



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**UN ENFOQUE INTEGRAL PARA LA
EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

José Mauricio Alcaráz Barranco

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN MANUEL MAYORAL VILLA



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Gracias a mis padres que me han llevado a ser lo que soy, este logro es nuestro, los amo.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme formado como Ingeniero Civil con ética, aptitudes y hábitos que aplicare día a día en mi vida profesional, poniendo en alto el nombre de esta gran institución.

Gracias al Instituto de Ingeniería de la UNAM, en especial al Dr. Juan Manuel Mayoral Villa porque sin sus enseñanzas y consejos no hubiera sido posible realizar este trabajo, por haber dejado en mí hábitos que me harán destacar en mi vida profesional.

Gracias a Karla por su apoyo incondicional.

Gracias a mis amigos del instituto de ingeniería: Adri, Isma, Dany, Luis, Simón y Alan, por el apoyo y por el tiempo que compartimos dentro y fuera de la universidad.

Gracias a mi compañero de trabajo el Ingeniero Ernesto, por sus consejos y conocimientos transmitidos.



ÍNDICE	i
RESUMEN.....	iii
OBJETIVOS	v
ALCANCES	v
INTRODUCCIÓN.....	1
1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 Origen de los sismos	3
1.2 Epicentro.....	5
1.3 Ondas sísmicas	6
1.3.1 Ondas sísmicas longitudinales.....	7
1.3.2 Ondas sísmicas transversales	8
1.3.3 Ondas sísmicas superficiales	8
1.4 Movimiento del terreno.....	11
1.5 Magnitud del sismo.....	12
1.5.1 Escalas relativas.....	12
1.5.2 Escalas absolutas	13
1.5.3 Sismos de magnitudes considerables.....	14
1.6 Propiedades dinámicas y parámetros geotécnicos del suelo.....	24
1.7 Espectros de respuesta.....	28
1.8 Principales zonas sísmicas que afectan a la Ciudad de México	30
1.9 Zonificación de la Ciudad de México de acuerdo al tipo de suelo	31
1.9.1 Zonificación sísmica de la Ciudad de México.....	32
1.9.2 Riesgo sísmico de la Ciudad de México.....	34
2 RESILIENCIA.....	35
2.1 ¿Por qué hablar de ciudades resilientes?.....	35
2.2 Aspectos fundamentales que deben de caracterizar a una ciudad resiliente.....	37
2.3 Factores de riesgo en el entorno urbano.....	40
2.3.1 ¿Qué es una ciudad resiliente?.....	40
3 MARCO METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA.....	42
3.1 Definición de la zona de estudio	42
3.2 Identificación de la infraestructura crítica	42
3.3 Selección de las curvas de fragilidad específicas	43
3.4 Generación de una red simplificada.....	44
3.5 Calculo del riesgo sísmico	44
3.5.1 Ambiente sísmico	45



3.5.2	Identificación de las fuentes sismo génicas	47
3.5.3	Caracterización de los modelos de recurrencia	48
3.5.4	Definición de la relación de atenuación.....	51
3.5.5	Definición de las zonas geotécnicas que se ven involucradas en el estudio	52
3.5.6	Espectros de peligro uniforme (EPU).....	52
3.5.7	Análisis de respuesta de sitio	56
3.5.8	Evaluación de la probabilidad de falla.....	59
3.5.9	Evaluación de la resiliencia	59
4	CASO ESTUDIO: ANALISIS DE LA RESILIENCIA SISMICA EN UNA ZONA DENSAMENTE POBLADA AL SUR DE LA CIUDAD DE MEXICO.....	61
4.1	<i>Definición de la zona de estudio</i>	<i>61</i>
4.2	<i>Identificación de la infraestructura critica</i>	<i>64</i>
4.3	<i>Curvas de fragilidad</i>	<i>66</i>
4.3.1	<i>Curvas de fragilidad específicas para la ciudad de México</i>	<i>74</i>
4.4	<i>Red simplificada.....</i>	<i>74</i>
4.5	<i>Calculo del riesgo sísmico</i>	<i>75</i>
4.5.1	Identificación de las fuentes sismogénicas	77
4.5.2	Caracterización de los modelos de recurrencia.....	79
4.5.3	Definición de la relación de atenuación.....	80
4.5.4	Espectros de peligro uniforme	81
4.5.5	Análisis de respuesta de sitio	84
5	EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA	90
6	EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA.....	95
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
	REFERENCIAS	103



RESUMEN

El objetivo de esta investigación es examinar la capacidad de resiliencia de la infraestructura estratégica en ciudades densamente pobladas y ubicadas en regiones propensas a sufrir terremotos. Al comenzar con la investigación se eligió como caso estudio un área estratégica al sur de la Ciudad de México, se realizó un levantamiento de infraestructura importante vulnerable ante eventos sísmicos, se obtuvieron perfiles estratigráficos de las diferentes zonas sismogenicas existentes en el área de estudio según el RCDF, la amenaza sísmica asociada a eventos extremos se caracterizó a través de espectros de peligro uniforme obtenidos en afloramientos de roca cercana a la zona de estudio, estos espectros de peligro uniforme corresponden a las dos zonas sísmicas de mayor influencia para la Ciudad de México (normal y subducción) se tomaron en cuenta periodos de retorno de 125,250,475 y 2475 años.

Se realizaron análisis probabilísticos de respuesta de sitio utilizando los espectros de peligro uniforme como movimiento de entrada, estos análisis se llevaron a cabo mediante el programa RADSH, este tipo de análisis considera los movimientos sísmicos como fenómenos aleatorios, suponiéndolos como un proceso gaussiano con media cero, con lo que el fenómeno aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia, físicamente, tal definición del ambiente sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas (Romo, 1976).

Posteriormente se definieron curvas de fragilidad y funciones de recuperación apropiadas para cada tipo de infraestructura existente en el área de estudio. Con los espectros de respuesta obtenidos mediante el análisis probabilístico de respuesta de sitio, con las curvas de fragilidad y funciones de recuperación anteriormente seleccionadas, se llevó a cabo la metodología propuesta en esta investigación, evaluando distintos aspectos: pérdida de conectividad en la red de transporte, daños estructurales en hospitales, en inmuebles importantes, afectaciones en túneles, puentes, pasos a desnivel, puntos de alta demanda y en sistemas de transporte (metro, tren ligero y metrobús).



Se aplicó un modelo colapso/bloqueo sencillo, para tomar en cuenta la posibilidad de que escombros procedentes del colapso de un edificio pudieran bloquear algunos caminos, el análisis de la red de transporte se realiza, inicialmente considerando solo la función de rescate inmediatamente después del terremoto, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la conectividad de la misma. Finalmente con ayuda de las funciones de recuperación se estima el tiempo que tardara el sistema en retomar su funcionalidad después del terremoto.



OBJETIVOS

Evaluar la resiliencia sísmica en una zona estratégica, densamente poblada y propensa a sufrir terremotos, ubicada al sur de la Ciudad de México, aplicando una metodología novedosa, caracterizando el ambiente sísmico a través de un análisis de riesgo sísmico probabilístico, planteado por Mayoral (2013) y considerando las dos zonas sísmicas de mayor influencia para la Ciudad de México (normal y subducción). Con los resultados obtenidos en esta investigación se propondrán estrategias que ayuden a estar mejor preparados ante la ocurrencia de un evento sísmico, con la finalidad de evitar pérdidas humanas y materiales, lo cual ayudará a mejorar la resiliencia de la zona de estudio

ALCANCES

Se presenta un planteamiento de la metodología para evaluar la resiliencia sísmica, se desarrolla y aplica el método a un caso estudio ubicado en una zona densamente poblada y propensa a sufrir terremotos, al sur de la Ciudad de México.

Se calcula la aceleración máxima del terreno mediante un análisis de respuesta de sitio probabilista, basado en el programa RADSH, con los espectros de respuesta de este análisis se relacionan las aceleraciones máximas del terreno (PGA) con la probabilidad de falla de cada tipo de infraestructura existente en la zona de estudio, esta correlación se hace mediante las curvas de fragilidad apropiadas para cada tipo de infraestructura, dichas curvas relacionan la aceleración máxima del terreno con la probabilidad de exceder o alcanzar un estado de falla el cual puede ser (mínimo, moderado, severo o completo), lo cual da como resultado la evaluación de la probabilidad de falla, parámetro de suma importancia al momento de estimar la resiliencia sísmica en el área de estudio.



INTRODUCCIÓN

La evaluación de la resiliencia sísmica en ciudades densamente pobladas, ubicadas en zonas propensas a sufrir terremotos, es fundamental para establecer programas de actuación ante eventos catastróficos con la finalidad principal de salvar vidas. La resiliencia se puede definir como "La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos adversos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas" (UNISDR,2013). Este concepto ha tenido una gran influencia en el desarrollo de nuevas ciudades, las cuales pretenden estar mejor preparadas ante eventos de magnitudes considerables, ejemplos de estos eventos pueden ser los terremotos ocurridos en México el 19 de septiembre de 1985, Chile el 22 de mayo de 1960, Indonesia 26 de diciembre de 2004, Estados Unidos 28 de marzo de 1964, Japón 11 de marzo de 2011, etc. Debido a estos antecedentes es de vital importancia tener en cuenta el concepto de resiliencia en ciudades densamente pobladas, según la UNISDR existen cuatro aspectos clave que pueden ser mejorados para aumentar la resiliencia y son conocidos como las cuatro "R" de la resiliencia por sus nombres en inglés (Robustness, Redundancy, Resourcefulness y Rapidity).

- 1) Robustez: es la fuerza, o la capacidad de los elementos, sistemas, y otras unidades de análisis para soportar un determinado nivel de esfuerzos sin sufrir degradación o pérdida de funcionalidad
- 2) Redundancia: es el grado en el que los elementos, sistemas u otras unidades de análisis que existen en el sistema son sustituibles
- 3) Estrategia: se puede conceptualizar como la habilidad de asignar materiales monetarios, físicos, tecnológicos y de información así como recursos humanos para cumplir con las prioridades establecidas ante un evento desfavorable
- 4) Rapidez: es la capacidad que tiene el sistema para cumplir con las prioridades y alcanzar los objetivos de manera oportuna a fin de minimizar las pérdidas y evitar futuras interrupciones en el buen funcionamiento del sistema



La estrategia y la redundancia están estrechamente vinculadas, dado que la estrategia puede crear redundancia.

A continuación se presenta la evaluación de la resiliencia sísmica en una zona densamente poblada propensa a sufrir terremotos, ubicada al sur de la Ciudad de México, caracterizando el ambiente sísmico a través de un análisis de riesgo sísmico probabilístico, propuesto por Mayoral y Osorio (2013). Considerando las dos zonas sísmicas de mayor influencia para la Ciudad de México (normal y subducción).



1 ANTECEDENTES

1.1 Origen de los sismos

Los sismos se producen por la fractura de la roca que forma la corteza o manto superior de la tierra; se le llama foco o hipocentro del sismo al lugar del primer movimiento y de la liberación de energía en la falla, el epicentro es el punto en la superficie de la tierra que se encuentra sobre el foco o hipocentro. Las fuerzas causantes de los movimientos en la superficie de la Tierra están situadas en su interior, los avances en el conocimiento que ahora se tiene acerca del interior de la Tierra han demostrado que esas fuerzas pueden estar relacionadas con las migraciones continentales. La mayor parte del conocimiento del interior de la Tierra procede del estudio de ondas sonoras, cuando tiene lugar un gran terremoto se emiten poderosas ondas sonoras (sísmicas), irradiantes a partir del origen, que pueden ser detectadas y medidas después de haberse transmitido a través del suelo. Hay dos tipos de ondas sísmicas; unas se conocen como de superficie y otras de cuerpo, tanto su velocidad como su energía están regidas por las propiedades de las rocas que recorren y atraviesan (Tarling D. y Tarling M., 1986). El estudio del desplazamiento de los continentes y de los pisos oceánicos sobre la superficie de la Tierra está llevando a la comprensión de los terremotos, es conocido como “tectónica de placas”, y resulta de la evolución del concepto de “derivas continentales” (Tarling D. y Tarling M., 1986).

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica presentes en la propagación de perturbaciones, la observación de los movimientos sísmicos a través de la historia ha permitido establecer varias teorías del mecanismo que origina un temblor (Bolt, 1970), (Housner, 1962) y (Norris, 1959).

Algunas zonas muestran un desplazamiento lento y gradual (fault creep), que ocurre de una manera relativamente suave y, por consiguiente, con poca actividad sísmica apreciable, otros segmentos se deslizan de manera regular, produciendo terremotos pequeños, otros segmentos permanecen bloqueados y almacenan energía elástica durante centenares de años antes de



romperse provocando grandes terremotos, este último proceso exhibe periodos alternativos de comportamiento seguido de un deslizamiento súbito (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Las primeras menciones sobre la relación que existe entre los sismos y las fallas geológicas fueron hechas en 1897 cuando *John Milne* expresó su punto de vista, el cual menciona que una falla geológica repentina había sido la causa (y no el efecto) del terremoto de Mino-Owari en 1891. *Richard Dixon Oldham* llegó a una conclusión similar para el terremoto de Assam ocurrido el 15 de agosto de 1950, después del terremoto de 1906 ocurrido en San Francisco, *Henry Fielding Reid* supuso que en el temblor había habido un deslizamiento repentino a lo largo de la falla de San Andrés, lo que permitió a las rocas ubicadas al oeste de la traza moverse hacia el noroeste, y a las que estaban al este moverse hacia el sureste, el deslizamiento máximo medido en puntos adyacentes a la falla de San Andrés fue de 6.4cm cerca de Olema, este deslizamiento incrementó el esfuerzo existente en puntos adyacentes cercanos al plano de la falla, este aumento de esfuerzos tuvo como resultado una ruptura la cual se propagó a lo largo de la misma.

En muchas partes de la Tierra, la corteza está siendo desplazada lentamente y la diferencia entre los desplazamientos de regiones vecinas provoca deformaciones elásticas que pueden llegar a ser mayores que la que la roca misma pueda soportar, como consecuencia sucede una ruptura (Bolt, 1970) según esta teoría la energía sísmica proviene de la energía de deformación almacenada lentamente en las rocas que están sufriendo este fenómeno, dicha energía es liberada en forma de ondas de esfuerzos al producirse un punto de deslizamiento a lo largo de la falla.

Con el paso del tiempo la teoría ha sido modificada considerando las propiedades plásticas de la roca (flujo plástico) para explicar los pequeños temblores que siguen a uno principal en una misma región (replicas). En conclusión, en esta teoría, la falla geológica es la causa de la mayoría de los temblores (no una consecuencia de ellos) y los desplazamientos relativos a lo largo de las fallas son la suma de desplazamientos durante dichos eventos, la iniciación y mantenimiento de las fallas dependerá del sistema de esfuerzos tectónicos en la corteza



terrestre, en el transcurso del tiempo los estados de esfuerzos se modifican conforme a los cambios en las condiciones mecánicas, químicas y termodinámicas en el interior de la tierra. Los sismos no son siempre producto de los movimientos de las placas tectónicas, sino también de erupciones volcánicas, de explosiones en el interior de la corteza terrestre o inducidos por el relleno de flujos (agua de las presas o gases en pozos) que modifican el padrón de grietas en rocas ígneas intrusivas o metamorfoseadas. Las erupciones volcánicas tales como la que ocurrió en la isla de Krakatoa, cerca de Java, en 1887, o la erupción del volcán Chichonal en 1981, ubicado al norte del estado de Chiapas, llegan a ser violentas pero no se comparan con la energía liberada por los sismos de orígenes tectónicos (Norris, 1959).

1.2 Epicentro

El punto donde se origina un temblor es llamado “hipocentro” o “foco” y el punto en la superficie de la tierra directamente sobre el hipocentro se conoce como epicentro. La distancia del epicentro al sitio donde se mide el movimiento del terreno es llamada distancia epicentral, y la profundidad del hipocentro en la corteza terrestre es conocida como profundidad focal, el epicentro es generalmente el lugar con mayor daño, sin embargo, en el caso de grandes terremotos, la longitud de la ruptura de la falla puede ser muy grande, por lo que el mayor daño puede no localizarse en el epicentro, sino en cualquier otro punto de la zona de ruptura, por ejemplo, en el terremoto de Denali en 2002, cuya magnitud fue de 7.9 grados, el epicentro se encontraba en el extremo oeste de la zona de ruptura, pero el mayor daño ocurrió a unos 330 km del extremo este de la zona de ruptura (Cárdenas, 2010).

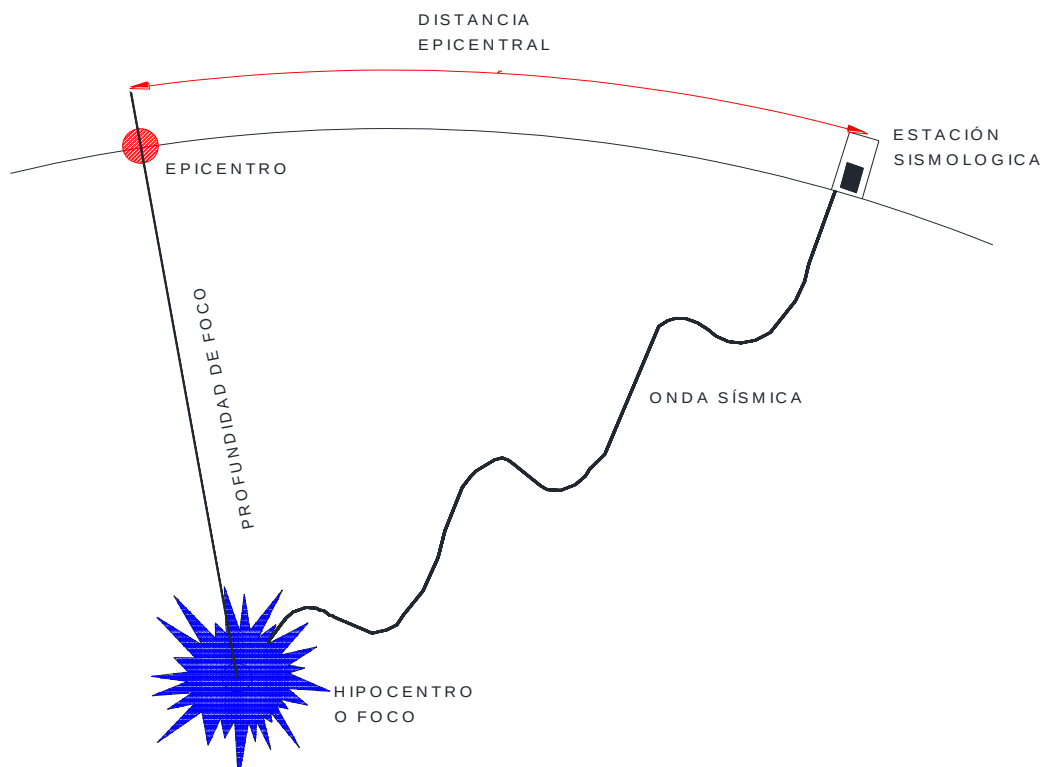


Figura 1. Localización del epicentro, hipocentro, distancia epicentral y de la profundidad focal.

1.3 Ondas sísmicas

El movimiento de la superficie del terreno durante un sismo, es producido por el paso de ondas de esfuerzos, estas ondas sísmicas proceden de una región de la corteza terrestre donde se ha generado una repentina modificación del equilibrio del estado de esfuerzos, al producirse el temblor se originan en la corteza dos tipos de ondas sísmicas: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales. Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares de un terremoto, estas poseen poco poder destructivo y son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y secundarias (S) (Cárdenas, 2010).



Existe una relación entre la velocidad con la que viajan las ondas a través de la tierra y las propiedades del medio que atraviesan como elasticidad y densidad. El otro tipo de ondas son las ondas superficiales, y estas pueden ser de tipo Rayleigh o Love (Cárdenas, 2010).

1.3.1 Ondas sísmicas longitudinales

Las ondas longitudinales también llamadas primarias, de compresión o irrotacionales, se denominan con la letra P, son las primeras en llegar a los sismógrafos por lo tanto son las más veloces, dependen de la compresibilidad del medio, el movimiento de vibración de las partículas es paralelo a la dirección de propagación, lo que implica mayor velocidad. Estas ondas de esfuerzos se generan por el movimiento de partículas hacia atrás y hacia adelante (compresión y tensión en dirección de la propagación de la onda) se caracterizan por el cambio en volumen sin causar rotación, estas ondas viajan a una velocidad 1.73 veces mayor que las ondas S y pueden transmitirse a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. Las velocidades típicas para estas ondas son de 1450 (m/s) en el agua y cerca de 5000 (m/s) en el granito, en un medio homogéneo, isótropo y linealmente elástico, la velocidad de propagación de las ondas P está dada por la siguiente expresión (Timoshenko y Goodier, 1951).

$$U_p = \sqrt{\frac{k + \frac{3}{4}\mu}{\rho}}$$

Donde:

μ =módulo de rigidez, (kg/cm²)

ρ =densidad del medio, (kg-seg²/cm⁴)

K=módulo de incompresibilidad



1.3.2 Ondas sísmicas transversales

Las ondas S (secundarias) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación, su velocidad es menor que la de las ondas primarias, debido a ello, estas aparecen en el terreno después de las primarias, son las segundas en llegar a los sismógrafos, estas ondas son las que generan las oscilaciones y distorsiones sin cambio de volumen en las partículas que se encuentran en su trayectoria, son las que producen un mayor índice de daños, sólo se trasladan a través de elementos sólidos, la velocidad de las ondas S, en un medio homogéneo, isótropo y linealmente elástico, se puede obtener como (Timoshenko y Goodier, 1951)

$$U_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde:

μ =módulo de rigidez, (kg/cm²)

ρ =densidad del medio, (kg-seg²/cm⁴)

1.3.3 Ondas sísmicas superficiales

Las ondas sísmicas superficiales representan la energía que ha sido atrapada en la superficie terrestre y son generadas por la interacción de las ondas de cuerpo con la estructura interna de la tierra, este tipo de ondas se propagan paralelas a la superficie libre del medio, en los sismos poco profundos son las que transportan más energía y las de mayor efecto destructivo. Otra característica de este tipo de ondas es que tienen una amplitud máxima en la superficie libre la cual disminuye exponencialmente con la profundidad, pueden ser registradas a grandes distancias, ya que a diferencia de las ondas de cuerpo sufren una dispersión geométrica con la distancia (Timoshenko y Goodier, 1951).



