = US\$ 49219. En la tabla 3.1 se muestran los costos de reparación estimados para ambos colegios típicos y para 3 escenarios de intensidad sísmica.

Tabla 3.1. Costos de reparación estructural de los 2 colegios típicos peruanos

Intensidad Sísmica	Aceleración pico (g)	Costo de reparación (miles de US\$)	
		780 antiguo	780 moderno
Sismo Ocasional	0,20	9,3	0,0
Sismo Raro	0,40	49,2	5,5
Sismo Muy Raro	0,50	74,0	10,1

#### 4 CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que las curvas de fragilidad permiten estimar razonablemente bien las pérdidas por sismo, ya que toman en cuenta las incertidumbres tanto en la demanda sísmica como en la respuesta de la estructura. Debido a que se trata de una herramienta probabilística, su aplicación resultará más efectiva si se aplica masivamente a grupos de edificios de similares características estructurales.

Debido a que existe una cantidad importante de colegios diseñados con la norma previa al año 1997 (“780 antiguo”), esta metodología puede aplicarse para evaluar el riesgo sísmico (costos de reparación) de estas edificaciones ante diversos escenarios de sismos. También se pueden proponer algunos sistemas de refuerzo y evaluar su desempeño mediante sus curvas de fragilidad.



La metodología propuesta tiene muchas simplificaciones, pero puede mejorarse si se toman en cuenta otras variables particulares del sitio (acción sísmica) y de la estructura. En un trabajo futuro la metodología podría refinarse para generar curvas de fragilidad más consistentes. Las recomendaciones son: incluir sismos reales en vez de señales sintéticas, considerar la definición de los estados de daño como dependiente de los parámetros estructurales y utilizar como parámetro indicador de la intensidad sísmica al pseudo-desplazamiento o la pseudo-aceleración elástica de la estructura ya que son más representativos de la demanda sísmica.

## REFERENCIAS

- Bonett, Ricardo (2003). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Erberik, M., and Elnashai, A. (2004). Vulnerability Analysis of Flat Slab Structures. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Paper No. 3102. Vancouver, August, 2004.
- Florian, A. (1992). An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 7, 123—130.
- Hong, H. P., and Lind, N. C. (1996). Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results. *Structural Safety*, 18(4), 329—339.
- Hwang, H. H. M., and Huo, J-R (1994). Generation of Hazard-Consistent Fragility Curves for Seismic Loss Estimation Studies. *Technical Report NCEER-94-0015*.
- Hwang, H., and Lin, Y.W. (2002). Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings. *Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*.
- MathWorks Inc. (2002). MATLAB. The Language of Technical Computing.
- Prakah, V., Powel, G. H. y Campbell, S. (1993). DRAIN-2DX. University of California, Berkeley.
- Structural Engineers Association of California. SEAOC (1999). Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book). California.
- SENCICO 1997. Norma Técnica de Edificación NTE-.030. Diseño Sismorresistente. *Reglamento Nacional de Construcciones*. Comité Peruano Permanente de Diseño Sismorresistente. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.





## N° A04-11 ESTIMACION DE PÉRDIDAS SÍSMICAS EN EDIFICACIONES EDUCATIVAS PERUANAS

Marcial Blondet<sup>1</sup>, Alejandro Muñoz<sup>1</sup>, José Velásquez<sup>1</sup> y Henry León<sup>1</sup>

*1.- Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú*

*Av. Universitaria cuadra 18 s/n, San Miguel, Lima, Perú.*

*E-mails: mblondet@pucp.edu.pe, amunoz@pucp.edu.pe, jvelasquez@pucp.edu.pe, leon.h@pucp.edu.pe*

### RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología probabilística para estimar pérdidas por sismo en edificios educativos peruanos. Se generan curvas de fragilidad (vulnerabilidad) para 2 tipos de edificios representativos de colegios y se estiman pérdidas en escenarios de peligro sísmico definidos. Las curvas de fragilidad se generan analíticamente mediante simulación considerando las incertidumbres en la demanda sísmica y en los parámetros estructurales. La metodología puede aplicarse masivamente a los colegios antiguos para estimar el monto de pérdidas ante un eventual sismo. Ésto permitirá también evaluar sistemas de refuerzo.

*Palabras Clave: Fragilidad, Vulnerabilidad, Riesgo, Colegios, Simulación, Pérdidas.*

### 1 METODOLOGÍA PARA GENERAR CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica. Estas curvas sirven para estimar el riesgo sísmico de grupos de edificios con características estructurales similares o de una estructura esencial (puente, planta nuclear, aeropuerto, líneas vitales). Las curvas de fragilidad se pueden generar mediante observaciones de campo, basándose en la opinión de expertos y utilizando métodos analíticos

(Bonett 2003). Cuando no se dispone de suficiente información de campo, las curvas de fragilidad pueden generarse analíticamente mediante simulación (Hwang y Huo 1994).

La figura 1.1 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para un tipo de estructura. La intensidad sísmica se ha definido por la aceleración pico del suelo. Se observa que para una aceleración de 0,30g, la probabilidad de que esta edificación presente un daño completo será de 37%. El 35 % de edificios de este tipo sufrirían daño severo, el 20 % daño moderado y solo el 8% daño leve, ante la misma intensidad sísmica.

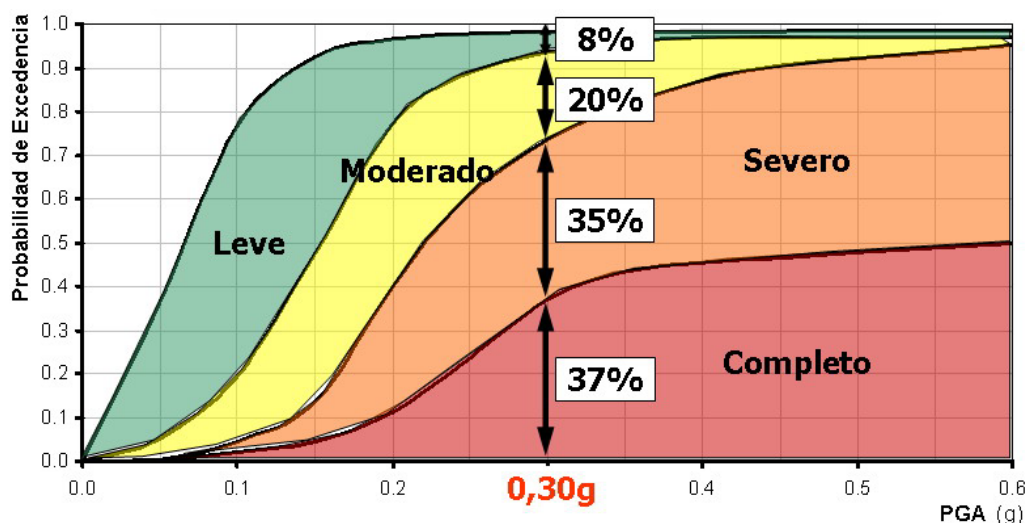


Fig. 1.1. Ejemplo de curvas de fragilidad

El procedimiento para generar curvas de fragilidad consiste en calcular la respuesta de un grupo significativo de estructuras ante diferentes niveles de demanda sísmica. Del procesamiento estadístico del nivel de daño encontrado se obtienen las curvas de fragilidad. Para generar la muestra se toman en cuenta las variaciones en las propiedades estructurales, en la demanda sísmica y en los estados de daño representado por un parámetro indicador del daño (PID). Usando luego procedimientos de análisis dinámico no-lineal, se calcula la respuesta y se construyen funciones de distribución de probabilidad para el daño alcanzado. Finalmente, en base a estas funciones de logro representa la vulnerabilidad mediante curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño (figura 1.2).