Básicamente existen dos tipos de ondas superficiales: las ondas de Rayleigh y las ondas Love, estas ondas juegan un papel muy importante en la sismología, no sólo porque son las ondas de mayor amplitud en un sismograma, también porque pueden ser utilizadas en estimaciones del momento sísmico, del mecanismo focal, de la profundidad focal de sismos lejanos y en la discriminación entre temblores y pruebas nucleares. Aunque las ondas de superficie arriban después que las ondas de cuerpo, en algunos casos son casi enteramente responsables del daño y de la destrucción de los terremotos asociados, en terremotos más profundos este daño y la fuerza de las ondas superficiales es menor, otra propiedad importante de las ondas superficiales es que exhiben dispersión, debido a que la velocidad de la onda en la superficie depende de su frecuencia o periodo (Gutiérrez Martínez, *et al.*, 2001).

Las ondas de Rayleigh, nombradas así por *Johb William Strutt* (conocido como Lord Rayleigh), quien matemáticamente predijo la existencia de esta clase de ondas en 1885, son ondas de periodo largo que producen a su paso un movimiento elíptico-longitudinal de las partículas sobre un plano vertical, son el resultado de la interacción en la superficie de la incidencia de ondas P y ondas SV planas. Las ondas de Rayleigh viajan a lo largo de la superficie con un movimiento de partícula elíptico retrógrado, es decir, las partículas del material se mueven describiendo una elipse en dirección opuesta a la dirección de propagación de la energía, el eje vertical de la elipse es siempre el de mayor amplitud. (Gutiérrez Martínez, *et al.*, 2001).

La velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh (v_r) es menor que la velocidad de las ondas S, siendo $V_r = 0.92 V_s$ (para una razón de Poisson $\nu=1/4$) sin embargo, esta velocidad de propagación varía en función del periodo de la onda, por lo que las ondas de Rayleigh son ondas dispersivas, lo cual significa que las diferentes componentes armónicas de las ondas Rayleigh que constituyen un sismo viajan con velocidades diferentes.

Otro tipo de ondas de superficie son las ondas Love, estas están formadas por la interferencia de múltiples reflexiones en la superficie libre de ondas SH, las ondas Love son más rápidas que las ondas de Rayleigh y por lo tanto arriban antes al sismograma, el movimiento de partícula para la onda Love es paralelo a la superficie pero perpendicular a la dirección de

propagación y se encuentra en la componente horizontal del sismograma, las ondas Love también son dispersivas, esto es, la velocidad de propagación de la onda depende de su frecuencia, siendo mayor para frecuencias menores, en la Figura 1.2 se presenta un diagrama representativo del tipo de movimiento que exhiben algunos tipos de ondas y en la Figura 1.3 se presenta esquemáticamente como se transmiten las ondas superficiales y las ondas de cuerpo, haciendo más evidente la diferencia entre estas (Suarez R. y Jiménez J. 1987).

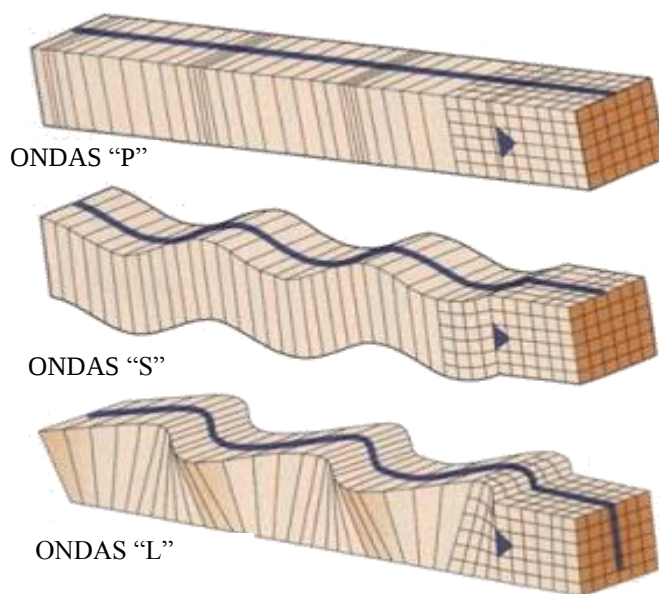


Figura 1.2. Movimientos exhibidos por diferentes tipos de ondas.

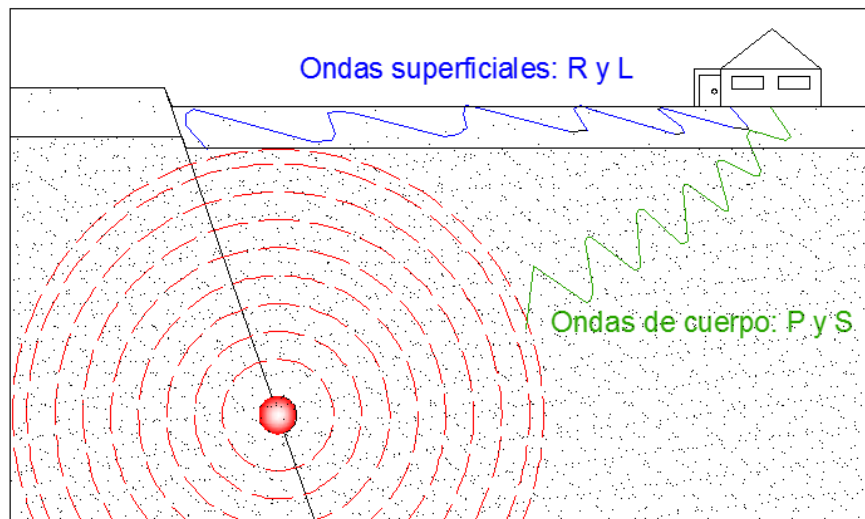


Figura 1.3. Propagación de ondas superficiales y de cuerpo.

1.4 Movimiento del terreno

Las ondas de cuerpo y las ondas superficiales producen movimiento en el terreno por el cual se propagan, para desarrollar un estudio de ingeniería sísmica es fundamental tener en consideración una medida del movimiento del terreno en el sitio al producirse el terremoto. Una medida la dan los acelerogramas, registrados por acelerógrafos, un acelerograma es un registro continuo de las aceleraciones del terreno en función del tiempo que dura un sismo, es una función aleatoria que puede suponerse compuesta por una secuencia no periódica de pulsos de aceleración, en ingeniería las características más significativas del movimiento del terreno, se obtienen de los espectros de respuesta de los cuales se hablará posteriormente.



1.5 Magnitud del sismo

Para fines de ingeniería es importante poder describir en forma cuantitativa el “tamaño” de un terremoto, la intensidad de un terremoto se puede expresar en escalas, los primeros parámetros usados para catalogar y cuantificar eventos sísmicos se basaron en su poder destructivo, haciendo estudios descriptivos de los daños ocasionados en diversas estructuras, en la actualidad existen varias escalas de intensidad usadas en el mundo.

1.5.1 Escalas relativas

Las escalas relativas de intensidad, como la escala de *Mercalli* o la escala de *Rossi-Forel*, se basan en las destrucciones causadas, la escala de *Mercalli* fue diseñada en 1902 y modificada en 1956 por *Charles Richter*, se constituye de los niveles I a XII. (Suarez R y Jiménez J, 1987) en la Tabla 1 se describe esta escala.

Tabla 1. Escala de Rossi-Forel:

Intensidad	Descripción
I	Registrable solamente por instrumentos
II	Sentido por poco personas en reposo
III	Sentido por varias personas en reposo
IV	Sentido por varias personas en movimiento, desplazamiento de objetos
V	Sentido generalmente por todos, movimiento de muebles
VI	Despertar general de aquellos que duermen
VII	Vuelcos de objetos móviles, caída de partes de muros
VIII	Caída de chimeneas, grietas en las paredes de los edificios
IX	Destrucción total o parcial de algunos edificios
X	Gran desastre, fisuras en la corteza terrestre



1.5.2 Escalas absolutas

Se usan diversas escalas de magnitud según la porción de los registros que se empleen para calcular esta cantidad. Una de ellas es la magnitud de momento “ M_w ”, que se relaciona directamente con la energía liberada y es función lineal del logaritmo de esta energía, esta escala está abierta en ambos extremos: podría ir de menos a más infinito (Rosenblueth, 1988).

Escala de Gutenberg - Richter: la escala original de Richter tomaba las amplitudes máximas de ondas superficiales de sismos ocurridos a distancias cortas para calcular lo que él denominó magnitud (Suarez R. y Jiménez J. 1987) actualmente se denomina "escala Richter" aunque los autores son Gutenberg & Richter, mide la energía que actúa durante un terremoto en una forma logarítmica, a diferencia de la escala de Rossi-Forel esta no tiene un límite en el eje de las ordenas

La magnitud de un sismo es una medida instrumental de la energía liberada por un terremoto, se expresa en una escala logarítmica absoluta desarrollada por *Charles Richter* con la colaboración de *Beno Gutenberg* en 1935, ambos investigadores del Instituto Tecnológico de California, la gran variación de la energía en los diferentes terremotos hace necesaria la aplicación de una escala logarítmica, normalmente la magnitud se estima midiendo las amplitudes que se producen en la superficie terrestre y que se registran en las estaciones sismogénicas situadas alrededor del epicentro. Esta escala fue definida para sismos locales en California para un radio de aproximadamente 600 km y se determina a partir de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo Wood Anderson con constantes específicas (período = 0.8 segundos, amplificación estática = 2800 y factor de amortiguamiento = 0.8) ubicado a 100 kilómetros de la fuente sísmica (Suarez R. y Jiménez J. 1987).



La forma general de la ecuación empírica para la magnitud M es:

$$M = \log A + 3\log (\Delta t) - 2.92$$

Donde:

M = magnitud arbitraria pero constante en terremotos que liberan la misma cantidad de energía.

A = amplitud de las ondas en milímetros, tomada directamente en el sismograma.

Δt = tiempo en segundos desde el inicio de las ondas P (Primarias) hasta la llegada de las ondas S (Secundarias).

En la práctica, la distribución geográfica de los sismógrafos determina que los registros no se encuentran realmente a la distancia de 100 km y lo que se hace es extrapolar a la distancia requerida. Para mejores resultados se toma un promedio del valor de M determinado por varias estaciones sismológicas, los sismos en los cuales el valor de la magnitud es de 5 o mayor generan movimientos del terreno suficientemente severos como para ser potencialmente dañinos a las estructuras, para magnitudes menores que 5 el movimiento del terreno en general no es dañino por su corta duración y moderada aceleración.

1.5.3 Sismos de magnitudes considerables

La mayor liberación de energía que ha podido ser medida fue durante el terremoto ocurrido en la ciudad de Valdivia (Chile), el 22 de mayo de 1960, el cual registro una magnitud de momento (M_w) de 9.5. A continuación se describen los efectos típicos de sismos con diversas magnitudes, los valores son estimados y deben tomarse con extrema precaución, ya que la intensidad y los efectos en la tierra no solo dependerán de la magnitud del sismo, sino también de la distancia del epicentro, la profundidad, el foco del epicentro y las condiciones geotécnicas (algunos terrenos pueden amplificar las ondas sísmicas) en la Tabla 1.2 se



muestran los efectos típicos de sismos con diversas magnitudes y en la Tabla 1.3 se relacionan estas magnitudes con sismos ocurridos en todo el mundo.

Tabla 1.2. Efectos típicos de sismos con diversas magnitudes.

Magnitud (M_w)	Descripción	Efectos	Probabilidad de ocurrencia
$M_w < 2.0$	Micro	Los microsismos no son perceptibles.	Alrededor de 8000 por día
2.0-2.9	Menor	Generalmente no son perceptibles.	Alrededor de 1000 por día
2.9-3.9		Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños.	49 000 por año.
3.9-4.9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones, sismo significativo pero con daño poco probable.	6 200 por año.
4.9-5.9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas, en edificaciones bien diseñadas los daños son leves.	800 por año.
5.9-6.9	Fuerte	Pueden llegar a destruir áreas pobladas, en un radio aproximado de 160 Km.	120 por año.
6.9-7.9	Mayor	Puede causar daños serios en zonas extensas.	18 por año.
7.9-8.9	Grande	Puede causar daños graves en áreas de varios cientos de kilómetros.	1-3 por año.
8.9-9.9		Devastadores en áreas de varios miles de kilómetros.	1-2 en 20 años.
10,0+	Intenso	Nunca registrado.	En la historia de la humanidad (y desde que se tienen registros históricos de los sismos) nunca ha sucedido un terremoto de esta magnitud.



Tabla 1.3. Sismos de magnitudes considerables en todo el mundo.

Magnitud, (M_w)	Ubicación del sismo
6.5	Terremoto de Guerrero, 2011 (México)
6.7	Terremoto de L'Aquila, 2009 (Italia)
	Terremoto de Zapallar, 2012 (Chile)
7	Terremoto de Loma Prieta, San Francisco, 1989 (Estados Unidos)
	Terremoto de Puerto Príncipe, 2010 (Haití)
	Terremoto de Tehuacán, 999 (México)
7.1	Terremoto de Biobío-Araucanía, 2011 (Chile)
	Terremoto de Punitaqui, 1997 (Chile)
7.2	Terremoto de Mexicali, Baja California, 2010 (México)
	Terremoto de Kobe, 1995 (Japón)
	Terremoto de Guerrero, 2014 (México)
7.3	Terremoto de Veracruz, 1973 (México)
	Terremoto de Xinjiang, 2014 (China)
7.4	Terremoto de La Ligua, 1965 (Chile)
	Terremotos de Guerrero-Oaxaca, 2012 (México)
7.5	Terremoto de Caucete, 977 (Argentina)
	Terremoto de Oaxaca, 1999 (México)
	Réplica del terremoto de Iquique, 2014 (Chile)
7.6	Terremoto de Colima, 2003 (México)
7.7	Terremoto de Orizaba de 1937 (México)
	Terremoto de la ciudad de México, 1957 (México)
	Réplica del terremoto de Iquique, 2014 (Chile)
7.8	Terremoto de Sichuan, 2008 (China)
	Terremoto de Nepal, 2015 (Nepal)
	Terremoto de Ecuador, 2016 (Ecuador)
7.9	Terremoto de Áncash, 1970 (Perú)
8	Terremoto de Pisco, 2007 (Perú)
8.1	Terremoto de Michoacán, 1985 (México)
8.2	Terremoto de Iquique, 2014 (Chile)
	Terremoto de Valparaíso, 1906 (Chile)
8.5	Terremoto de Sumatra, 2007 (Indonesia)
	Terremoto de Arequipa, 2001 (Perú)
	Terremoto de Valdivia, 1575 (Chile)
8.8	Terremoto de Cobquecura, 2010 (Chile)
	Terremoto de Ecuador y Colombia, 1906
9	Terremoto de Japón, 2011
9.2	Terremoto de Anchorage, 1964 (Alaska, Estados Unidos)
9.5	Terremoto de Valdivia, 1960 (Chile)



Los sismos más importantes, registrados por el primer instrumento instalado en la República Mexicana fueron en el año 1904, ocurrieron a lo largo de las fronteras entre las placas oceánicas de Cocos y Rivera, así como en la placa continental de Norte América (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Uno de los antecedentes más significativos en la historia sísmica de México es el terremoto del 19 de septiembre de 1985, fue un sismo de subducción con una magnitud de 8.1, tuvo su epicentro en las costas de Guerrero y Michoacán, el hipocentro se localizó a 15 kilómetros de profundidad bajo la corteza terrestre, este evento sísmico se originó en lo que se conocía como la brecha de Michoacán. Una brecha sísmica es un segmento de una falla activa que durante un largo periodo de tiempo no ha presentado algún deslizamiento, y por ende, cuna de un gran sismo, (Suarez R. y Jiménez J., 1987).

Este sismo tuvo una rotura del contacto entre las placas de Cocos y de Norteamérica, en una extensión de 50 km x 170 km y unos 18 km de profundidad; alcanzó una escala Mercalli Modificada de IX, donde hubo un daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas perdieron su verticalidad y se presentaron daños grandes en edificios sólidos con colapso parcial, (Emilio Rosenblueth, 1988). El sismo afectó a los estados de Jalisco, Guerrero, Colima, Puebla, Tlaxcala, Oaxaca, Morelos, Estado de México, Michoacán y especialmente causo muchos desastres en la Ciudad de México, esto debido a la estratigrafía profunda del Valle de México, las ondas que llegaron a la superficie rocosa tenían, un contenido alto de energía en un intervalo de frecuencias que involucra a las que más amplifican las arcillas de este sitio. Las construcciones que al experimentar grandes oscilaciones vibraban en este rango de frecuencias, en general edificios de 7 a 15 pisos sufrieron más daños. Este terremoto superó en intensidad y daños al registrado en 1957, la réplica acontecida un día después también tuvo gran repercusión para la capital al colapsar estructuras reblandecidas un día antes, cerca de 30 000 estructuras presentaron daños totales, y 68 000 daños parciales, entre los edificios más importantes que presentaron daños severos estaban el edificio Nuevo León del conjunto urbano Tlatelolco

los edificios A1, B2 y C3 del Multifamiliar Juárez, Televiscentro (hoy Televisa Chapultepec), los hoteles Regis (ahora Plaza de la Solidaridad), el hospital Juárez, el hospital general y el Centro Médico Nacional. La carpeta asfáltica afectada con grietas, hundimientos y fracturas fue de 516 mil metros cuadrados, también 32 estaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro presentaron afectaciones, en las imágenes 1.4 y 1.5 se muestran algunos de los edificios dañados durante este terremoto y en la Tabla 1.4 se muestran los daños causados en la CDMX por el evento de 1985 de acuerdo a investigaciones de (Bitrán, 2001).



Figura 1.4. Escombros del Centro Médico Nacional después del terremoto de 1985.



Figura 1.5. Daños sufridos en los edificios del conjunto habitacional Tlatelolco.



Tabla 1.4. Daños causados en la CDMX por el terremoto de 1985, (CENAPRED, 2001).

Sector	Perdidas económicas en miles de millones de pesos
Sectores Sociales	487.7
Salud	177
Educación	130.4
Vivienda	180.3
Infraestructura de Servicios	611.3
Edificios públicos	390.3
Comunicaciones	105
Turismo	59.7
Acueductos y Drenajes	7.6
Energía	6.5
Transporte	5.8
Banca	20.6
Recreación	6.8
Servicios Personales	9
Otros Sectores	214.1
Industria y Comercio	143.5
Pequeña industria y comercio	136.3
Gastos para la emergencia	23.8
Demolición y remoción de escombros	46.8
TOTAL	1449.4

El sismo de Japón ocurrido en 1955 es otro gran ejemplo de la importancia de la evaluación de la resiliencia sísmica, este sismo ocurrido en la ciudad de Kobe en Osaka – Japón, fue por su característica de magnitud, $M_w=7.2$, muy parecido al de Loma Prieta en San Francisco – EE. UU., pero a diferencia de este el de Kobe fue más destructivo, cada kilómetro dentro de la zona de efecto del sismo tuvo un comportamiento diferente, el epicentro estuvo ubicado cerca de zonas densamente pobladas, debido a esto el número de víctimas fue de casi 5000 personas, a esto se le sumaron los problemas clásicos causados por un sismo de esta magnitud como la falta de energía eléctrica, agua potable y el colapso del alcantarillado.



El motivo de falla de algunos edificios se atribuye a la gran intensidad que alcanzó el sismo, debido a que el tipo de suelo amplificó el movimiento, justamente como ocurrió en la ciudad de México en 1985, el movimiento del suelo se caracterizó por presentar periodos de vibración cercanos a los 2 segundos, las construcciones con un período periodo de vibrar alto, respondieron con efectos de resonancia, este movimiento introduce fuerzas de inercia de gran magnitud que en muchos casos provocaron daños que redujeron la rigidez de la estructura, por lo que las solicitaciones aumentaron, y estas en ocasiones llevaron a la falla e inclusive al colapso. Por otra parte las vías urbanas elevadas de un solo pilar sufrieron daños debido a que en ellas se presentó el efecto de péndulo invertido, este tipo de falla se muestra en la Figura 1.6, las columnas de los puentes o autopistas elevadas fueron construidas y diseñadas tomando en cuenta el gran peso de la superestructura, sin considerar el efecto de la fuerza cortante debido al aumento de la carga durante el sismo, el acero longitudinal era eficiente hasta cierto punto, pero el concreto al no tener un buen confinamiento, debido al pobre refuerzo transversal, estalló, estos efectos se aprecian claramente en las Figuras 1.7 y 1.8.



Figura 1.6. Daño en un paso elevado durante el sismo de Kobe en 1995.



Figura 1.7. Daño en las columnas de un paso elevado durante el sismo de Kobe en 1995.



Figura 1.8. Colapso de un paso elevado durante el sismo de Kobe en 1995, esta falla es atribuida entre otras cosas al poco acero de confinamiento.