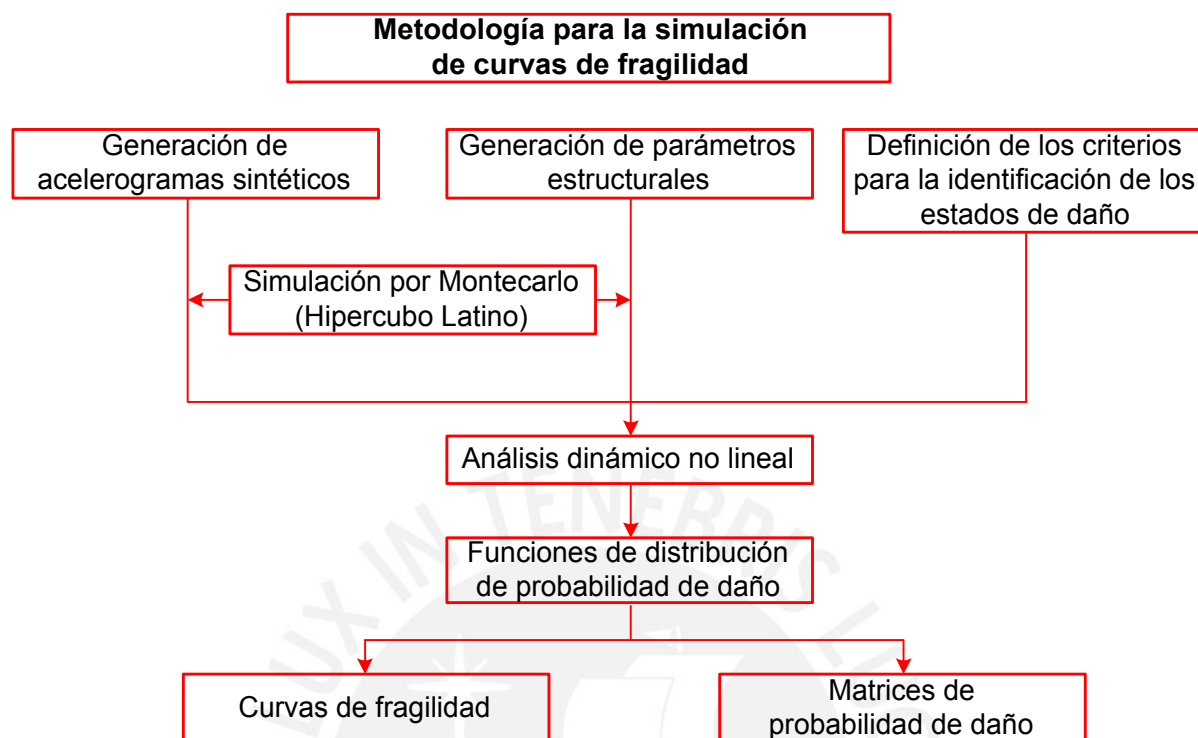


Fig. 1.2. Metodología para generar analíticamente curvas de fragilidad (adaptado de Bonett 2003)