El terremoto de México de 1957, conocido también como el Terremoto del Ángel, fue un sismo ocurrido el 28 de julio de 1957, su epicentro se ubicó cerca del puerto de Acapulco, en la costa del estado de Guerrero, y registró una magnitud de 7.8 en escala de Richter, la zona centro de la República Mexicana fue la más afectada, en especial la Ciudad de México, dejando un saldo de 700 muertos y 2 mil 500 heridos. (Montero, 2012). La mayoría de los daños ocurridos en la Ciudad de México se concentraron en la zona centro, en lo que hoy es la Delegación Cuauhtémoc, se reportaron alrededor de 1000 edificios dañados, en el centro de la ciudad hubo derrumbes de edificios públicos, privados y de centros educativos, como las instalaciones del Instituto Politécnico Nacional (IPN), para ser más precisos la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (Reinoso y Orozco, 2007).

En las Figuras 1.9 y 1.10 se aprecia el daño que sufrió el monumento que dio nombre a este sismo “El Ángel de la Independencia“, mientras que en la Figura 1.11 se muestran los daños sufridos en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del (IPN)

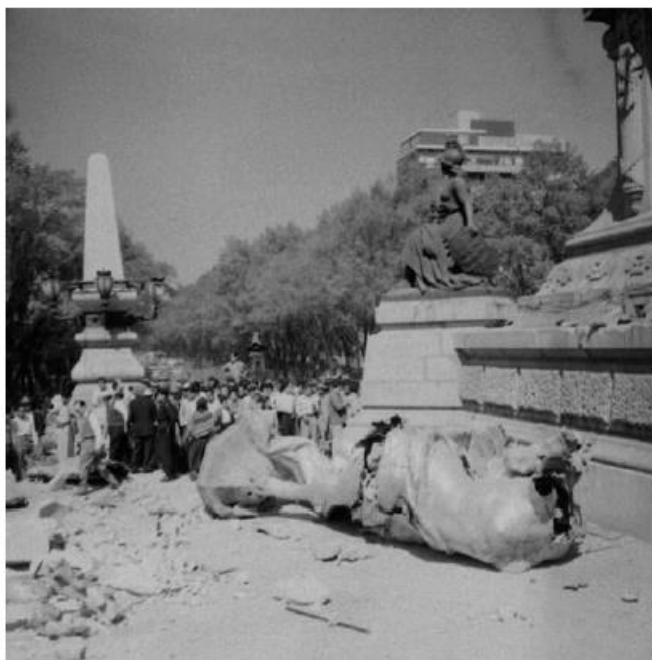


Figura 1.9. Colapso del Ángel de la Independencia, debido al sismo de 1957 (Montero, 2012).



Figura 1.10. Colapso del Ángel de la Independencia, debido al sismo de 1957
(Montero, 2012).



Figura 1.11. Colapso del ala sur del edificio del IPN a causa del sismo de 1957
(Reinoso y Orozco, 2007).



1.6 Propiedades dinámicas y parámetros geotécnicos del suelo.

La naturaleza y la distribución del daño sísmico están muy influenciados por la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas, dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades del suelo. Por ejemplo, la susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte, G , y el amortiguamiento, ξ , los principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo, estos parámetros se relacionan con otras propiedades del suelo, de carácter más físico, como por ejemplo el índice de poros, la densidad relativa y la velocidad de las ondas de corte. Un parámetro clave en estudios de la evaluación de la respuesta sísmica de suelos es la velocidad de las ondas de corte, normalmente su valor se deduce a partir de ensayos o técnicas de reconocimiento de suelos, por ejemplo, se han estudiado a lo largo del tiempo correlaciones de la velocidad de estas ondas con el número de golpes “N” obtenido en el ensayo de penetración estándar (SPT) (Hardin y Drnevich, 1972).

El índice de plasticidad se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

$$IP = \omega_L - \omega_P$$

Donde ω_L y ω_P se expresan en %.

Es un parámetro clave en estudios de respuesta sísmica ya que influye de forma notable en las propiedades dinámicas de los suelos.

El peso específico es la relación entre el peso total y el volumen total del suelo, es decir:

$$\rho = \frac{W_T}{V_T}$$



Como se mencionó anteriormente la amplificación del movimiento en el suelo está determinada por las propiedades dinámicas del suelo, entre éstas, la rigidez del suelo y el amortiguamiento son las propiedades clave para el estudio de la respuesta de sitio. Una buena aproximación a la rigidez del suelo se obtiene a partir del módulo de corte G que se calcula por medio de la velocidad de las ondas sísmicas. La razón de amortiguamiento, ξ , muestra la capacidad que tiene el suelo para disipar la energía. Otras propiedades dinámicas son la densidad ρ y el índice de Poisson ν , pero éstas tienen menor influencia. El movimiento provocado por un terremoto es una carga cíclica rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el descrito por en la Figura 1.12, que corresponde a la curva de histéresis deformación de corte γ contra tensión de corte τ . El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la Figura 1.12 y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión- deformación y en función de dónde se evalúa esta pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente (G_{tan}), secante (G_{sec}) o máximo (G_{max}) (Hardin y Drnevich, 1972).

En la Figura 1.13 se ilustran dichos módulos: el módulo de corte máximo (G_{max}), calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente (G_{tan}) que es el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante (G_{sec}) que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva. El módulo de corte G está relacionado con el coeficiente de Poisson ν y el módulo de Young E de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E = 2(1 + \nu)G$$

Esta fórmula es válida para materiales que tienen un comportamiento isótropo, el coeficiente de Poisson ν también es un parámetro dinámico pero se considera que tiene una influencia menor (Hardin y Drnevich, 1972).

La razón de amortiguamiento expresa la capacidad del material para disipar la energía, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$

Donde W_D corresponde a la energía disipada, W_S es la energía de deformación máxima

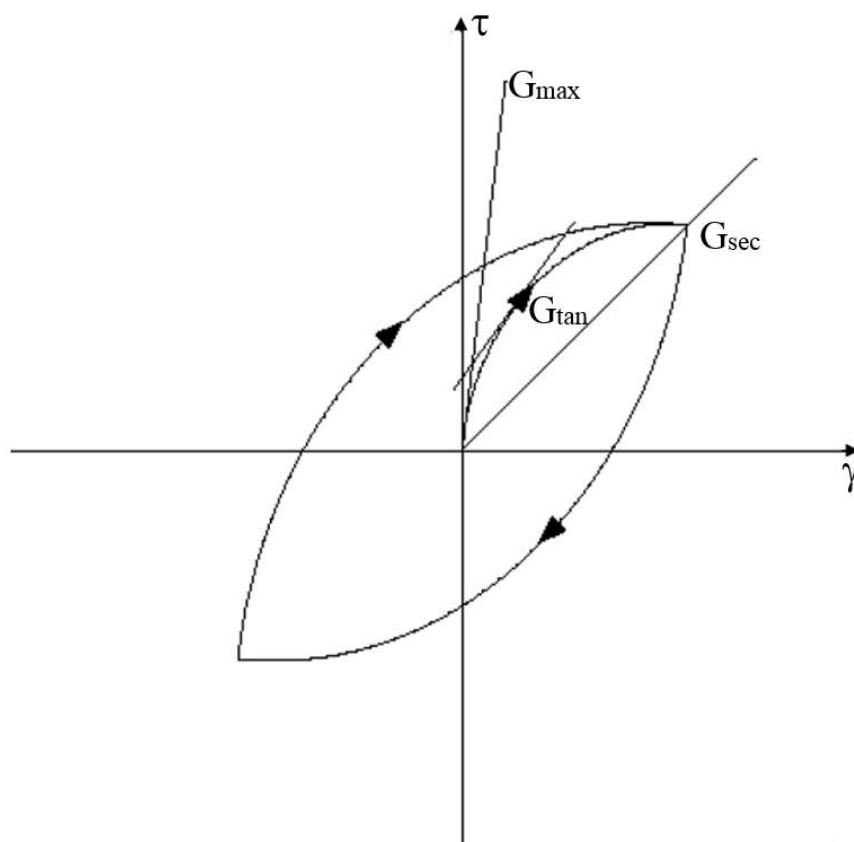


Figura 1.12. Curva histéresis tensión de corte τ (kPa) vs deformación de corte γ (%), y definición de módulo de corte máximo G_{max} , tangente G_{tan} y secante G_{sec} . (Hardin y Drnevich, 1972).

Comúnmente la representación normalizada del módulo de corte contra el módulo de corte máximo, conocida como curva de reducción de módulo, es representada como se muestra en la Figura 1.13, donde se observa que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta el nivel de deformación, es importante mencionar que la razón de amortiguamiento también depende de la magnitud de la deformación, siendo mayor a medida que aumenta la deformación de corte.

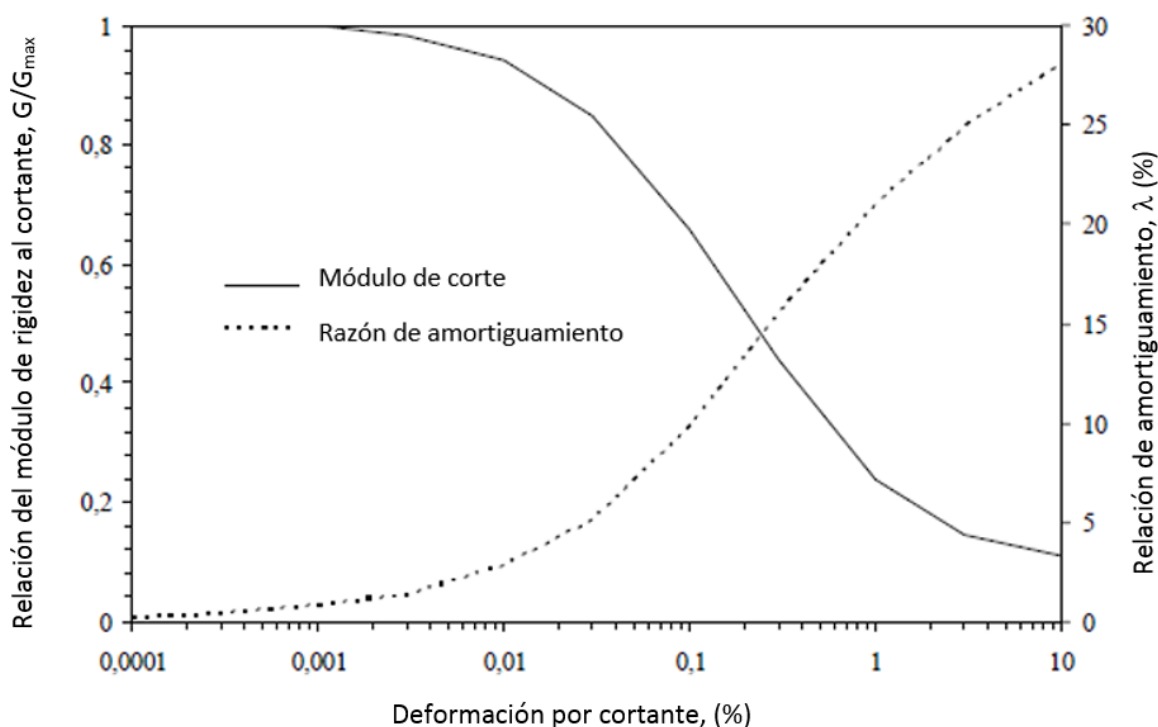


Figura 1.13. Curvas de degradación y amortiguamiento para una arcilla blanda.

La disminución del módulo de corte con el aumento de la deformación es mayor cuando el índice de plasticidad (IP) del material aumenta, (Figura 1.14), esto para suelos ligeramente consolidados ($OCR > 1$) con alto índice de plasticidad. En cambio para suelos normalmente consolidados ($OCR = 1$) si el índice de plasticidad crece, G_{max} permanece más o menos constante, esta característica es muy importante, ya que puede influir en la manera en que un depósito de suelo amplificará o atenuará los movimientos provocados por un terremoto. (Vucetic y Dobry, 1991).

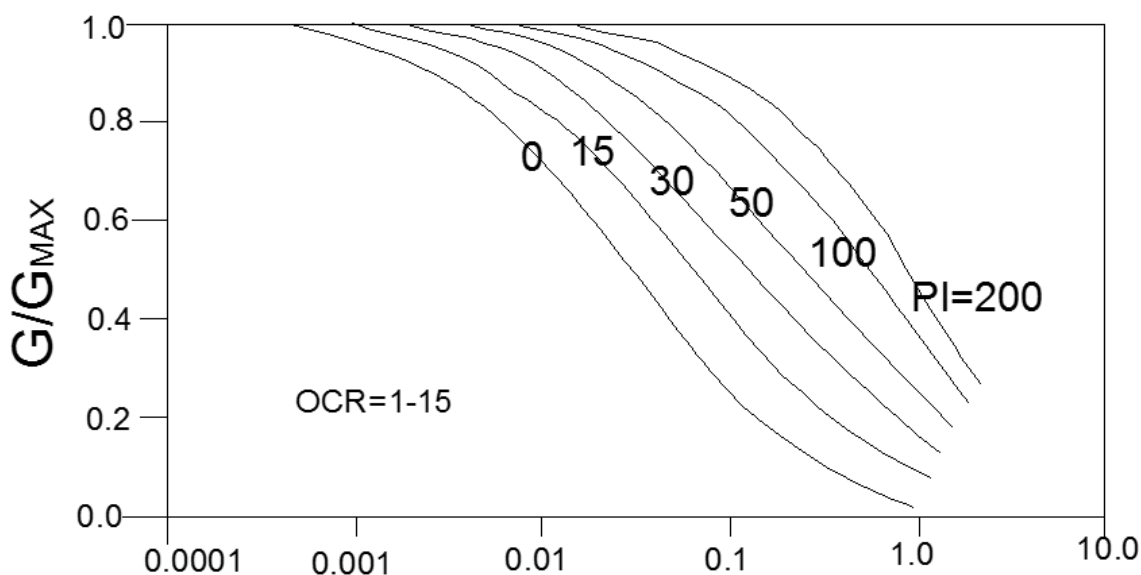


Figura 1.14. Variación del módulo de corte en función del grado de sobreconsolidación del suelo y del índice de plasticidad y de la deformación. (Vucetic y Dobry, 1991).

En el mismo estudio también se pudo determinar que para un índice de plasticidad alto, la razón de amortiguamiento disminuye con el aumento de la deformación de corte

1.7 Espectros de respuesta

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por *Biot* en el año 1932 y luego desarrollados por *Housner*, *Newmark* y muchos otros investigadores. Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una herramienta importante en dinámica estructural, de gran utilidad en el área de diseño sismorresistente, en forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una determinada acción dinámica en una estructura, se representan graficando en el eje de las abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en las ordenadas la respuesta máxima



calculada, se han desarrollado varios tipos de espectros, los cuales presentan características diferentes y se utilizan con distintos objetivos. Los espectros de respuesta elástica representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento, se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras, las curvas de estos presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto. Los espectros de respuesta inelástica son similares a los anteriores pero en este caso se supone que la estructura puede experimentar deformaciones en el rango plástico por la acción del terremoto, este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis de que incursionarán en el campo plástico, no debe olvidarse que el espectro de respuesta es una característica propia de cada sismo, los depósitos arcillosos blandos y los suelos no cohesivos amplifican más los movimientos largos, este efecto puede ser muy significativo para estructuras con período alto, por ejemplo, puentes o edificios altos cimentados en este tipo de materiales, los factores que determinan los efectos de un temblor sobre una estructura son: (Prince, 1963)

- a) Las características de la estructura misma
- b) Las características de las ondas de esfuerzos que llegan al sitio donde se encuentra la estructura
- c) La estratigrafía presente en el lugar



1.8 Principales zonas sísmicas que afectan a la Ciudad de México

Con el fin de estimar los movimientos del terreno asociados a eventos sísmicos futuros, se estructuró una red de estaciones sismográficas que cubren prácticamente toda la República Mexicana. Estas estaciones están a cargo de entidades como: el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Geofísica de la UNAM. Con la información que esta red genera *Rosenblueth* y sus colaboradores (1987) concluyeron que, los movimientos del terreno en el Valle de México se originan básicamente por cuatro mecanismos de liberación de energía, el primero de ellos está asociado a la zona de subducción, el segundo es la falla normal que se produce entre las placas de Cocos y la de Norteamérica dentro del continente, el tercero está ligado con la liberación de energía producida en la placa continental, y el cuarto con las fallas en la placa Norteamericana en las inmediaciones del Valle de México. En la Figura 1.16 se muestra la ubicación de estos cuatro mecanismos de liberación de energía, el que ha causado los daños más intensos en la Ciudad de México, es el que corresponde a la zona de subducción, hasta el momento los eventos más peligrosos para la Ciudad de México se generan en las costas de Michoacán y Guerrero. En esta zona, los temblores se producen a profundidades relativamente superficiales, mismas que aumentan hacia el interior del continente a lo largo de varias secciones transversales a la trinchera que delimita el contacto entre las placas de Cocos y de Norteamérica (*Rosenblueth*, 1987)



Figura 1.16. Ubicación de los sistemas causantes de los cuatro tipos de sismos que afectan a la Ciudad de México (Rosenblueth, 1987).

1.9 Zonificación de la Ciudad de México de acuerdo al tipo de suelo

Como lo define el artículo 170 del Capítulo VIII, del Título Sexto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, la Ciudad de México se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

- a) Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados



- b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a una profundidad máxima de 20 m, está constituida predominantemente por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros
- c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas o muy compactas y de espesor variable el cual va de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales, el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

1.9.1 Zonificación sísmica de la Ciudad de México

Diversas investigaciones y trabajos científicos en materia de Ingeniería Sísmica, han dado como resultado una zonificación sísmica de la Ciudad de México, que muestra las zonas con mayor impacto y que presentan aceleraciones del terreno desfavorables para la estabilidad de la infraestructura civil.

De esta forma las delegaciones de la Ciudad de México con mayor riesgo sísmico son: Cuauhtémoc, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. Para efectos de diseño sísmico estructural, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, consideran la zonificación estratigráfica que fija el artículo 170 del RCDF. Adicionalmente, la zona III se divide en cuatro subzonas (IIIa, IIIb, IIIc y IIId), como se observa en la Figura 1.17.

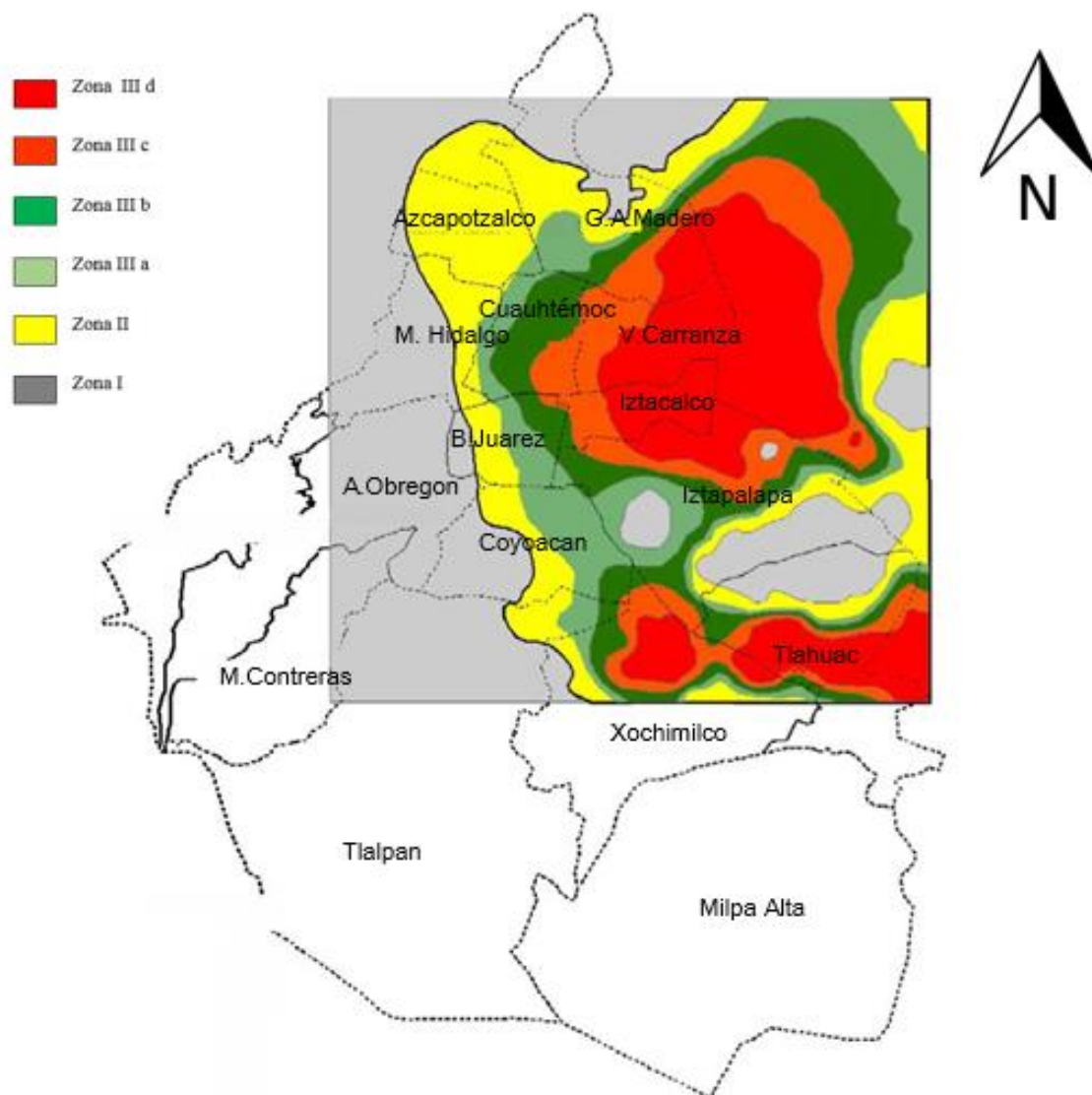


Figura 1.17. Zonificación sísmica de la Ciudad de México (Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo).