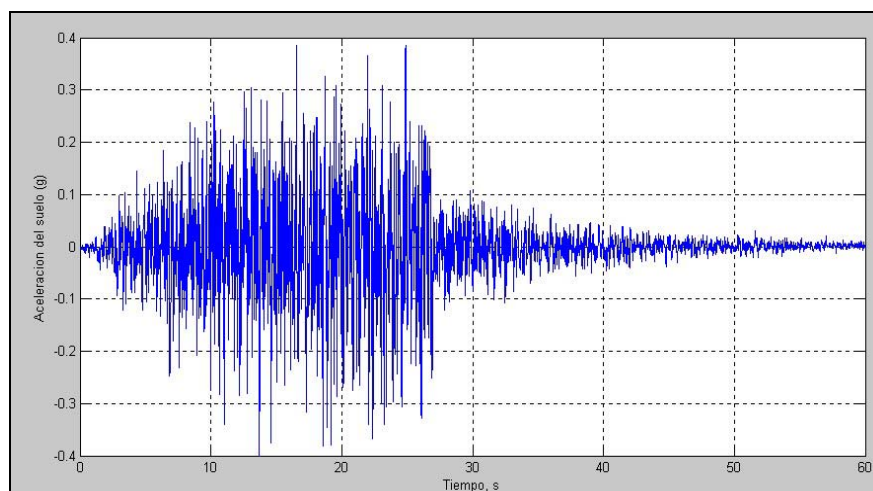
## 1.1 Variabilidad considerada

El método de Montecarlo es una técnica de simulación que permite estimar la respuesta de procesos estocásticos. A partir de funciones de distribución de probabilidad de las variables del proceso se pueden estimar las respuestas (Bonett 2003, Erberik y Elnashai 2004). Para estudiar la vulnerabilidad de edificios, se genera un conjunto de muestras de las variables que representan los parámetros sísmicos y estructurales. Los valores para cada parámetro se eligen en forma aleatoria a partir de su distribución de probabilidad. Para obtener resultados confiables se requiere de un gran número de ejecuciones. Para reducir el tamaño de la muestra se utiliza la técnica del Hiper cubo Latino (Florian 1992). Esta técnica permite reducir la muestra a 100 modelos estructurales que representan razonablemente bien las incertidumbres en las variables sísmicas y estructurales.

### 1.1.1 Parámetros sísmicos

Para representar la acción sísmica en el análisis no-lineal se utilizan señales sintéticas (acelerogramas aleatorios). Se generan señales compatibles con el espectro de peligro uniforme del sitio. Estas señales sintéticas se generan para un Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS). El PIS utilizado es la aceleración máxima del suelo (PGA) debido a que el peligro sísmico está definido en función de este

parámetro en todo el territorio peruano. En la figura 1.3 se observa un acelerograma generado para un sitio con PGA de 0,4g compatible con el espectro elástico de diseño de la norma peruana.



**Fig. 1.3.** Acelerograma generado para un PGA de 0,4g compatible con el espectro de diseño peruano.

### 1.1.2 Parámetros estructurales

Los parámetros estructurales considerados fueron la resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ) y el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $f_y$ ). De acuerdo a datos experimentales el  $f_y$  se ajusta mejor a una distribución lognormal. Para el  $f_y$  de 4200kg-f/cm<sup>2</sup> se usa una media de 4800kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 6%. En el concreto, es típico utilizar la distribución normal y para un concreto con  $f'_c$  de 280 kg-f/cm<sup>2</sup> se adopta una media de 320 kg-f/cm<sup>2</sup> y un coeficiente de variación del 15%.

### 1.1.3 Estados de Daño

Para estudiar el efecto de los sismos se utiliza el factor de daño que representa la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición (reemplazo total) del edificio. Los valores mostrados en la tabla 1.1. son los recomendados por Hwang y Lin (2002) y que han sido utilizados en esta metodología. Por ejemplo, a partir de esta tabla, podríamos afirmar que para reparar una estructura que ha sufrido daño moderado el costo de reparación equivale al 20% del costo de reposición.

Debido a que los elementos estructurales y no-estructurales son sensibles a los desplazamientos relativos de entrepiso, en este estudio se usa la deriva máxima de entrepiso,  $\delta_{m\acute{a}x}$ , como PID. A partir de la curva de capacidad de la estructura se definen los rangos de  $\delta_{m\acute{a}x}$  asociados con los estados de daño (SEAOC 1999).

Tabla 1.1. Estados de daño y factores de daño sugeridos por Hwang y Lin (2002)

Estado de Daño	Factor de Daño
Sin Daño	0%
Leve	5%
Moderado	20%
Severo	65%
Completo	100%

### 1.2 Análisis Dinámico No-lineal

El modelo estructural considera elementos unidimensionales con rótulas concentradas por flexión y rótulas concentradas por corte, de tal manera que se toma en cuenta la degradación de la rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos del sistema estructural a través del tiempo. Los modelos simulados son sometidos a las señales sintéticas que representan el movimiento sísmico. Para realizar el análisis no-lineal se utiliza el programa DRAIN-2DX (Prakah et al. 1993).

### 1.3 Función de distribución de probabilidad del daño

A partir de los resultados obtenidos del proceso de simulación, se obtienen las funciones de distribución de probabilidad del PID para cada nivel de intensidad sísmica (PIS). La figura 1.4. muestra un ejemplo para los desplazamientos laterales máximos de un colegio típico peruano. Estas curvas fueron ajustadas mediante polinomios cúbicos normales (Hong y Lind 1996).