1.9.2 Riesgo sísmico de la Ciudad de México.

Se denomina riesgo sísmico a la probabilidad de ocurrencia, de un terremoto dentro de un periodo de tiempo y en un lugar determinado, dicho terremoto debe exhibir ciertas características las cuales causan pérdidas o daños de ciertas magnitudes. Los posibles efectos locales de amplificación de las ondas sísmicas, la vulnerabilidad de las construcciones, la capacidad de respuesta de instituciones y autoridades así como las posibles pérdidas humanas y económicas son factores que influyen de manera directa en este concepto. El riesgo sísmico varía de una región a otra, dependiendo de la cercanía con fallas activas, del tipo de suelo, de la edad y diseño de las edificaciones, también depende en gran medida de la cantidad y del tipo de asentamientos humanos localizados en el lugar. El riesgo sísmico en la Ciudad de México varía mucho de una zona a otra debido a la diversidad de los suelos que la conforman, del comportamiento que estos exhiben ante perturbaciones sísmicas y de la gran variedad de asentamientos humanos, por ejemplo, es alto en la zona centro, construida sobre sedimentos lacustres, donde el efecto local de amplificación de ondas con periodos del orden de 2 segundos es muy grande (efecto que derribó gran cantidad de construcciones durante el sismo del 19 de septiembre de 1985), por otra parte el riesgo sísmico es menor en zonas como el Pedregal de San Ángel, donde las construcciones están asentadas sobre roca o sedimentos muy bien compactados. Los daños sufridos debido a los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985, mostraron el grado de vulnerabilidad que tiene la Ciudad de México, la gran concentración de población, infraestructura, presencia de arcillas lacustres con una peculiar respuesta dinámica y la cercanía con zonas sismogénicas de importancia, posicionan a la Ciudad en un escenario desfavorable ante la ocurrencia de sismos aun cuando los reglamentos de construcción se adecuaron y ahora contemplan normas más estrictas, esto aplica para las construcciones actuales, pero no es así para un gran número de inmuebles cuyas características estructurales, de mantenimiento y antigüedad, los colocan en una situación de riesgo potencial en caso de que un sismo de magnitud importante afecte a la ciudad. No obstante con esto el riesgo sísmico aumenta debido al gran núcleo poblacional que representa la ciudad, lo cual obliga a contar con sistemas de alertamiento sísmico que ayuden a reducir la vulnerabilidad así como las pérdidas humanas y materiales.



2 RESILIENCIA

Definida como "Capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de un evento catastrófico de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas" (UNISDR, 2013). De acuerdo a la Ley General de Protección Civil se define a la resiliencia como: la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos.

2.1 ¿Por qué hablar de ciudades resilientes?

Las ciudades y sus zonas urbanas están compuestas por densos y complejos sistemas de servicios interconectados, los cuales, hacen frente a un creciente número de problemas que contribuyen al incremento del riesgo. Se pueden aplicar estrategias y políticas para atender cada uno de estos problemas, para hacer que las ciudades de todo tamaño y perfil sean más resilientes y más habitables.

Actualmente vivimos en ciudades cada vez más pobladas, en las que un alto porcentaje de la población reside en áreas urbanas que atraviesan por innumerables condiciones críticas, con afectaciones a nivel social, económico e ingenieril, por ello la preocupación para encontrar estrategias que permitan recuperarse de un evento desfavorable como es el caso de un sismo, estas estrategias tendrán la finalidad de evitar la pérdida de vidas humanas, reactivar la economía y renovar las edificaciones dañadas. El concepto de resiliencia aplicada a un evento sísmico consiste en la capacidad que tiene una región determinada para atender las necesidades de su población ante un evento telúrico, de tal manera que se evite en la medida



de lo posible la pérdida de vidas humanas, así como la recuperación eficiente de la funcionalidad económica y social, la resiliencia es en sí una capacidad de respuesta, y esta mejora si se identifican los peligros y los recursos que se tienen para atenderlos, es decir, de las vulnerabilidades y fortalezas, este concepto no es exclusivo del ámbito ingenieril, el término ha sido aplicado para diferentes disciplinas como la psicología, la ecología, etc.

La resiliencia será entonces un proceso de respuesta a la adversidad, en donde ser resiliente es la capacidad que tiene el conjunto de componentes de un sistema para dar solución a un evento catastrófico. Con base en diversos autores, la resiliencia sísmica se conceptualiza como la capacidad de respuesta de una ciudad para recuperarse de los efectos sísmicos de manera oportuna y eficiente, mediante la rehabilitación de sus estructuras y funciones básicas, otro aspecto a tener claro cuando hablamos de resiliencia es la diferencia entre dos conceptos que pudieran ser asociados. Es necesario entender que resiliencia no es lo mismo que sostenibilidad, se habla de ciudades sostenibles cuando nos queremos referir a aquellas que pueden ser capaces de mantenerse por sí mismas, que pueden mantener sus condiciones de estabilidad sin ayuda del exterior. Por otro lado, las ciudades resilientes son aquellas que han sufrido algún tipo de afectación y sin embargo han sabido adaptarse superando las dificultades y recuperando su funcionamiento normal. Actualmente existen algunas instituciones, que, a nivel internacional, analizan la resiliencia a partir de una serie de variables, es así que analizaremos las propuestas de dos instancias que por su antigüedad y experiencia, resultan las más adecuadas. Por una parte, la Fundación Rockefeller (The Rockefeller Foundation) y por otra, la Alianza Resiliente (The Resilient Alliance). La Rockefeller Foundation (2014), a través de su división “100 ciudades resilientes”, se dedica a estudiar la resiliencia como una manera de promover el bienestar de los habitantes.



2.2 Aspectos fundamentales que deben de caracterizar a una ciudad resiliente.

La Rockefeller Foundation, publica una síntesis de los factores que hacen que una ciudad sea resiliente (Martínez, 2014) en este listado únicamente se seleccionaron los factores que tienen un impacto directo en el tema de esta investigación:

1. Redes de comunicación: Se refiere a la necesidad de contar con sistemas bien conectados y que incluso, si uno llegara a fallar, el resto pueda seguir funcionando, se mantenga a flote y resulte confiable.
2. Resiliencia social: consiste en que las ciudades tengan la capacidad de prepararse, adaptarse y recuperarse tras una afectación o crisis. Sobre esto, la fundación considera necesario que los vecinos tengan acercamientos y juntas en las que aprendan a desarrollar ésta cualidad en conjunto y estén plenamente conscientes de la disponibilidad de sus recursos y de la distribución de estos.
3. Vías de tránsito rápido: Referido a los corredores y a los carriles confinados para autobuses, metro, tranvía, ciclovías, etc. Estas son vías que no permiten el ingreso de vehículos privados.

A manera de profundizar, los factores anteriores guardan una estrecha relación con las 4 dimensiones que, The Rockefeller Foundation (2014), expone como resultado de su amplia experiencia en la investigación de ciudades resilientes en todo el orbe, para evaluar la capacidad de recuperación de una ciudad nos propone el estudio de 12 variables enfocándonos en el estudio de la resiliencia sísmica se mencionaran únicamente los más influyentes sobre el tema:

- Continuidad de los servicios fundamentales
- Comunicaciones confiables y movilidad eficiente.



Continuidad de los servicios fundamentales: caracterizado por una gestión activa, y mantenimiento de las infraestructuras esenciales que protegen y/o prestan servicios a los ciudadanos, esto aumenta las probabilidades de durabilidad de las infraestructuras y la mitigación de los impactos.

Comunicaciones confiables y movilidad eficiente: lo cual se consigue con sistemas de transporte multimodal y accesibles, redes tecnológicas de comunicación e información, planes de contingencia que faciliten la rápida evacuación de masas y la comunicación en casos de emergencia, de igual manera, asegura que las ciudades están bien integradas y conectadas, permitiendo a las comunidades, especialmente a las más pobres y vulnerables, movilizarse en caso de un evento catastrófico.

Sumado a lo anterior, en éste conjunto de requerimientos para ciudades que buscan la resiliencia, The Rockefeller Foundation (2014) ha propuesto 7 cualidades:

1. Reflexividad: característica de las personas e instituciones que a partir de experiencias pasadas reflexionan acerca de decisiones futuras modificando normas y comportamientos
2. Ingenio: población e instituciones son capaces de reconocer formas alternativas para utilizar los recursos de los que disponen durante una crisis y así satisfacer sus necesidades para lograr sus objetivos
3. Robustez: Se refiere al diseño bien concebido, construido y gestionado cuyo fracaso no es predecible, este concepto es parte fundamental de las “4R” de la resiliencia
4. Redundancia: cuando se tiene capacidad para deliberadamente dar cavidad a irrupciones, demandas o eventos externos. Incluye la diversidad para tener múltiples maneras de lograr satisfacer una determinada necesidad, este concepto es parte fundamental de las “4R” de la resiliencia.



5. Flexibilidad: Refiriéndose a la voluntad y capacidad para adoptar estrategias alternativas en respuesta a las circunstancias cambiantes, los sistemas pueden ser más flexibles a través de la introducción de nuevas tecnologías o conocimientos.
6. Inclusión: Proceso que hace hincapié en llevar a cabo una amplia consulta que permita la creación de un sentido de propiedad compartida o una visión conjunta para aumentar la resiliencia de la ciudad. Por ejemplo, una alerta temprana de riesgo, permitirá a las personas protegerse a sí mismos y minimizar pérdidas.
7. Integración: Proceso que reúne a los sistemas e instituciones para catalizar beneficios adicionales a partir de los recursos compartidos y así lograr resultados superiores.

Existen miles de variables que pueden ser empleados en el estudio de las ciudades en sus diferentes etapas de desarrollo y que pueden ayudar en la construcción y evaluación de la resiliencia; sin embargo, el reto principal está en identificar aquellas variables o indicadores que resulten realmente significativos para medir adecuadamente el grado de resiliencia en ciudades densamente pobladas, las que se han presentado en éste apartado, resultan insuficientes al no tomar en cuenta particularidades como el origen de la ciudad y el tipo de infraestructura presente en el área a estudiar. Siendo la infraestructura un elemento clave para la evaluación de la resiliencia, porque de ella dependen factores de suma importancia como la comunicación y la eficiencia de los servicios de emergencia inmediatamente después del evento sísmico.



2.3 Factores de riesgo en el entorno urbano

Entre los principales factores de riesgo están:

- Las infraestructuras debilitadas y los estándares de construcción inseguros que pueden provocar el desplome de estructuras.
- Los servicios de emergencia descoordinados, con la consiguiente disminución de la capacidad de respuesta y un estado de preparación insuficiente por parte de estos servicios.

2.3.1 ¿Qué es una ciudad resiliente?

- Es una ciudad en la que los desastres son minimizados porque la población reside en viviendas y barrios que cuentan con servicios e infraestructura adecuados, los cuales cumplen con códigos de construcción razonables, y en la que no existen asentamientos informales
- Tiene un gobierno local incluyente, competente y responsable que vela por una urbanización sostenible y destina los recursos necesarios para desarrollar capacidades a fin de asegurar la gestión y la organización de la ciudad antes, durante y después de un evento desfavorable
- Es una ciudad en la cual las autoridades locales y la población comprenden sus amenazas, crean una base de información local compartida sobre las pérdidas asociadas a la ocurrencia de desastres, tomando en cuenta quién está expuesto y quién es vulnerable ante los posibles eventos catastróficos
- Ha tomado medidas para anticiparse a los desastres y mitigar su impacto, mediante el uso de tecnologías de monitoreo y alerta temprana, con los cuales protege la infraestructura, los activos y las vidas humanas, incluyendo sus casas y bienes, el patrimonio cultural así como la riqueza (medioambiental o económica)



- Es capaz de responder e implementar estrategias inmediatas de recuperación además de restaurar rápidamente los servicios básicos necesarios para reanudar la actividad social, institucional y económica.

El resultado que pretende alcanzar el Marco de Acción (Hyogo 2005-2015) es reducir significativamente las pérdidas causadas por los desastres, en términos de vidas, bienes sociales, económicos y ambientales en las comunidades y países. Las cinco prioridades del Marco de Acción Hyogo (MAH) son:

1. Desarrollar capacidad institucional: para garantizar que la reducción del riesgo de desastres sea una prioridad nacional y local que cuenta con una sólida base institucional para su aplicación.
2. Conocer sus riesgos: identificar, evaluar y monitorear los riesgos de desastre y mejorar los sistemas de alerta temprana.
3. Incentivar la comprensión y la concientización pública: haciendo uso del conocimiento, la innovación y la educación, incentivar una cultura de seguridad y resiliencia en todos los niveles.
4. Reducir el riesgo: reducir los factores básicos de riesgo a través de medidas de planificación territorial, ambiental, social y económica.
5. Prepararse y estar listo para actuar: fortalecer la preparación en caso de desastre para asegurar una respuesta eficaz en todos los niveles.



3 MARCO METODOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA

3.1 Definición de la zona de estudio

La zona de estudio será el lugar en el que se llevara a cabo el análisis de resiliencia sísmica, esta zona debe estar perfectamente delimitada y de ser posible debe incluir todas aquellas edificaciones cercanas que brindaran servicio ante una emergencia (hospitales, estaciones de bomberos, unidades de protección civil, etc.).

3.2 Identificación de la infraestructura crítica

La base de la operatividad y buen funcionamiento de una gran ciudad es su infraestructura, para realizar un análisis de resiliencia se tiene que generar una base de datos de la infraestructura existente en el lugar, en dicha base de datos se deben de considerar edificios importantes como hospitales, dependencias de gobierno, escuelas y edificios con características particulares (inmuebles muy antiguos o parcialmente dañados por eventos sísmicos ocurridos en el pasado). También deben de tomarse en cuenta vías de acceso controlado, avenidas principales, avenidas secundarias, pasos a desnivel, puentes, túneles y líneas de transporte. Es recomendable realizar esta base de datos en algún Sistema de Información Geográfica (SIG). La importancia de considerar vías de acceso controlado en esta base de datos se debe a que estas vialidades satisfacen la demanda de movilidad continua de grandes volúmenes, cuentan con accesos y salidas a los carriles centrales en lugares precisos y son catalogadas como la columna vertebral de una red vial.



3.3 Selección de las curvas de fragilidad específicas

La fragilidad de la infraestructura está relacionada con su vulnerabilidad sísmica y se puede cuantificar mediante curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad se definen como la representación gráfica de la función de distribución acumulada, de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural, ante una acción sísmica determinada (Hanus, 1999).

En este estudio se ha adoptado la metodología de HAZUS (FEMA, 1999) que define estas curvas suponiendo que siguen una distribución de probabilidad tipo log normal. La hipótesis de una distribución de probabilidad log normal, permite definir cada curva de fragilidad mediante dos parámetros: el valor medio y la desviación estándar. De esta manera, las curvas de fragilidad se definen mediante la ecuación 3.1:

$$p[ED \geq ED_i] = \phi \left[\frac{1}{\beta_{ED}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{dED}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Donde:

- S_{dED} es el desplazamiento espectral medio para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%
- β_{ED} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado límite de daño, en otras palabras es la variabilidad asociada al estado de daño
- ϕ es la función de distribución normal estándar acumulada
- S_d es el desplazamiento espectral
- ED indica el estado de daño el cual viene definido como:
 - 1 para el estado de daño mínimo
 - 2 para moderado
 - 3 para severo
 - 4 indica el estado de daño completo (justo antes de que se produzca el colapso).



Es pertinente mencionar que para cada tipo de infraestructura deben buscarse las curvas de fragilidad que mejor se adapten a sus características.

3.4 Generación de una red simplificada

Para realizar el análisis de resiliencia debe generarse una red estratégica teniendo en cuenta solo las intersecciones y vialidades de mayor afluencia los cuales serán representados con nodos y arcos respectivamente. El bloqueo de la red de transporte desde el punto de vista de conectividad, depende de dos variables: 1) del deterioro de la misma vialidad a causa del sismo y 2) del bloqueo a causa de los escombros procedentes de edificios cercanos, este último bloqueo será calculado mediante un modelo “colapso/bloqueo” propuesto por (Argyroudis, 2012)

3.5 Calculo del riesgo sísmico

Las estructuras con un comportamiento sísmico inadecuado son la causa principal de las pérdidas humanas y económicas durante la ocurrencia de temblores intensos. Para analizar la resiliencia de las estructuras hay que comenzar por realizar estudios de riesgo sísmico, los cuales permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica y estimar el daño probable que puede sufrir alguna edificación a causa de un evento sísmico. Para llevar a cabo un análisis adecuado se debe disponer de una amplia información, que muchas veces no se tiene y, además, existe una gran cantidad de incertidumbres involucradas, por lo tanto, el tratamiento adecuado del problema es el probabilista. En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la infraestructura crítica mediante una metodología basada en un análisis probabilista de respuesta de sitio llevado a cabo con el programa computacional RADSH (Bárcena y Romo, 1994), dicho análisis de respuesta de sitio se complementa con las curvas de fragilidad adecuadas para cada caso.



3.5.1 Ambiente sísmico

El ambiente sísmico de un sitio en particular puede determinarse bajo dos enfoques (Gupta, 2002):

- 1) El análisis de peligro sísmico determinista
- 2) El análisis de peligro sísmico probabilista

La diferencia fundamental entre ellos es la forma de considerar la sismicidad del área de influencia. Por otro lado, los resultados de los análisis deterministas son más conservadores que los probabilistas (Klügel, 2008). En el método determinista se establecen los sismos más grandes posibles de cada fuente y se calcula el movimiento que generaría cada uno en el sitio de estudio. Sin tomar en cuenta los tiempos de recurrencia, se selecciona la magnitud y ubicación del evento o eventos considerados representativos del riesgo sísmico, para una zona determinada, que generalmente corresponde al máximo histórico. En función de éste, se establecen correlaciones y modelos espectrales para calcular los espectros específicos de respuesta. Este método permite reagrupar las fuentes sísmicas en diferentes rangos de distancia y calcular un espectro para el movimiento de cada distancia a la fuente. Este tipo de evaluación se caracteriza por presentar escenarios sísmicos específicos, en donde la incertidumbre no se incluye en el análisis final.

El método probabilista permite obtener probabilidades anuales de excedencia, para el parámetro del movimiento del terreno que se considera representativo del riesgo sísmico (Esteva, 1967; Cornell, 1968). En las primeras etapas del desarrollo del método, el parámetro de referencia era la aceleración máxima del terreno, PGA. Con el desarrollo de leyes de atenuación para parámetros espectrales fue posible la construcción de espectros de diseño en los que se considera la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los periodos de interés en ingeniería sísmica. De este modo surgen los espectros de peligro uniforme (UHS, Uniform Hazard Spectra), que se construyen representando “punto a punto” las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo período de retorno (Trifunac *et al.*, 1987).



En ambos métodos, la cuantificación del peligro sísmico presenta varias limitaciones, tales como:

- 1) Gran parte de la información geológica y tectónica es interpretativa y se emplea para caracterizar mecanismos no muy bien conocidos
- 2) Los modelos de sismicidad, propagación y atenuación son simplificaciones de un fenómeno mucho más complejo
- 3) Los tiempos de recurrencia tienen una gran incertidumbre
- 4) Los catálogos sísmicos cubren periodos relativamente cortos de sismicidad
- 5) Algunas de las variables involucradas en el proceso son poco conocidas, por lo que presentan grandes incertidumbres.

En la Tabla 3.1 se resumen los métodos de análisis de peligro sísmico recomendados según su aplicación (Klügel, 2008)

Tabla 3.1 análisis de peligro sísmico (Klügel, 2008)

Aplicación	Objetivo del análisis	Método recomendado
Diseño	Infraestructura critica cuya vida útil sea corta	Análisis de peligro sísmico determinista
	Infraestructura critica cuya vida útil sea larga	Análisis de peligro sísmico determinista o probabilista
	Estructuras civiles en general	Análisis de peligro sísmico determinista
	Estructuras civiles en general e instalaciones industriales	Análisis de peligro sísmico probabilista
Evaluación de seguros de riesgo	Infraestructura critica	Análisis de peligro sísmico probabilista
Riesgo técnico	Infraestructura critica	Análisis de peligro sísmico probabilista



3.5.2 Identificación de las fuentes sismo génicas

Definición de las fuentes sismogénicas que influyen en el comportamiento dinámico del área de estudio, Figura 3.1

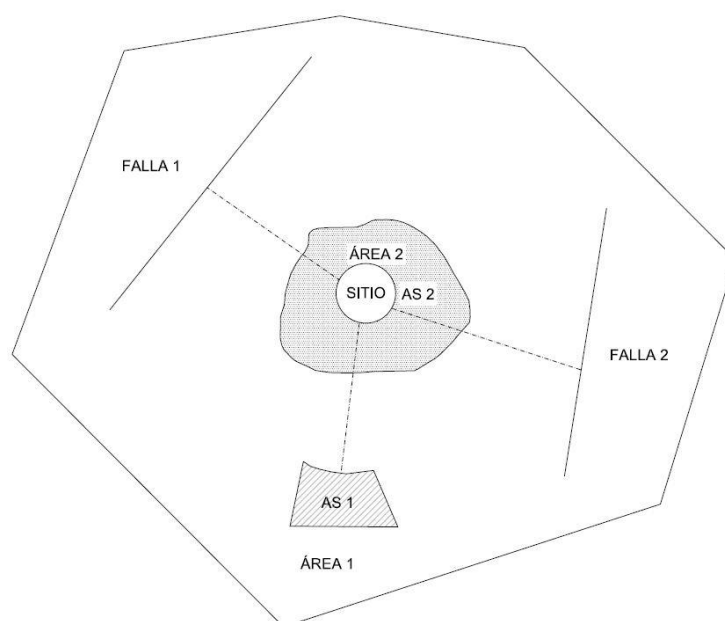


Figura 3.1. Identificación de las fuentes sismogénicas (Klügel et al., 2008).



3.5.3 Caracterización de los modelos de recurrencia

Los modelos de recurrencia permiten determinar el tiempo promedio que tiene que pasar para tener un terremoto con características iguales, en un sitio determinado.

Modelo de Gutenberg–Richter

Con base en el conocimiento de que las fallas tectónicas son capaces de producir sismos de diversas magnitudes, (Gutenberg y Richter, 1954) fueron los primeros investigadores que realizaron estudios relacionados con la observación de la magnitud de los sismos.

Notando que la distribución del tamaño de los sismos en una región sigue generalmente una distribución particular, dada por la ecuación 3.2:

$$\log (\lambda_m)= a - bm \quad (3.2)$$

Donde:

- λ_m , es la tasa de excedencia de sismos con magnitud mayor o igual que m
- (a y b) son constantes y se estiman mediante el análisis estadístico de las observaciones históricas de sismos y de datos obtenidos a partir de evidencia geológica, el valor de (a) indica la tasa total de sismos en la región y (b) indica la razón de sismos de magnitud pequeña y grande.



Comúnmente la ecuación 3.2 se denota en forma acumulativa complementaria y exponencial, como:

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(M-M_0)}, & M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , M > M_u \end{cases}$$

Donde:

- λ_0 , es la tasa de excedencia para $M = M_0$
- M_0 , es la magnitud mínima de referencia
- $\beta = (b) \ln(10)$
- M_u , es la magnitud máxima considerada.

Modelo Gutenberg-Richter Modificado

Este modelo es una modificación del modelo de Gutenberg y Richter y fue propuesto por Cornell y Vanmarke, es un modelo muy similar al de Gutenberg y Richter para magnitudes cercanas a M_0 , pero muestra una transición suavizada cuando $\lambda(M)$ tiende a cero,

en $M = M_u$, evitando la caída abrupta que presenta el modelo Gutenberg y Richter. Este modelo queda expresado como:

$$\lambda(M) = \begin{cases} \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}, & M_0 \leq M \leq M_u \\ 0 & , M > M_u \end{cases}$$

Es conveniente aclarar, que para cada fuente sísmica se evalúa un modelo de recurrencia de eventos y un modelo de recurrencia temporal de los mismos. Para el modelo de recurrencia de los sismos se utiliza la relación frecuencia-magnitud de Richter y para el modelo de recurrencia temporal, se usa el proceso estocástico de Poisson, Figura 3.2.

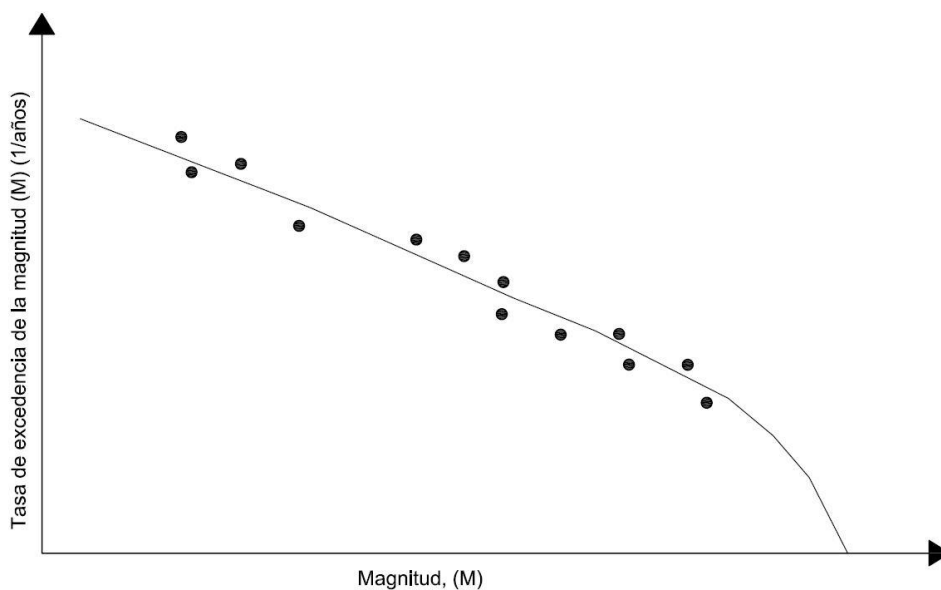


Figura 3.2. Modelo de recurrencia (Klügel et al., 2008).



3.5.4 Definición de la relación de atenuación

La función de atenuación relaciona el movimiento del suelo en un sitio dado, a través de un parámetro genérico del movimiento, “Y”, que por lo general es una aceleración o una velocidad, con el parámetro que establece el tamaño del sismo en la fuente (ej. magnitud, M), distancia desde el sitio a la zona de liberación de energía (R), y una medida de la dispersión del modelo, matemáticamente se genera la ecuación 3.3 (integral del riesgo sísmico)

$$\lambda(y) = \sum_{i=1}^N v_i \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{M_{min}}^{M_{max}} f_{Mi}(M) f_{Ri}(R) P_i[Y > y | M, R] dM dR \dots \text{Ec 3.3}$$

Donde la integral doble tiene como límites el valor mínimo y máximo de la magnitud y de las distancias a la fuente. $\lambda(y)$ representa la tasa anual de que se supere el nivel de movimiento “y”, debido a la ocurrencia de terremotos en las fuentes, “N”, es la suma de las tasas anuales de excedencia $\lambda(y)$ en cada una de las fuentes (que tienen una tasa anual de ocurrencia sísmica v_i). El término $P_i[Y > y | M, R]$ da la probabilidad de excedencia de “y”, condicionado a las variables M y R. Por último, las funciones $f_{Mi}(M)$ y $f_{Ri}(R)$ son funciones de densidad de probabilidad, de la magnitud y la distancia, respectivamente. El modelo de atenuación describe el efecto producido en un sitio lejos de la fuente sísmica, debido a la ocurrencia de un evento en la misma. Las relaciones de atenuación se expresan como una función matemática que relaciona el parámetro de movimiento del terreno firme o roca, por ejemplo, la aceleración máxima del suelo (PGA), con los parámetros que caracterizan al sismo. La aceleración en el sitio depende principalmente de dos parámetros, tipo de suelo y distancia epicentral, en la Figura 3.3 se muestra la relación de atenuación.

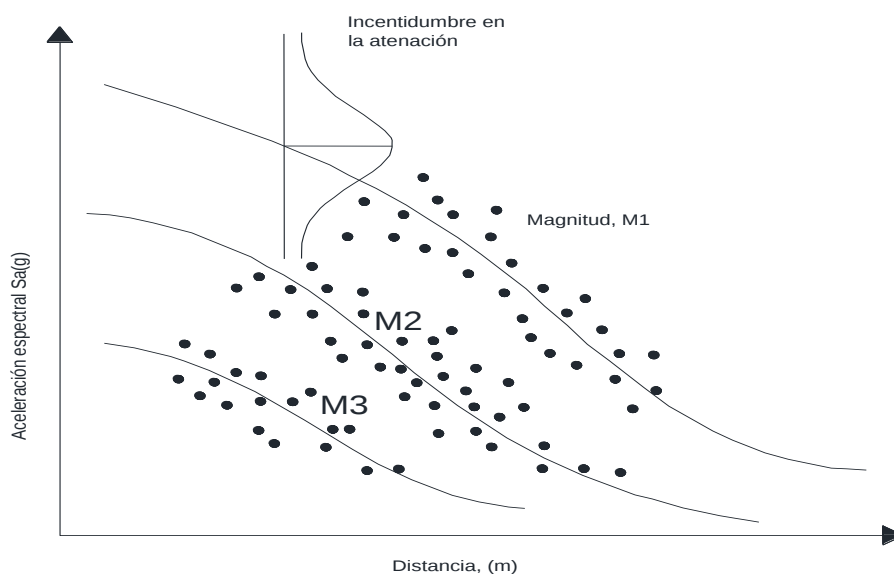


Figura 3.3. Relación de atenuación (Klügel et al., 2008).

3.5.5 Definición de las zonas geotécnicas que se ven involucradas en el estudio

Definir la zonas geotécnicas sobre las cuales se encuentra ubicada el área de estudio, con la finalidad, de poder determinar los perfiles estratigráficos característicos de dicha zona y así poder realizar un análisis de respuesta de sito adecuado.

3.5.6 Espectros de peligro uniforme (EPU)

El espectro de peligro uniforme representa la relación que existe entre el periodo natural de vibración del suelo (T) y una aceleración espectral (S_a), para una probabilidad de excedencia dada, asociada a un periodo de retorno, en la Figura 3.4 se muestra esquemáticamente el procedimiento a seguir para obtener un espectro de peligro uniforme

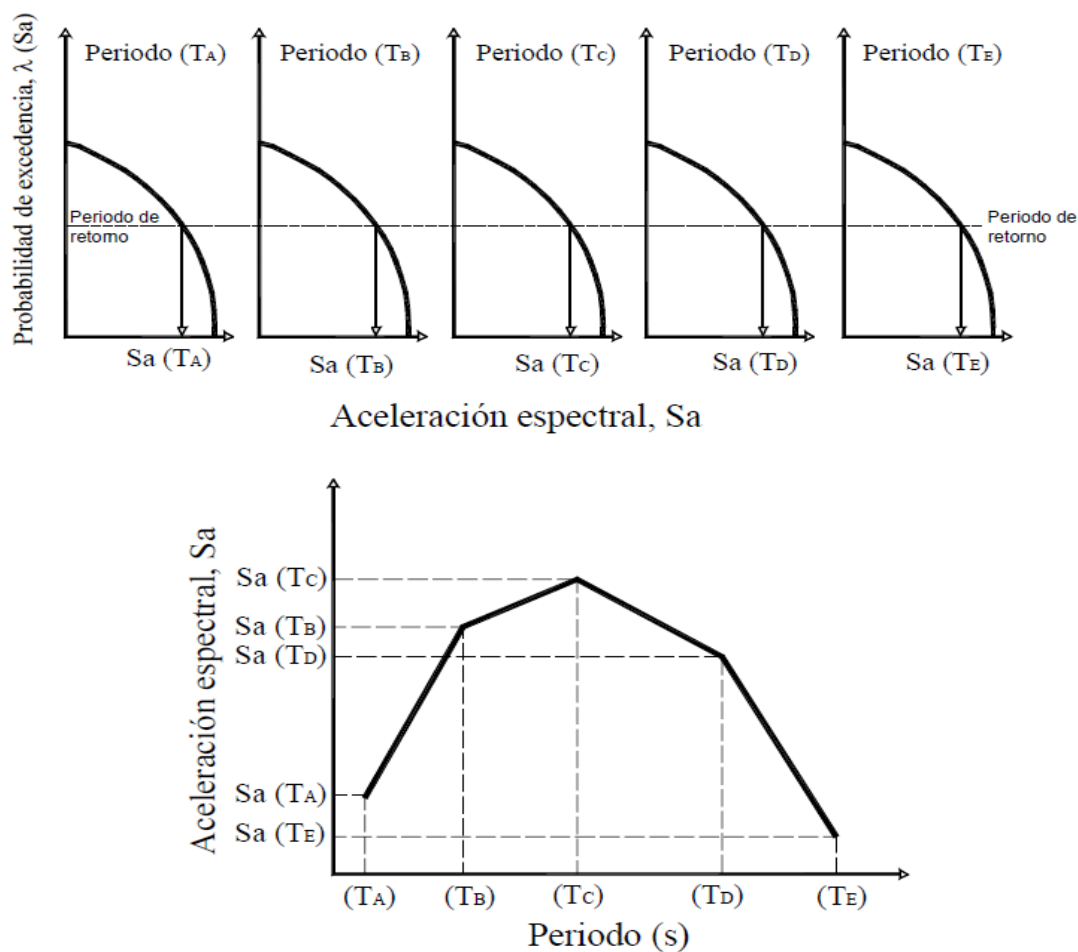


Figura 3.4. Determinación de un espectro de peligro uniforme.

En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran los espectros de peligro uniforme para un sismo normal y para un sismo de subducción respectivamente contemplando en ambos casos periodos de retorno de 125, 250, 475 y 2475 años.

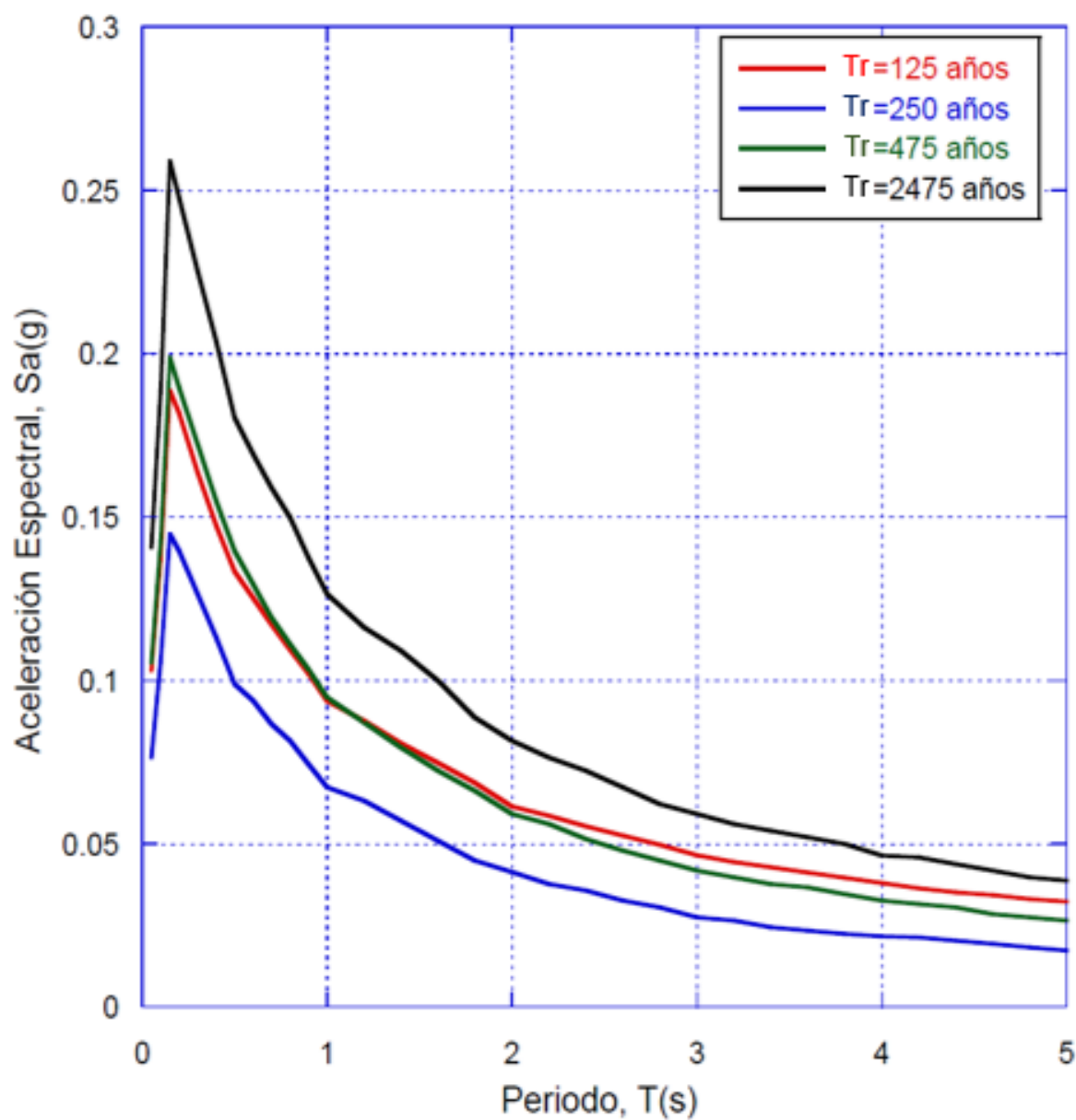


Figura 3.5. Espectros de peligro uniforme para sismos normales.

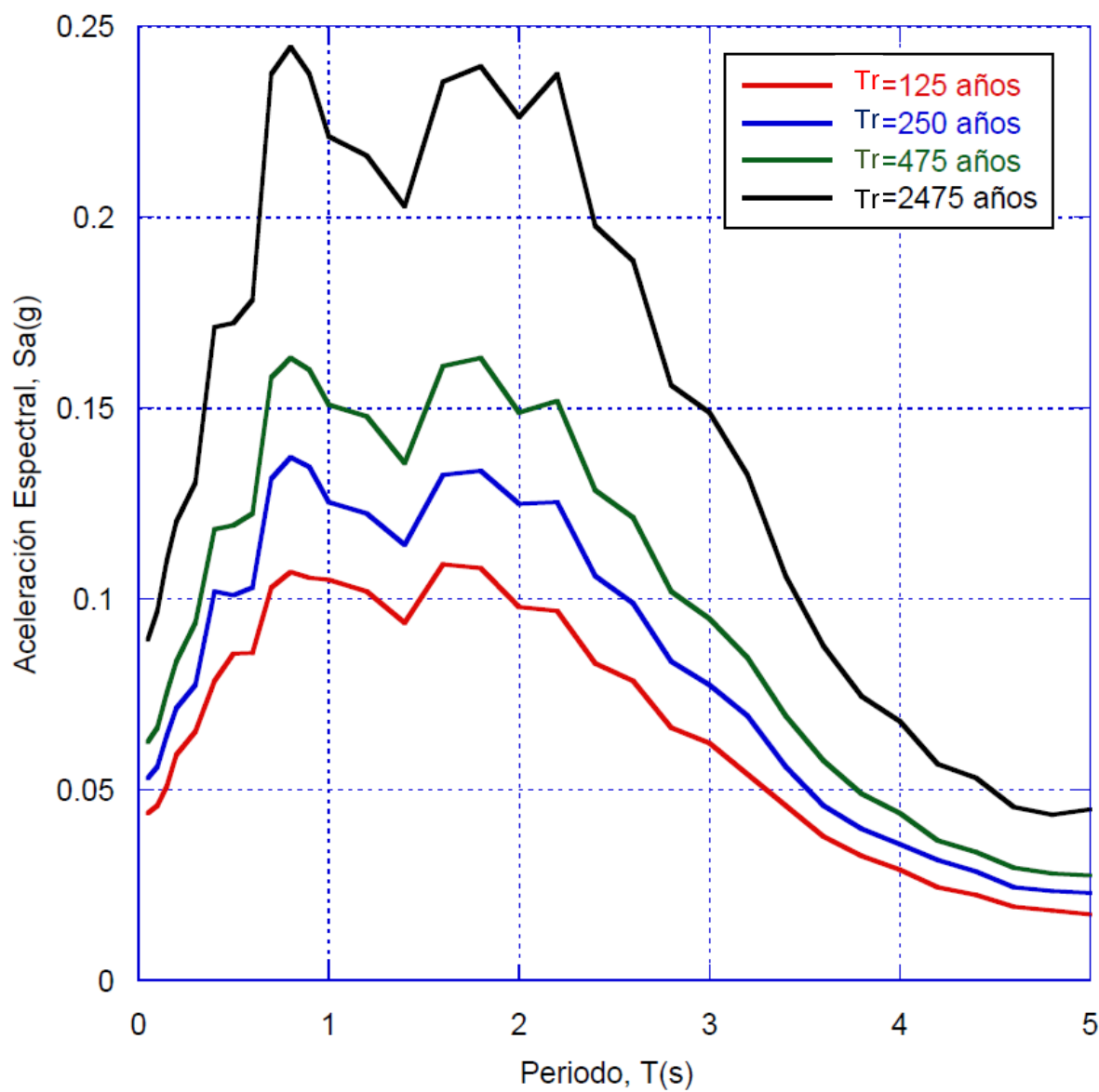


Figura 3.6. Espectros de peligro uniforme para sismos de subducción.

3.5.7 Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio de un depósito de suelo consiste en predecir el comportamiento de éste ante una excitación sísmica, de este análisis, generalmente se obtienen historias de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, esfuerzos y deformaciones dinámicas para estimar riesgos asociados a los movimientos del terreno, y así determinar las fuerzas inducidas por un sismo, mismas que puedan llevar a la inestabilidad del terreno y de las estructuras que soporta. Los análisis de respuesta de sitio unidimensionales se basan en la suposición de que todas las fronteras son horizontales y que la respuesta de un depósito de suelo es predominantemente causada por las ondas de corte horizontales, SH, que se propagan verticalmente desde los estratos de mayor impedancia dinámica, comúnmente denominado estrato firme o lecho de roca (Figura 3.7) para estos análisis se asume que el suelo y la superficie de la base se extienden infinitamente en la dirección horizontal.