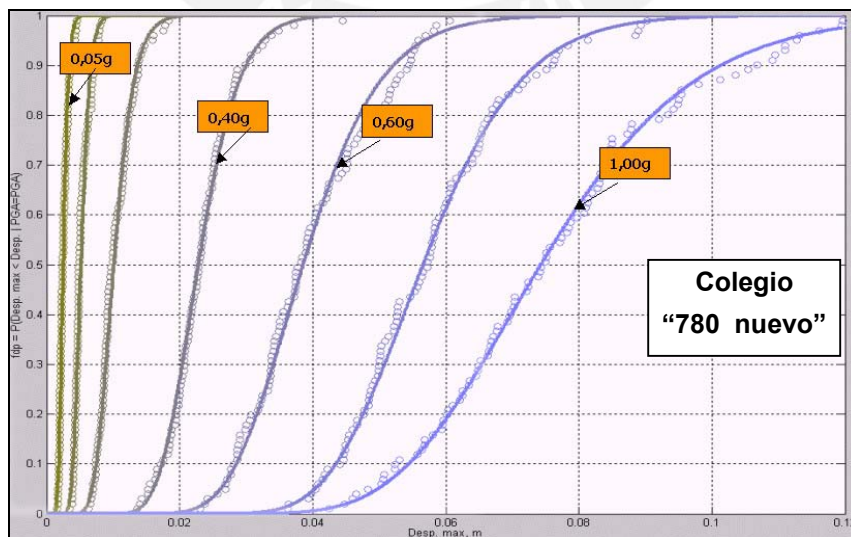


Fig. 1.4. Función de distribución de probabilidad acumulada (fdp) de los desplazamientos laterales máximos para un modelo de colegio típico peruano.



### 1.4 Curvas de fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño

Utilizando las funciones de distribución condicional del parámetro de respuesta estructural (figura 1.4) y los valores límites que definen los estados discretos de daño, se obtienen las curvas de fragilidad que relacionan el Parámetro indicador de la Intensidad Sísmica (PIS) con la probabilidad de excedencia (FD) de un estado de daño ED<sub>i</sub> (Bonett 2003). Ésto es:

$$FD = P[ED \geq ED_i | PIS = PIS_i] \tag{1.1}$$

La figura 1.5 muestra el procedimiento de obtención de una curva de fragilidad para el caso del estado de daño severo. Por ejemplo, para un PGA de 0,20 g, y  $\delta_{\max} = 0,90\%$  correspondiente al estado de daño severo, se tiene una fdp de 0,50. La probabilidad de excedencia se obtiene como  $FD = 1 - fdp = 1 - 0,50 = 0,50$ , que representa una probabilidad del 50% de alcanzar o exceder el nivel de daño severo para una aceleración máxima del terreno de 0,20g. Los puntos así obtenidos se pueden también ajustar a los polinomios normales propuestos por Hong y Lind (1996) o una distribución lognormal. Se aplica el mismo procedimiento para los demás estados de daño y se obtienen curvas como las mostradas en la figura 1.1.

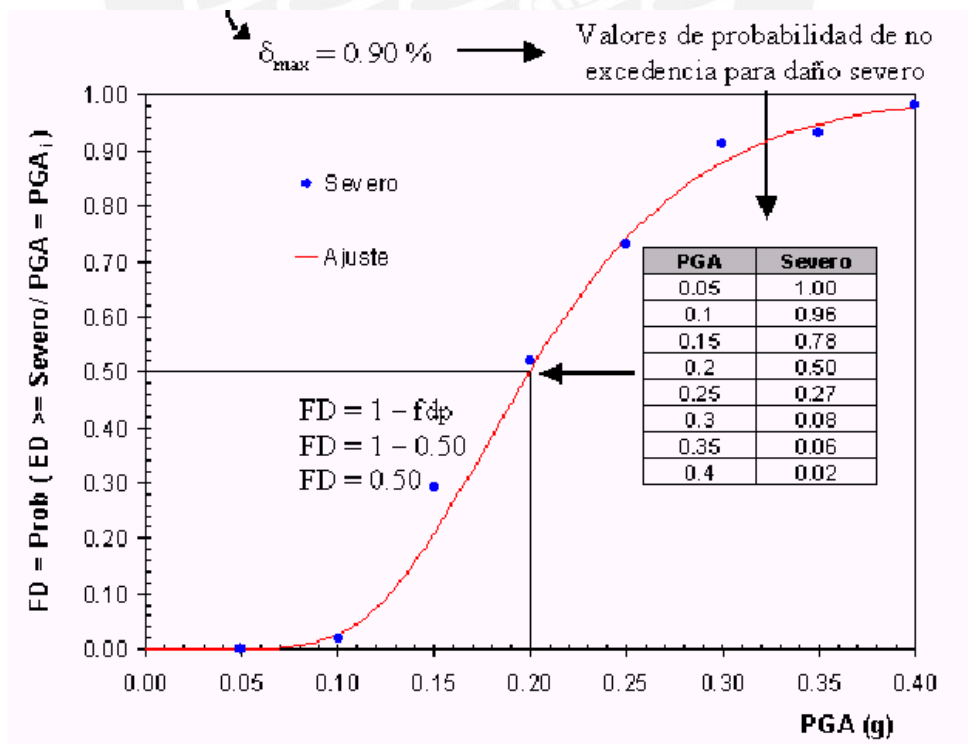


Figura 1.5. Procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad (Bonett 2003).

## 2 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE 2 EDIFICIOS EDUCATIVOS PERUANOS

El proceso para generar las curvas de fragilidad se ha sistematizado mediante un programa desarrollado en MatLab (MathWorks 2002) denominado “Fragilidad”. Este programa tiene la intención de ser de propósito general, es decir, que pueda aplicarse al estudio de cualquier tipología estructural. En el futuro se pretende mejorar la interfase y habilitar más opciones para que pueda aplicarse en la estimación del riesgo sísmico de los edificios de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

El código ha sido desarrollado de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 1.2. Cada bloque representa un módulo del programa y puede documentarse, optimizarse y en general, mantenerse en forma independiente. El programa “Fragilidad” requiere de un archivo de entrada de datos donde se debe proporcionar información sobre el modelo estructural, parámetros sísmicos y estructurales, funciones de distribución de probabilidad, definición de los estados de daño y parámetros del proceso de simulación.

```

73 ! CENTRO DE MASA
74 $ 011      200
75 $ 011      300
76 ! *****
77 *SLAVING
78 $ 100      200      201      214
79 $ 100      300      301      314
80 ! *****
81 *MASSES
82 $ 100      28.6      200                                2.650
83 $ 100      15.5      300                                2.650
84 ! *****
85 *ELEMENTGROUP
86 ! *****
87 ! DEFINICION DE ELEMENTOS
88      2      0      0      0.0                                COLUMNS Y VIGA
89 ! *****
90 ! DEFINICION DE ELEMENTOS TIPO 2
91      6      0      6
92 ! *****
93 ! DEFINICION DE RIGIDEZES
94 !
95      E      SHR      Ag      Ix      kii      kjj      kij
96      1 2200000.0  0.046  0.1438 3.961E-03  4.0  4.0  2.0
97      2 2200000.0  0.027  0.2850 1.560E-02  4.0  4.0  2.0
98      3 2200000.0  0.027  0.2250 1.520E-02  4.0  4.0  2.0
99      4 2200000.0  0.047  0.1375 3.466E-03  4.0  4.0  2.0
100     5 2200000.0  0.042  0.1375 3.466E-03  4.0  4.0  2.0
101     6 2200000.0  0.045  0.1750 7.146E-03  4.0  4.0  2.0
102 ! *****
103 ! DEFINICION DE DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA (NO CONSIDERA P-M)
104 !
105      My+      My-      Pt      Pc
106      1 1      12.80      12.80
107      2 1      31.75      31.75
108      3 1      24.02      24.02
109      4 1      11.50      11.50
110      5 1      12.03      12.03
111      6 1      15.85      20.61
112 ! *****
113 ! GENERACION DE ELEMENTOS
114      1      0101      0201      1      1      1      1
115      2      0102      0202      1      2      2      2
116      3      0103      0203      1      3      3      3
117      4      0104      0204      1      2      2      2

```

Figura 2.1. Archivo de entrada de datos para los programas DRAIN-2DX y “Fragilidad”.