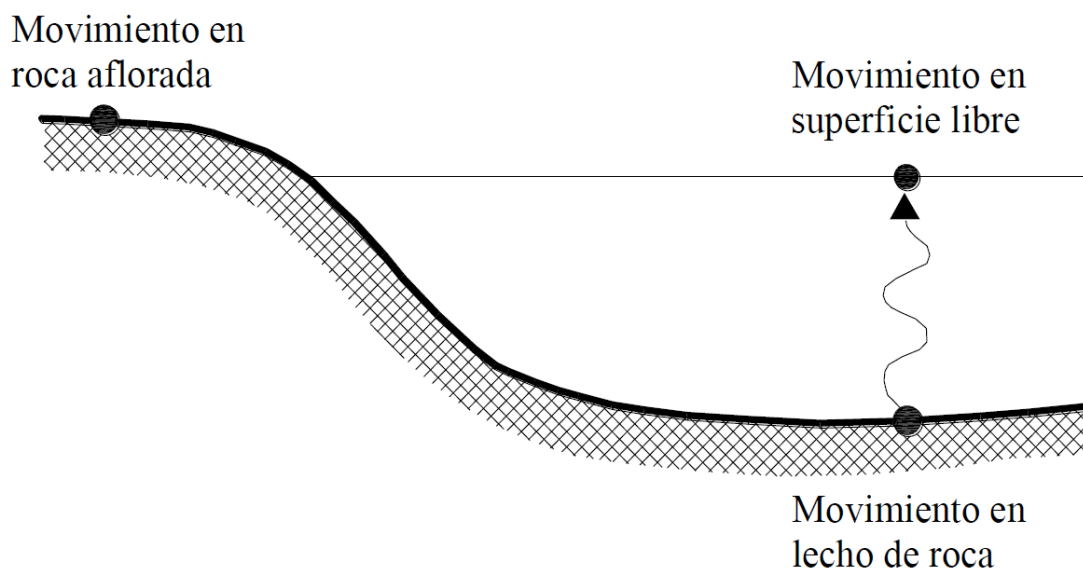


Figura 3.7. Nomenclatura de respuesta de sitio.



Los análisis de respuesta de sitio tradicionalmente son subdivididos en aquellos que resuelven el problema de propagación de ondas en el dominio de la frecuencia y los que lo resuelven en el dominio del tiempo. La primera categoría, incluye programas como SHAKE (Schnabel et al., 1972), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio unidimensional, Figura 3.8 y FLUSH (Lysmer et al., 1975), que lleva a cabo un análisis de respuesta de sitio bidimensional. En la segunda categoría podemos citar programas como el QUAD4 (Idriss et al., 1973) y más recientemente el QUAD4M (Hudson et al., 1994). Todos estos programas usan un procedimiento lineal equivalente, en el cual se aproxima el comportamiento no lineal del suelo a través de una rigidez y amortiguamiento representativos obtenidos de un proceso iterativo que los hace compatibles con una fracción determinada de la deformación angular máxima observada durante el sismo. Esta fracción generalmente varía entre 0.40 y 0.75, para niveles de excitación de moderada a alta respectivamente. Los análisis de respuesta de sitio también se pueden clasificar en deterministas y probabilistas (atendiendo al tipo del movimiento de entrada), siendo un ejemplo del primero los análisis de respuesta de sitio realizados con el programa SHAKE, y del segundo los realizados con el programa RADSH (Bárcena y Romo, 1994).

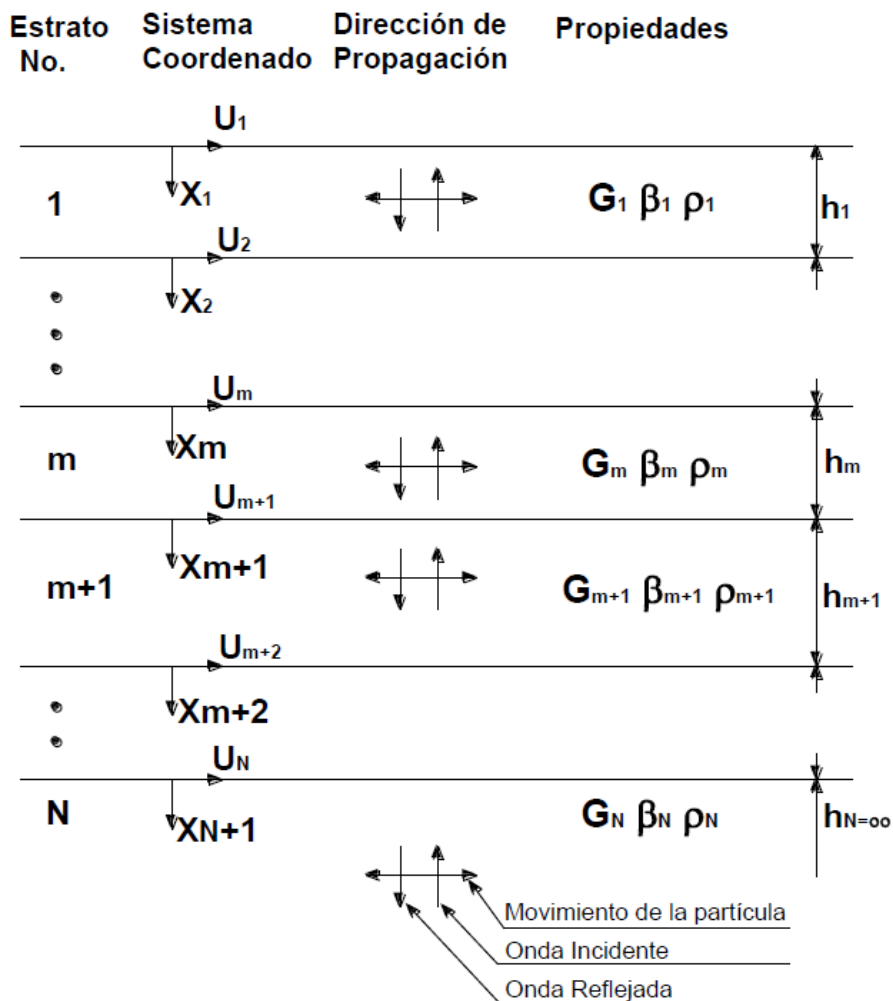


Figura 3.8. Sistema unidimensional.

Un procedimiento analítico que usa el enfoque probabilista fue introducido por Romo (1976) para el análisis de la respuesta dinámica de sistemas suelo-estructura. En éste se propone considerar al espectro de diseño como la respuesta extrema media de un proceso aleatorio equivalente. Este tratamiento aleatorio de los eventos sísmicos se ha incorporado en el programa computacional RADSH para el análisis probabilista de la respuesta dinámica de depósitos de suelo estratificados horizontalmente sujetos a la propagación bidimensional de ondas de corte SH, utilizando la solución de Thomson-Haskell (1953).



En este proceso se usa el método lineal-equivalente para simular el comportamiento no-lineal de los materiales térreos. Un análisis con enfoque probabilista considera los movimientos sísmicos como fenómenos aleatorios, suponiéndolos como un proceso gaussiano con media cero, con lo que el fenómeno aleatorio queda completamente caracterizado por su espectro de potencia; físicamente, tal definición del ambiente sísmico es equivalente a considerar una infinidad de historias de aceleraciones con el mismo contenido de frecuencias medio pero con fases aleatoriamente distribuidas (Romo, 1976).

3.5.8 Evaluación de la probabilidad de falla

Con base en las curvas de fragilidad se evalúa la probabilidad de que los diversos componentes críticos en el área de estudio fallen, tomando como magnitud de la intensidad sísmica el PGA o PGD resultante del análisis de la respuesta de sitio, valor con el cual se entra al eje de las abscisas de la curva de fragilidad apropiada para leer un porcentaje de probabilidad de falla de relacionado a un estado de daño.

3.5.9 Evaluación de la resiliencia

La resiliencia sísmica representa la capacidad del sistema para soportar un evento extremo y posteriormente recuperarse a un nivel de funcionalidad satisfactorio. Por lo tanto, el índice de resiliencia se define a través de la expresión 3.4 (Karamlou y Bocchini, 2015), (Dong y Frangopol, 2015) y (Venkittaraman y Banerjee)

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_h} Q(t) dt \bar{Q}}{t_h} \quad (3.4)$$



Donde R es el índice de resiliencia, t_0 es el tiempo de ocurrencia del evento extremo, t_h es el tiempo que tardara el sistema en recuperar su funcionalidad y $Q(t)$ es la funcionalidad, misma que es desarrollada en la ecuación 3.5

Ec.3.5, Función $Q(t)$

$$\bar{Q}(t) = \sum_{s=1}^{n_{IM}} P(IM = s) \sum_{d=1}^{n_{DS}} P(DS = d | IM = s) Q_d(t) \quad (3.5)$$

En la que $Q_d(t)$ es la función de recuperación de funcionalidad de la estructura en el tiempo t con un nivel de daño inicial d , esta funcionalidad suele presentarse en forma de porcentaje tomando en cuenta la capacidad de servicio que presenta un sistema habitualmente, $P(DS = d | IM = s)$ se calcula a partir de las curvas de fragilidad y es la probabilidad condicional de estar en el estado de daño d dado el escenario del evento con IM igual a s , finalmente, $P(IM = s)$ es la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos generando la intensidad s , calculada por un análisis de riesgo sísmico probabilístico realizado en la zona de estudio.

Para el análisis de resiliencia probabilística, la funcionalidad esperada de la estructura en cada instante t después de ocurrido un evento extremo puede estimarse usando un enfoque basado en el teorema de probabilidad total, la ecuación 3.5 se puede utilizar para calcular la funcionalidad esperada. En el manual de (Hazus, 1999) se proponen distintos tipos de funciones de recuperación de acuerdo al tipo de infraestructura a evaluar.



4 CASO ESTUDIO: ANALISIS DE LA RESILIENCIA SISMICA EN UNA ZONA DENSAMENTE POBLADA AL SUR DE LA CIUDAD DE MEXICO.

4.1 Definición de la zona de estudio

Se ha elegido como caso de estudio un área estratégica al sur de la Ciudad de México (Figura 4.1), las cualidades de esta zona son que en ella se encuentran diversos sistemas de transporte e infraestructura crítica de los cuales depende el buen funcionamiento de dicha zona, algunos atributos del área de estudio son los siguientes:

- Autobuses de tránsito rápido, BRT (Metrobús)
- Sistema subterráneo de transporte colectivo (Metro)
- Tren ligero
- Pasos elevados
- Puentes y vías urbanas
- Dos estaciones de transferencia modal (Taxqueña y C.U)
- Dos estadios (Olímpico universitario y Azteca)
- Una gran zona de hospitales

Por otra parte sobre la zona también se desplanta un número considerable de edificios importantes, suburbios, edificios gubernamentales, escuelas y universidades. La zona está comprendida por las tres diferentes zonas geotécnicas que de acuerdo al código de construcción de la Ciudad de México son clasificadas como:

- Zona I o de Lomas, formada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades, cavernas y túneles.



-
- Zona II o de transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros
 - Zona III o lacustre, integrada por grandes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con un contenido diverso de limo y arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas o muy compactas y de espesor variable el cual va de centímetros a algunos metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales.

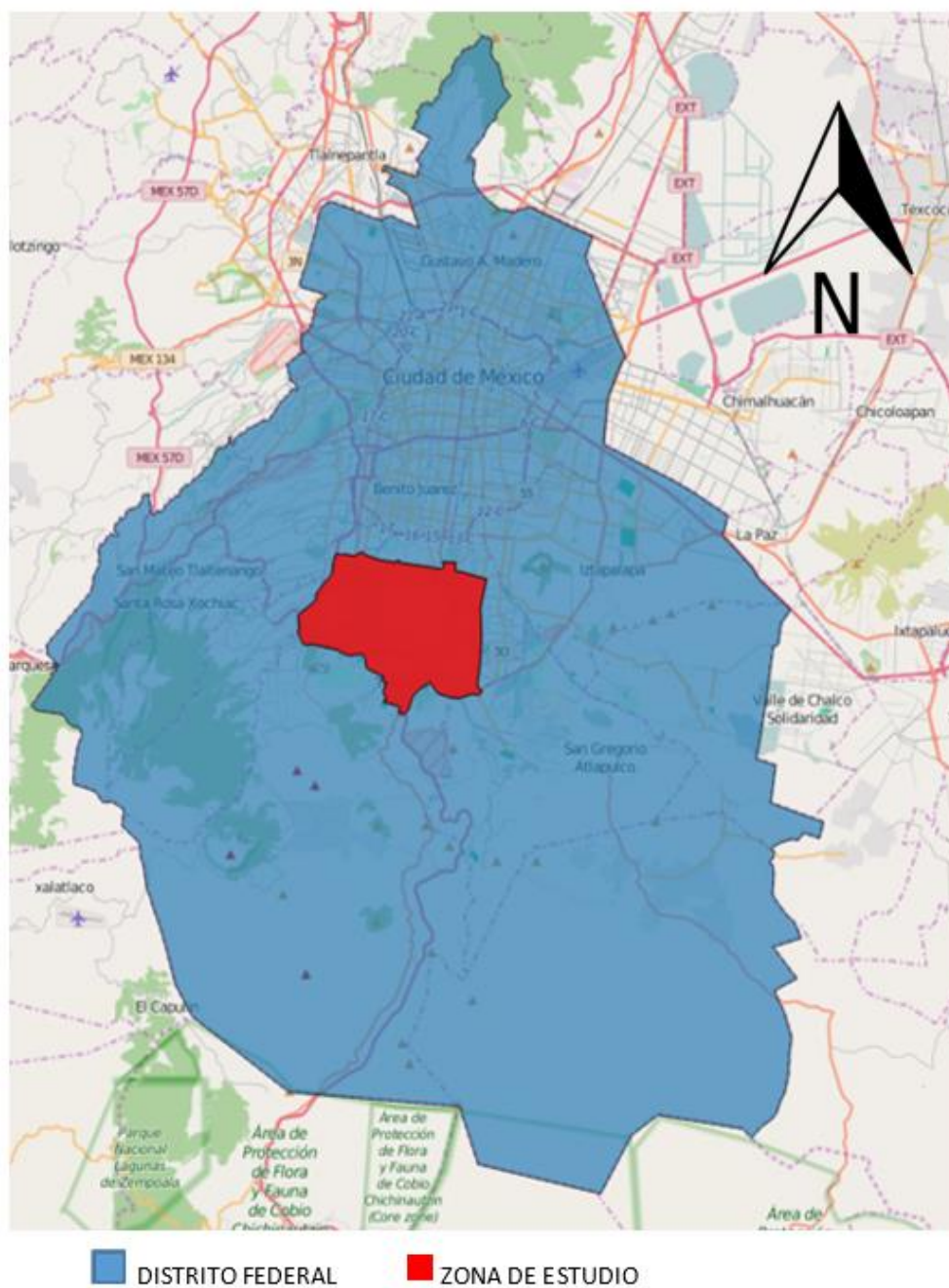
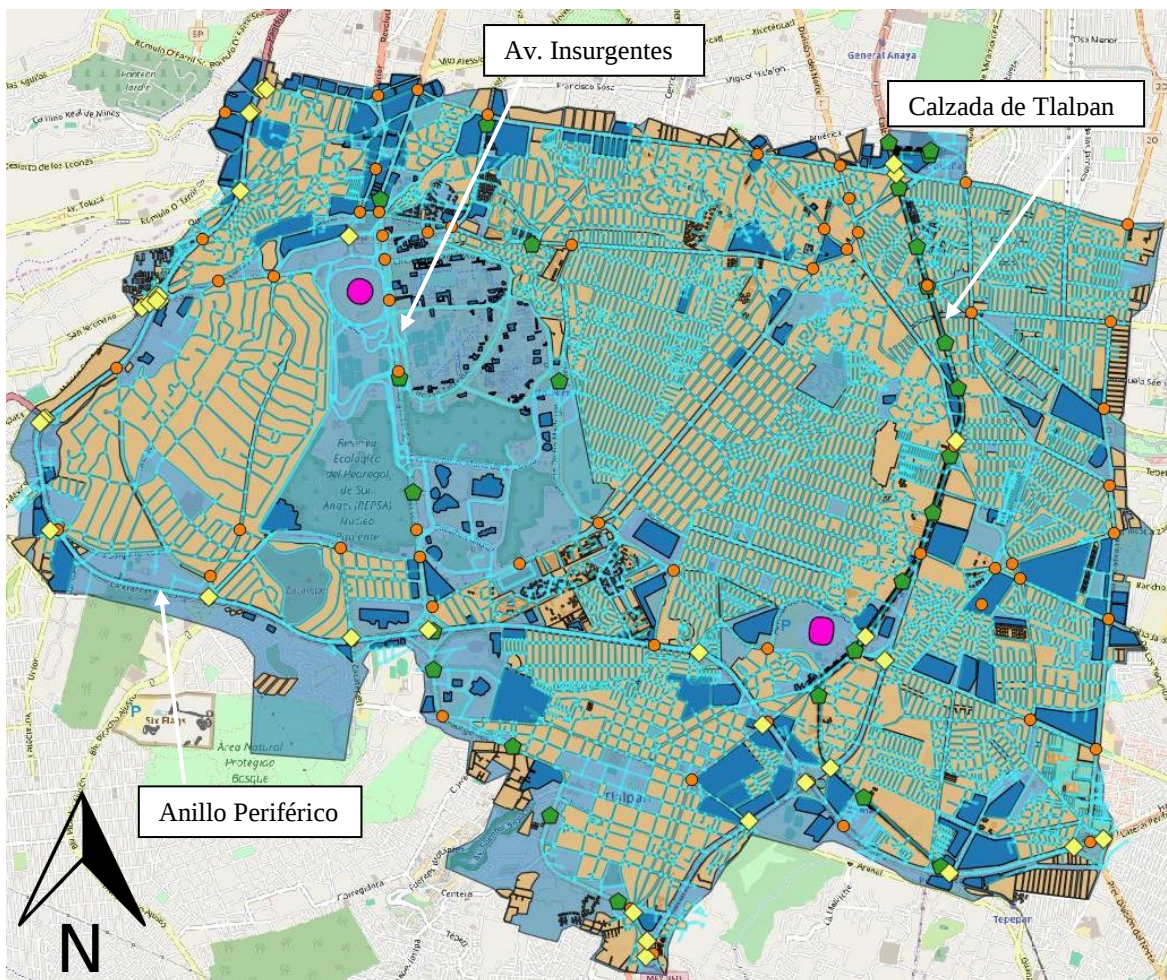


Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio.



4.2 Identificación de la infraestructura crítica

La base de la operatividad y buen funcionamiento de una gran ciudad es su infraestructura, para realizar este análisis de resiliencia se llevó a cabo un levantamiento de infraestructura crítica, considerando edificios importantes como hospitales, dependencias del gobierno, escuelas y edificios con características particulares (muy antiguos o anteriormente dañados por eventos telúricos). También se generó de manera digital una red de transporte tomando en cuenta vías de accesos controlados (boulevard Adolfo López Mateos), avenidas principales y secundarias, pasos a desnivel, puentes, túneles y líneas de transporte, en la Figura 4.2 se observa la infraestructura estratégica tomada en cuenta para evaluar la resiliencia sísmica del caso estudio.



Símbolo	Tipo de infraestructura
	Puentes y pasos a desnivel
	Sistemas de transporte (metro, metrobús y tren ligero)
	Nodos en vialidades importantes
	Vialidades
	Edificios
	Manzanas
	Estadios

Figura 4.2. Zona de estudio e infraestructura estratégica.



4.3 Curvas de fragilidad

Para evaluar la vulnerabilidad de la red de avenidas y de la infraestructura crítica se eligieron curvas de fragilidad apropiadas según el tipo de estructura (Tabla 4.1) estas curvas son un elemento clave en la evaluación probabilista del riesgo sísmico, relacionan la intensidad sísmica con la probabilidad de alcanzar o superar un nivel de daño (p. ej. leve, moderado, severo y completo) para cada elemento en riesgo. La magnitud de la intensidad sísmica puede cuantificarse utilizando diversos parámetros, incluyendo la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad pico del terreno (PGV), la deformación permanente del suelo (DGP), el desplazamiento (D), la aceleración espectral, la velocidad espectral o el desplazamiento espectral.

Tabla 4.1. Curvas de fragilidad utilizadas en este análisis.

Infraestructura	Referencia	Medida de Intensidad	Daño
Edificios de concreto	(Bull Earthquake Eng.2016)	PGA	Desnivel de entrepiso
Edificios de acero	(Kiani et al. 2016)	PGA	Desnivel de entrepiso
Edificios de mampostería	(Pitilakis et al., 2016)	PGA	Desnivel de entrepiso
Puentes	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGA	Colapso
Metro y BRT	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGA	Agrietamiento
Tren ligero	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGA	Agrietamiento
Avenidas	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD	Agrietamiento
Vías urbanas	(Hazus-MH Technical Manual. 1999)	PGD	Agrietamiento

Las curvas enlistadas anteriormente se muestran en las Figuras 4.3 a 4.9.

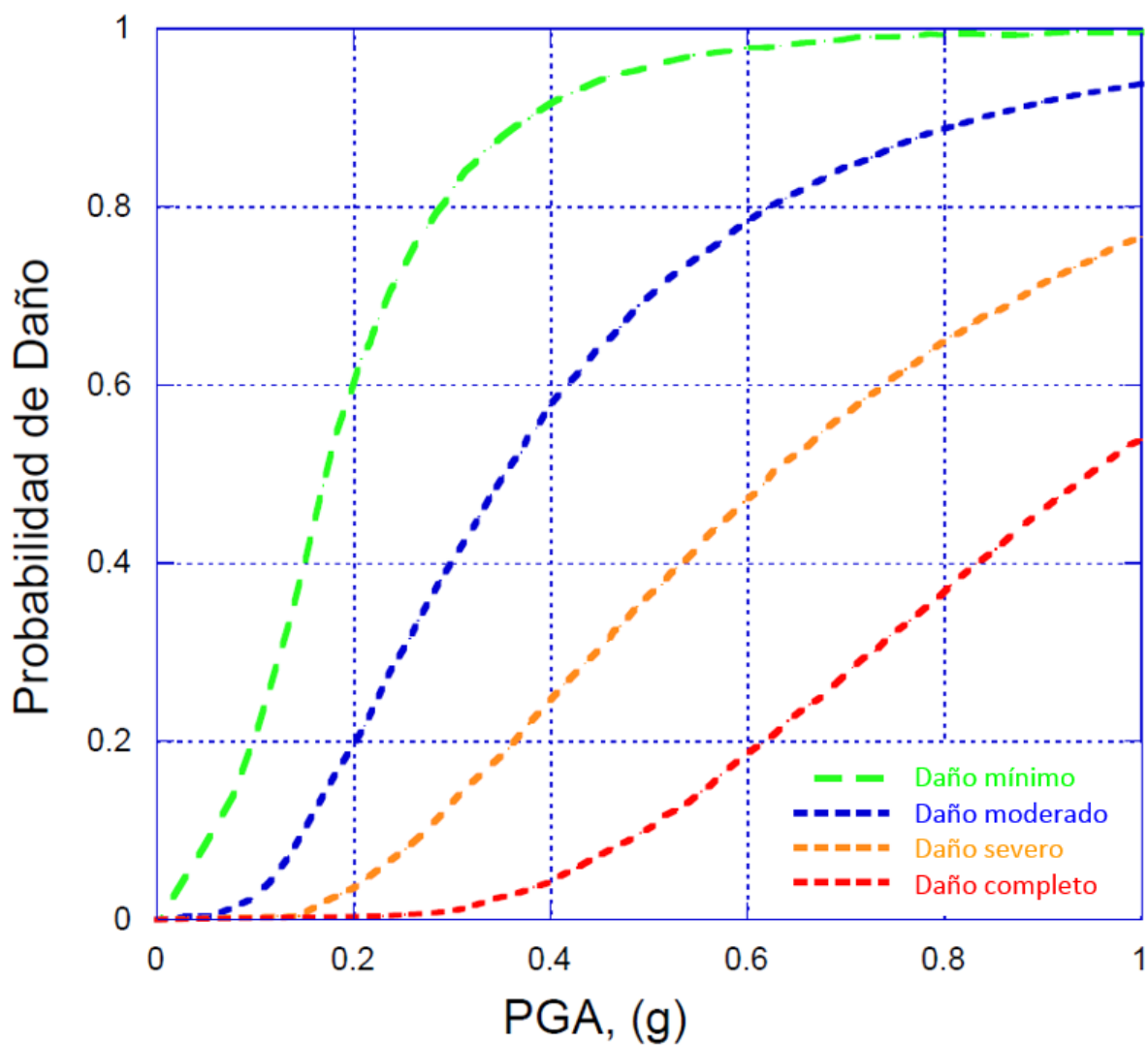


Figura 4.3. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en edificios de concreto reforzado, (Bull Earthquake Eng.2016).

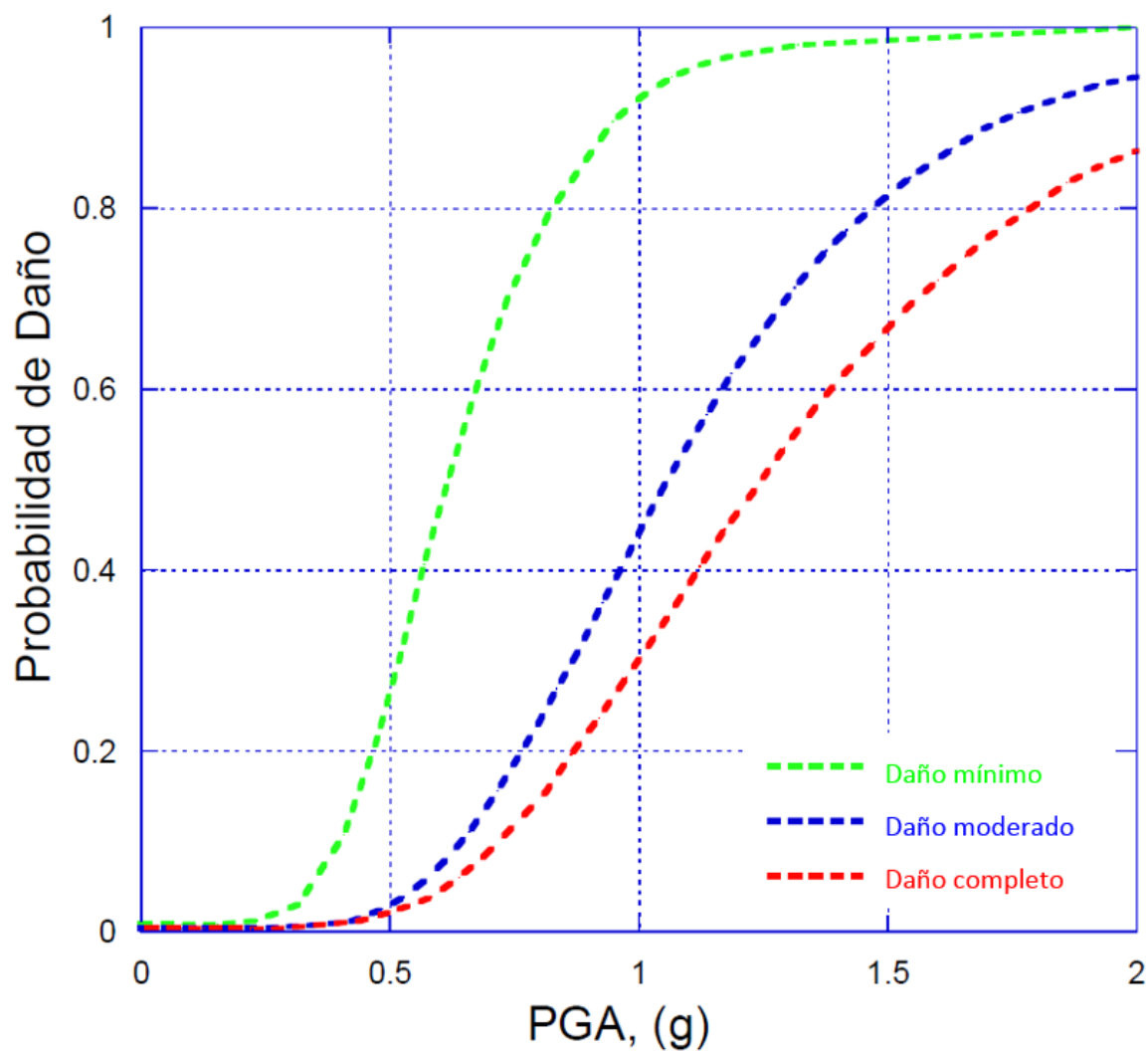


Figura 4.4. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en edificios de acero, (Kiani et al. 2016).

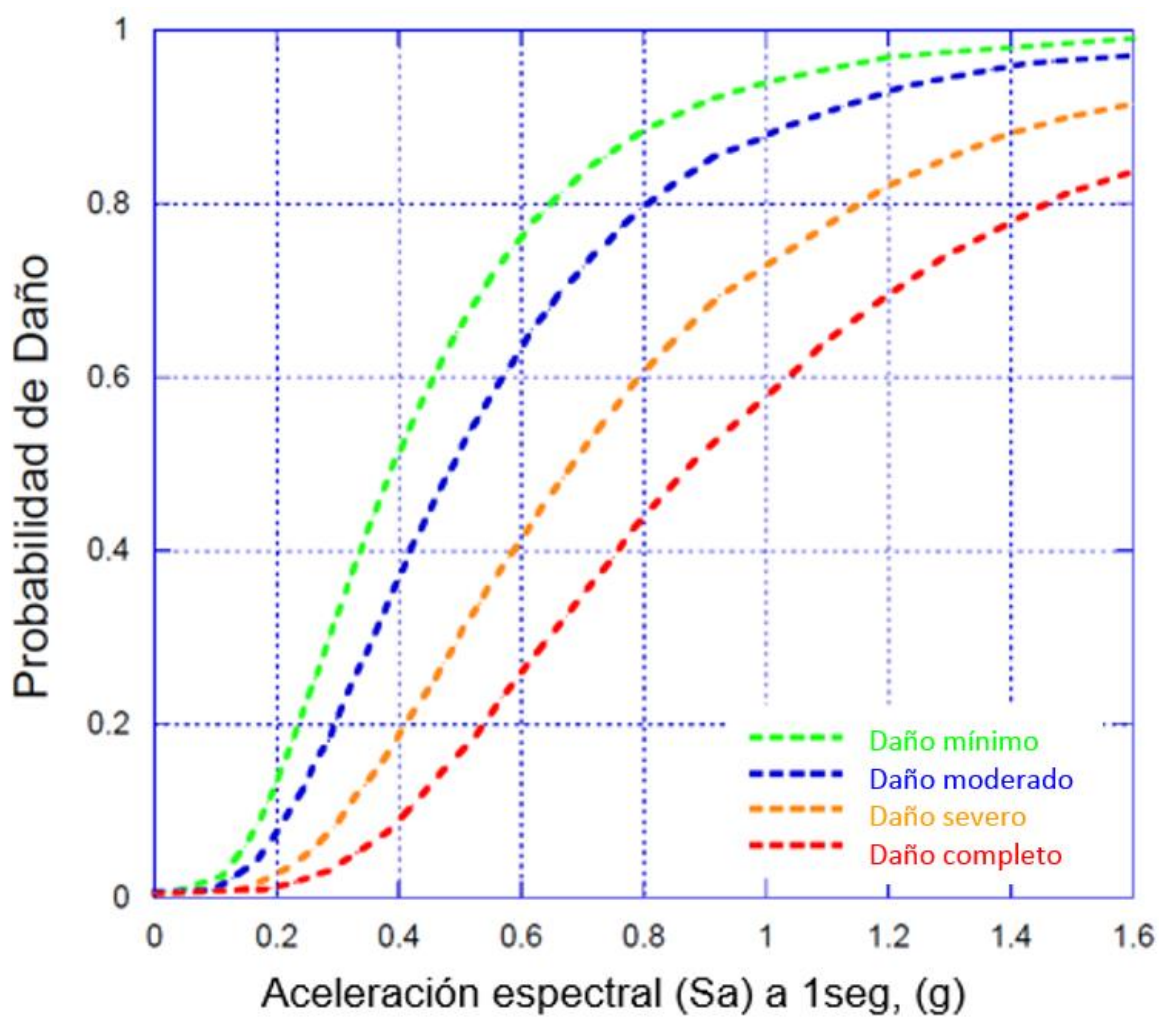


Figura 4.5. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en puentes, (Hazu-MH Technical Manual. 1999).

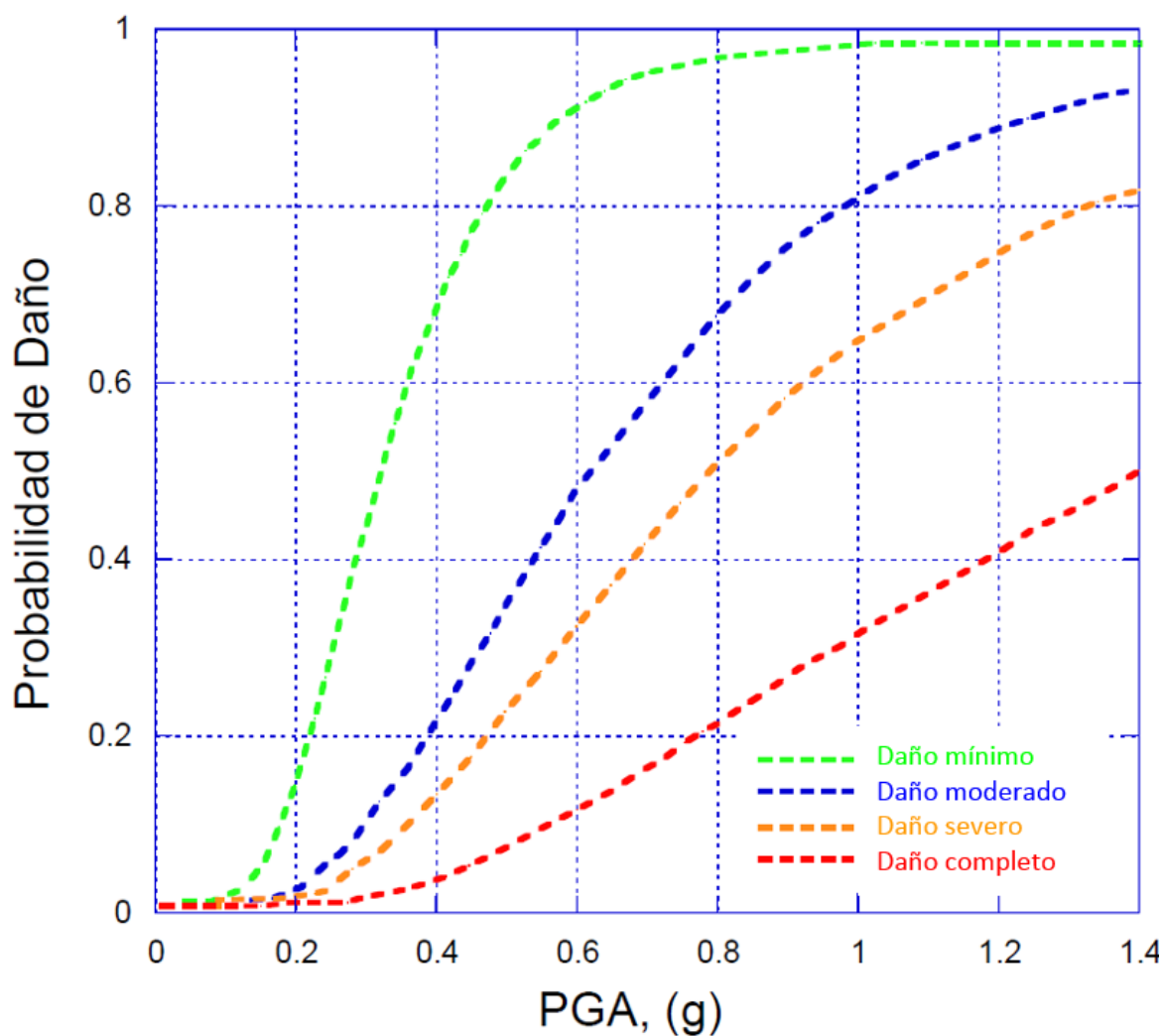


Figura 4.6. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en sistemas de transporte como metrobús (BRT) y metro, (Hazus-MH Technical Manual. 1999).

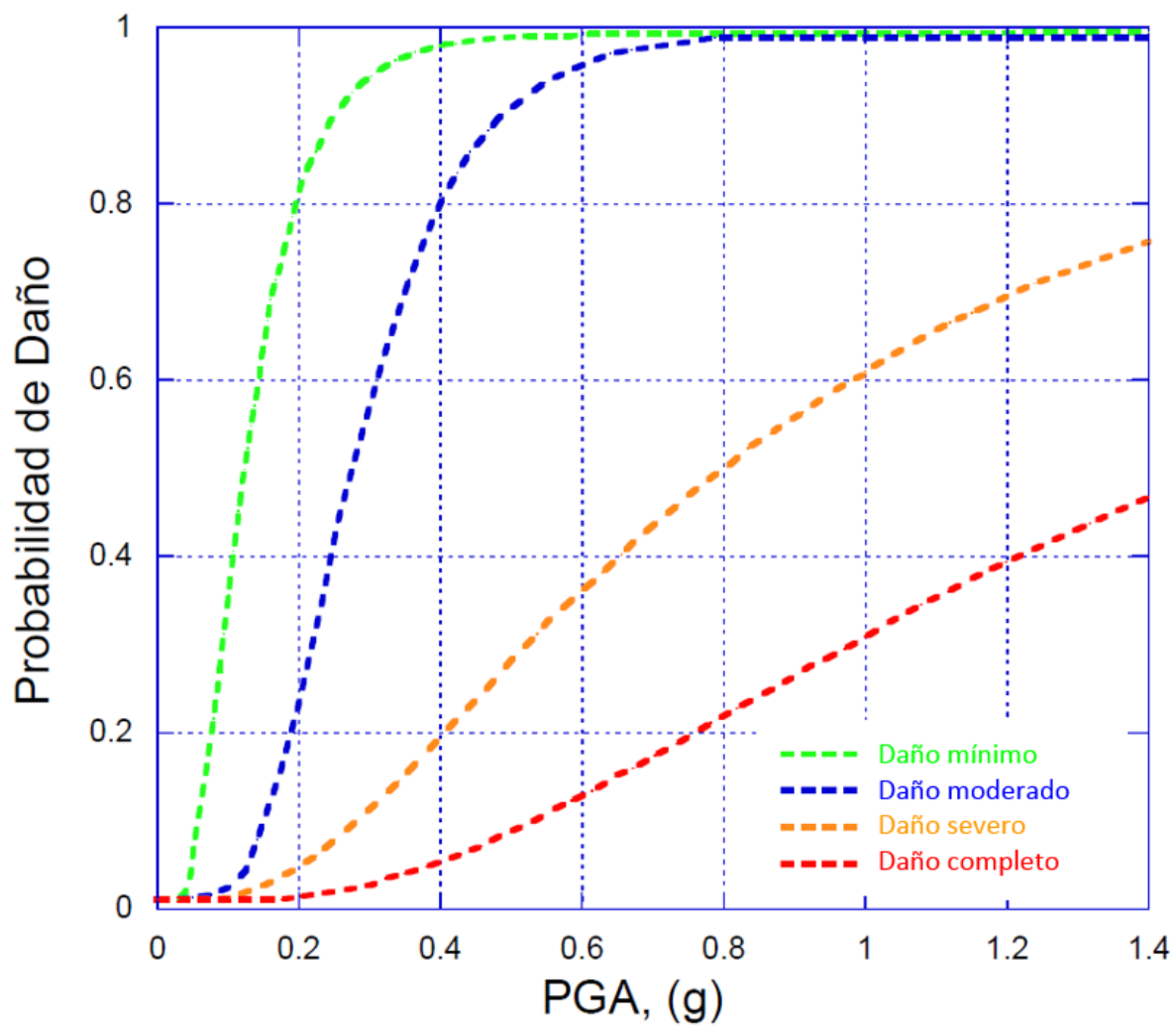


Figura 4.7. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en las vías del sistema de transporte colectivo denominado tren ligero, (Hazus-MH Technical Manual. 1999).

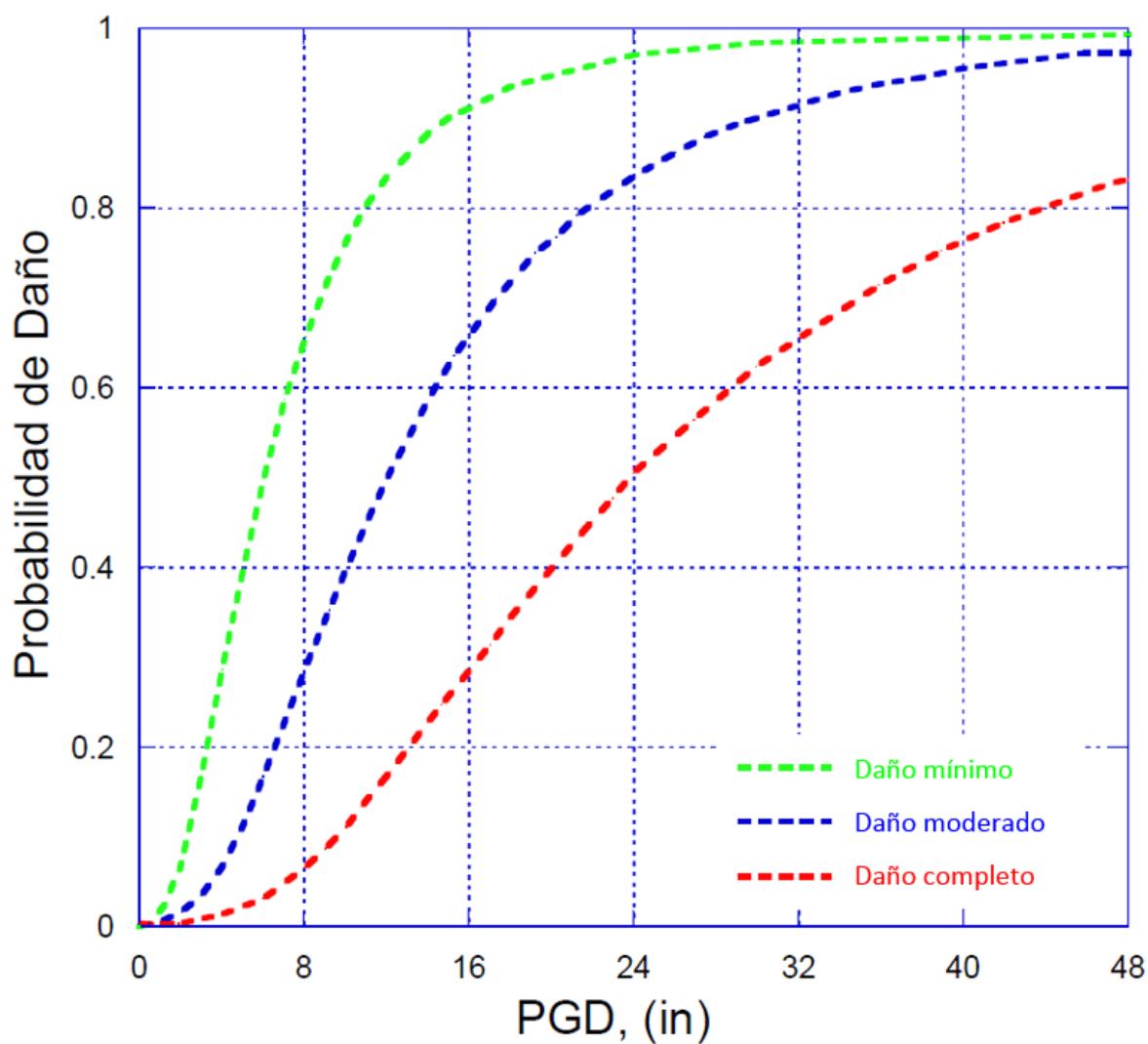


Figura 4.8. Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en avenidas, (Hazard-MH Technical Manual. 1999).