Como aplicación de esta metodología se seleccionó 2 colegios típicos peruanos: un sistema aperticado relativamente antiguo que ha tenido pobre desempeño sísmico, “780 antiguo”, y un sistema de diseño más reciente cuyo excelente desempeño ha sido probado en el sismo de Arequipa del 2001, el “780 moderno”. La denominación “780” se debe a que ambos colegios tiene aulas de 7,80m de largo. Las curvas de fragilidad se muestran en la figura 2.2. Se puede observar claramente que el colegio “780 Moderno” tiene una mejora radical en su desempeño sísmico y por lo tanto baja probabilidad de daños severos para sismos moderados. Esto se debe al aumento en la exigencia de rigidez lateral impuesta por la norma sismorresistente de 1997 (SENCICO 1997).

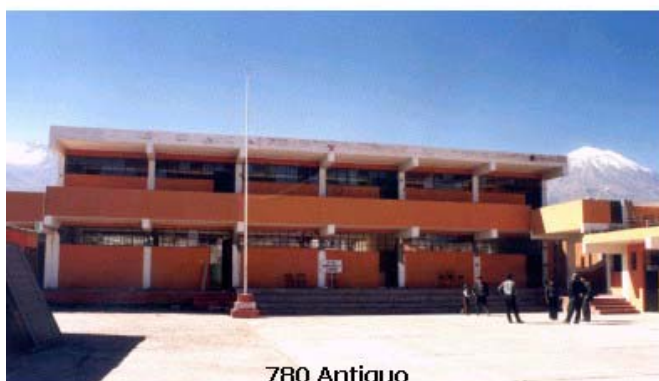


Figura 2.2. Curvas de fragilidad para los 2 colegios típicos peruanos.

### 3 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR SISMO EN EDIFICIOS EDUCATIVOS PERUANOS

Las curvas de fragilidad de estos colegios permiten calcular directamente los costos de reparación, escogiendo adecuadamente escenarios de intensidad sísmica. Cabe mencionar que no se toma en cuenta el daño producido en los elementos no-estructurales. El procedimiento consiste en determinar las probabilidades para los diversos estados de daño y los factores de daño (FD), que permiten calcular un Factor de Daño Medio, FDM (Hwang y Lin 2002). En la figura 3.1 se muestra la forma de obtener el

FDM para el colegio “780 antiguo” y para una intensidad sísmica representada por un PGA de 0,4g. A partir de esta tabla se puede afirmar que la estructura se daña, en promedio, un 43,75%.

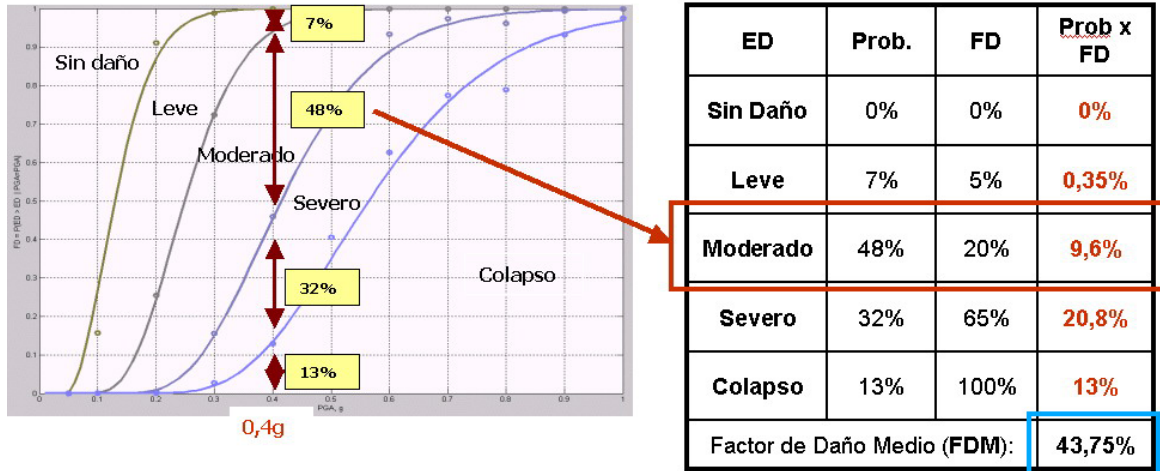


Figura 3.1. Determinación del Factor de Daño Medio a partir de las Curvas de Fragilidad.

Considerando un colegio tipo “780 antiguo” de 450m<sup>2</sup> de área construida y cuyo costo de reposición es de aproximadamente US\$250/m<sup>2</sup>, se estima un costo de reparación de su estructura ante un sismo de 0,40g de 43,75% x 450m<sup>2</sup> x US\$250/m<sup>2</sup> = US\$ 49219. En la tabla 3.1 se muestran los costos de reparación estimados para ambos colegios típicos y para 3 escenarios de intensidad sísmica.

Tabla 3.1. Costos de reparación estructural de los 2 colegios típicos peruanos

Intensidad Sísmica	Aceleración pico (g)	Costo de reparación (miles de US\$)	
		780 antiguo	780 moderno
Sismo Ocasional	0,20	9,3	0,0
Sismo Raro	0,40	49,2	5,5
Sismo Muy Raro	0,50	74,0	10,1

#### 4 CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que las curvas de fragilidad permiten estimar razonablemente bien las pérdidas por sismo, ya que toman en cuenta las incertidumbres tanto en la demanda sísmica como en la respuesta de la estructura. Debido a que se trata de una herramienta probabilística, su aplicación resultará más efectiva si se aplica masivamente a grupos de edificios de similares características estructurales.

Debido a que existe una cantidad importante de colegios diseñados con la norma previa al año 1997 (“780 antiguo”), esta metodología puede aplicarse para evaluar el riesgo sísmico (costos de reparación) de estas edificaciones ante diversos escenarios de sismos. También se pueden proponer algunos sistemas de refuerzo y evaluar su desempeño mediante sus curvas de fragilidad.



La metodología propuesta tiene muchas simplificaciones, pero puede mejorarse si se toman en cuenta otras variables particulares del sitio (acción sísmica) y de la estructura. En un trabajo futuro la metodología podría refinarse para generar curvas de fragilidad más consistentes. Las recomendaciones son: incluir sismos reales en vez de señales sintéticas, considerar la definición de los estados de daño como dependiente de los parámetros estructurales y utilizar como parámetro indicador de la intensidad sísmica al pseudo-desplazamiento o la pseudo-aceleración elástica de la estructura ya que son más representativos de la demanda sísmica.

## REFERENCIAS

- Bonett, Ricardo (2003). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Erberik, M., and Elnashai, A. (2004). Vulnerability Analysis of Flat Slab Structures. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Paper No. 3102. Vancouver, August, 2004.
- Florian, A. (1992). An efficient sampling scheme: Updated Latin Hypercube Sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 7, 123—130.
- Hong, H. P., and Lind, N. C. (1996). Approximate reliability analysis using normal polynomial and simulation results. *Structural Safety*, 18(4), 329—339.
- Hwang, H. H. M., and Huo, J-R (1994). Generation of Hazard-Consistent Fragility Curves for Seismic Loss Estimation Studies. *Technical Report NCEER-94-0015*.
- Hwang, H., and Lin, Y.W. (2002). Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings. *Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*.
- MathWorks Inc. (2002). MATLAB. The Language of Technical Computing.
- Prakah, V., Powel, G. H. y Campbell, S. (1993). DRAIN-2DX. University of California, Berkeley.
- Structural Engineers Association of California. SEAOC (1999). Recommended Lateral Forces Requirements and Commentary (the Blue Book). California.
- SENCICO 1997. Norma Técnica de Edificación NTE-.030. Diseño Sismorresistente. *Reglamento Nacional de Construcciones*. Comité Peruano Permanente de Diseño Sismorresistente. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.