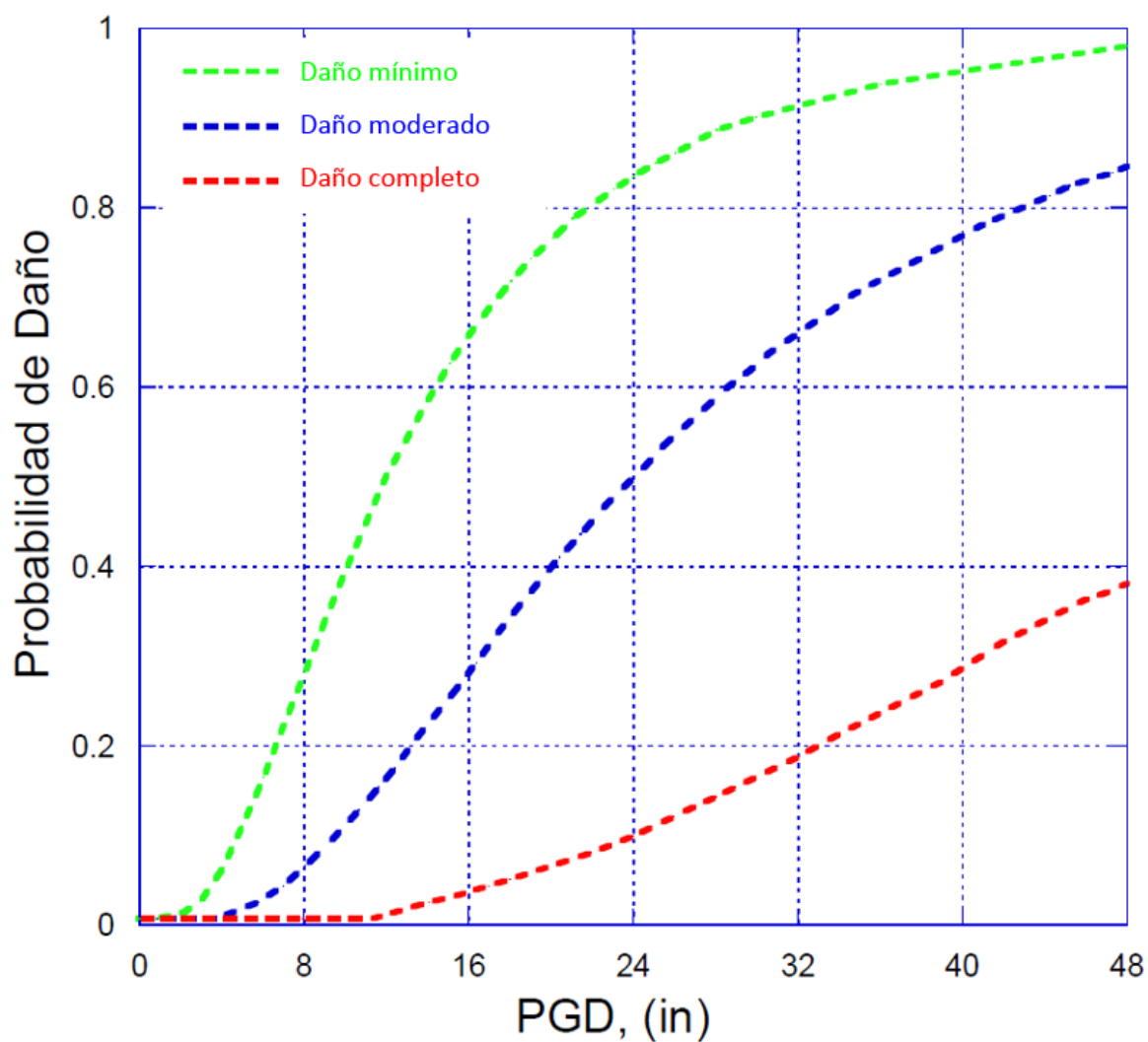


Figura 4.9, Curvas de fragilidad para evaluar la probabilidad de daño en ejes viales, (Hazus-MH Technical Manual. 1999).



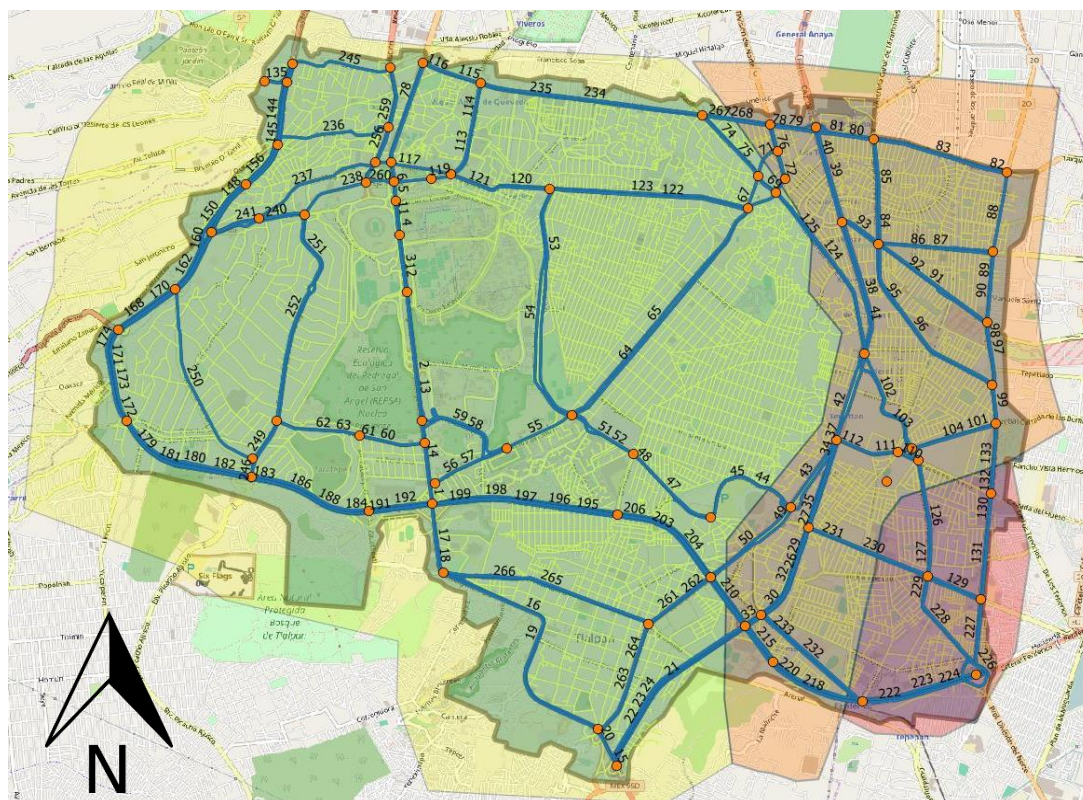
4.3.1 Curvas de fragilidad específicas para la ciudad de México

Para evaluar la probabilidad de falla de las viviendas se utilizaron curvas de fragilidad específicas para la ciudad de México, estas son las propuestas por (Cázares J., 2013) de igual manera para evaluar la probabilidad de falla de teatros y auditorios se usaron las curvas recomendadas en el Diario Oficial de la Federación en la actualización realizada al capítulo II “Vulnerabilidad” el día 05/10/2012, finalmente para pasos elevados se emplearon las curvas de fragilidad propuestas por (Mayoral et al., 2016).

Las probabilidades de falla para estas curvas se muestran en las tablas 5.5 a 5.8

4.4 Red simplificada

Debido a que el modelo de bloqueo propuesto para analizar la red de transporte depende del colapso de algún tipo de infraestructura, tomando en cuenta la posibilidad de que escombros procedentes del colapso de una alguna edificación pudieran bloquear las vialidades, se generó una red estratégica simplificada que involucra únicamente las vialidades e intersecciones más importantes (Figura 4.10). En esta red se pueden apreciar en color anaranjado las intersecciones más concurridas y en color azul las vialidades. Inicialmente el análisis de la red de transporte se lleva a cabo considerando solo la función de rescate inmediatamente después del terremoto, para definir los sectores críticos de la red con respecto a la conectividad de la misma, posteriormente se amplía para tomar en cuenta la capacidad de adaptación de la red a los altos flujos automovilísticos a consecuencia del evento sísmico, lo que generará un aumento potencial de congestión vial debido al daño de la red.



●	Nodos de la red simplificada
—	Red simplificada
■	Zona de lomas
■	Zona de transición
■	Zona lacustre

Figura 4.10. Red simplificada y zonificación sísmica de acuerdo al RCDF.

4.5 Cálculo del riesgo sísmico

Las estructuras con un comportamiento sísmico inadecuado son la causa principal de las pérdidas humanas y económicas durante la ocurrencia de terremotos. Para analizar la resiliencia sísmica de las estructuras hay que comenzar por realizar estudios de riesgo sísmico, los cuales permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica y estimar el daño probable que se puede presentar a causa de un terremoto.



Para llevar a cabo un análisis adecuado se debe disponer de una amplia información, que muchas veces no se tiene, además, existe una gran cantidad de incertidumbres involucradas, por lo tanto, el enfoque adecuado del problema es el probabilista. En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de la infraestructura crítica mediante una metodología basada en un análisis de respuesta de sitio probabilista realizado en el programa (RADSH) el cual se complementa con curvas de fragilidad, para caracterizar el perfil estratigráfico de las zonas sismogénicas II y III se emplearon las estratigrafías mostradas en las Figuras 4.12 y 4.13, en las cuales también se puede observar la variación de la distribución de la velocidad de onda de corte a distintas profundidades.

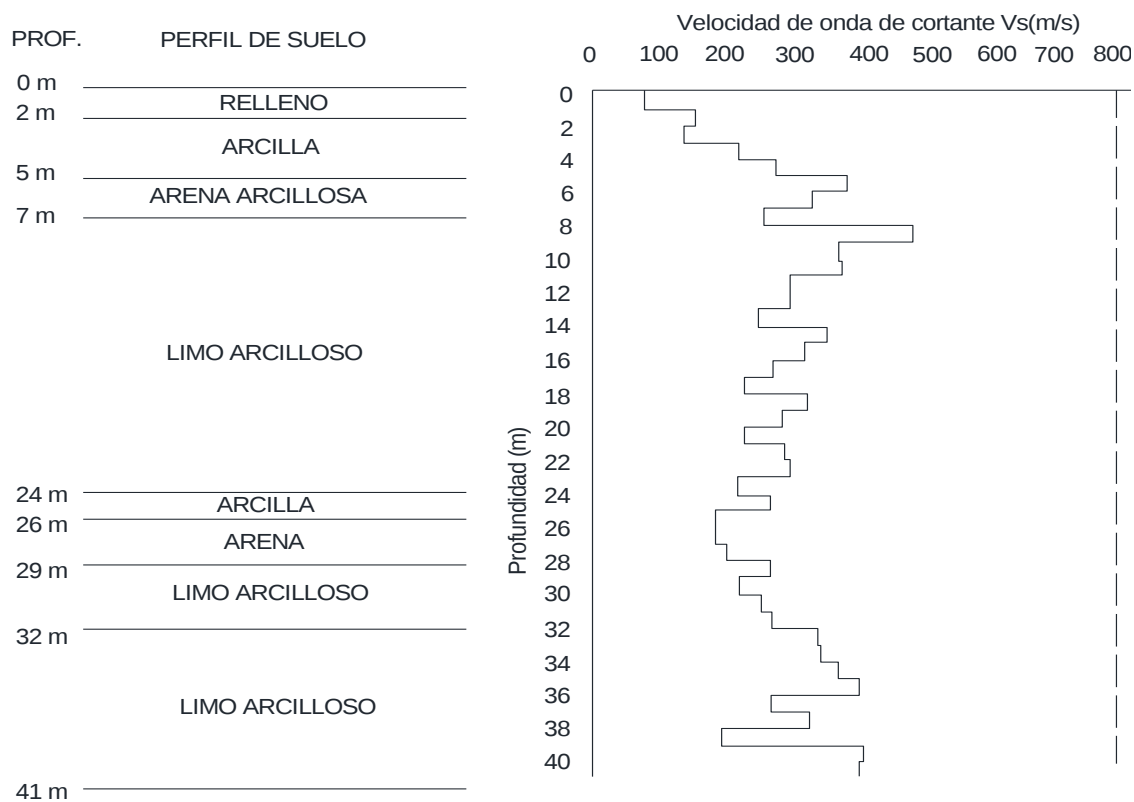


Figura 4.12. Perfil de suelo representativo de la zona II (de transición) acompañado de la variación de la velocidad de onda de corte.

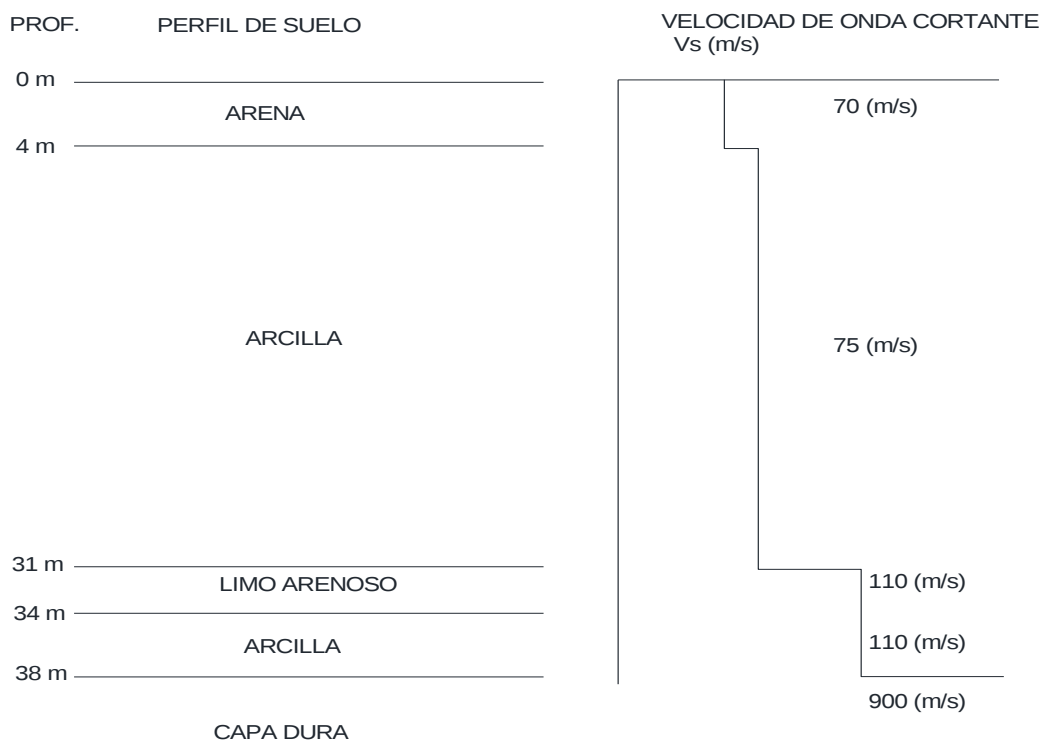


Figura 4.13, Perfil de suelo representativo de la zona III (lacustre) acompañado de la variación de la velocidad de onda de corte.

4.5.1 Identificación de las fuentes sismogénicas

México se encuentra ubicado en el contexto de cinco placas tectónicas (Figura 4.14): Caribe, Pacífico, Norteamérica, Rivera y de Cocos. Estas últimas dos placas se encuentran en subducción (se sumergen) debajo de la placa de Norteamérica. La placa denominada Rivera se sumerge bajo Jalisco y Colima, mientras que la de Cocos lo hace debajo de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Así mismo la placa de Cocos continúa al sur de Chiapas y en Centroamérica, pero ahora en subducción con la placa del Caribe.

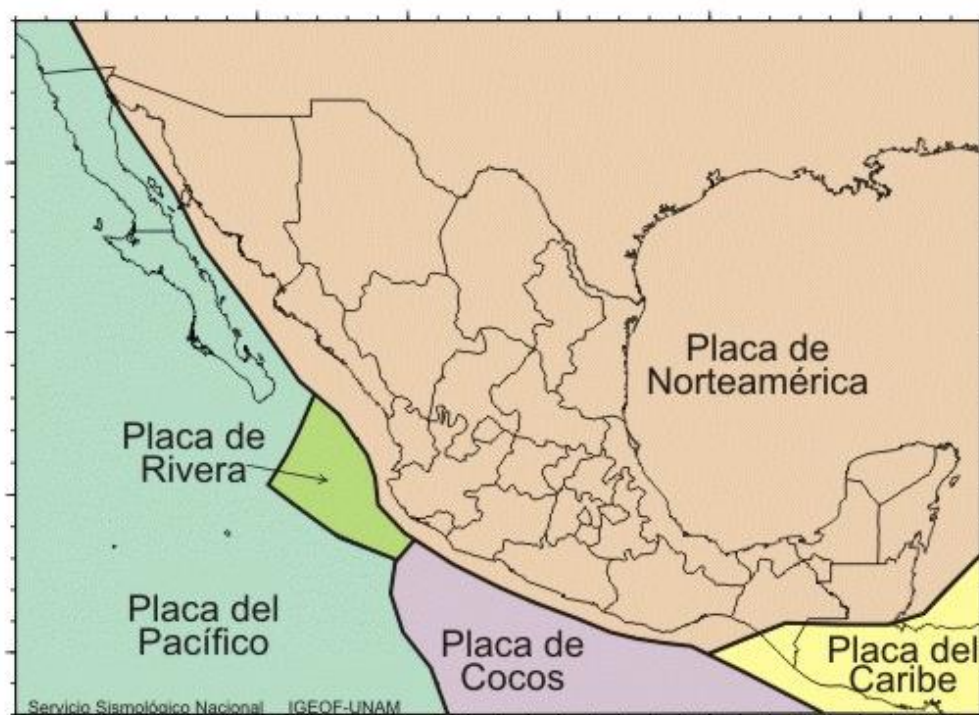


Figura 4.14. Placas tectónicas de interés, para el caso estudio.

Una de las zonas sismogénicas utilizada en este trabajo es la zona de subducción mexicana, debido a que en esta zona es donde se han generados los temblores que han ocasionado mayor daño en la Ciudad de México, con la finalidad de complementar el análisis y con el objetivo de generar un panorama más amplio en torno a la probabilidad de falla de la infraestructura de esta zona, también se consideraron eventos sísmicos normales.

4.5.2 Caracterización de los modelos de recurrencia

Para cada fuente sísmica se evalúa un modelo de recurrencia de eventos y un modelo de recurrencia temporal de los mismos. Para el modelo de recurrencia de los sismos se utiliza la relación frecuencia-magnitud de Richter y para el modelo de recurrencia temporal, se usa el proceso estocástico de Poisson, Figura 4.15.

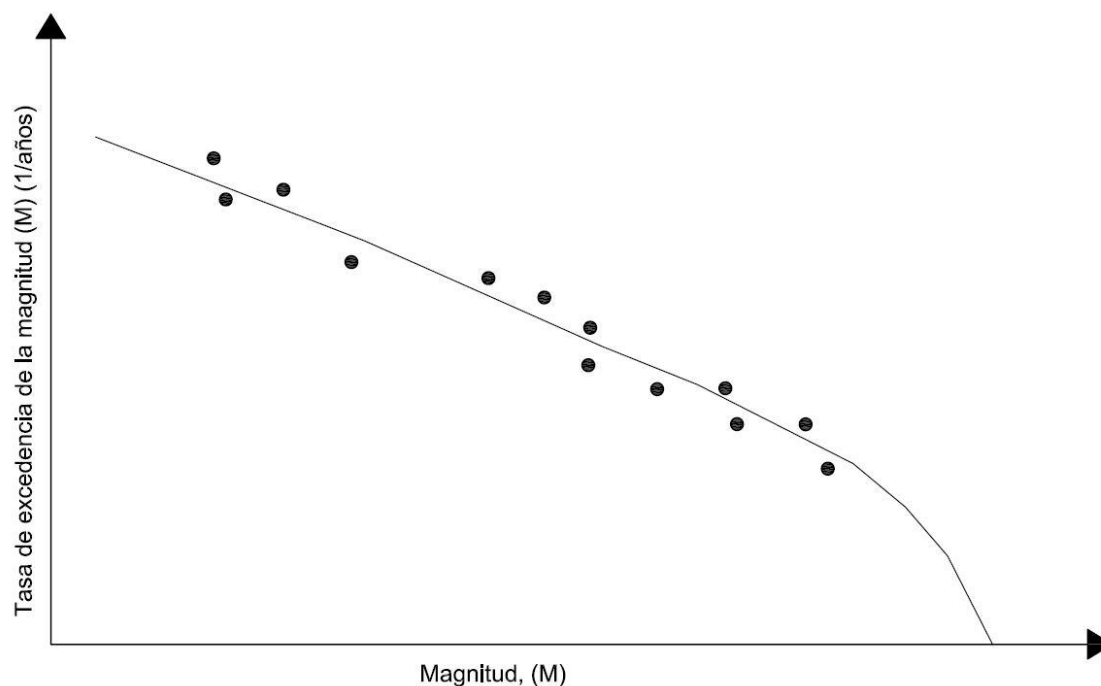


Figura 4.15. Modelo de recurrencia (Klügel et al., 2008).

4.5.3 Definición de la relación de atenuación

El modelo de atenuación describe el efecto producido en un sitio lejos de la fuente sísmica, debido a la ocurrencia de un evento en la misma, las relaciones de atenuación se expresan como una función matemática que relaciona el parámetro de movimiento del terreno firme o roca por ejemplo, la aceleración máxima del suelo (PGA), con los parámetros que caracterizan al sismo, la aceleración en el sitio depende principalmente de dos parámetros (tipo de suelo y distancia epicentral), Figura 4.16.

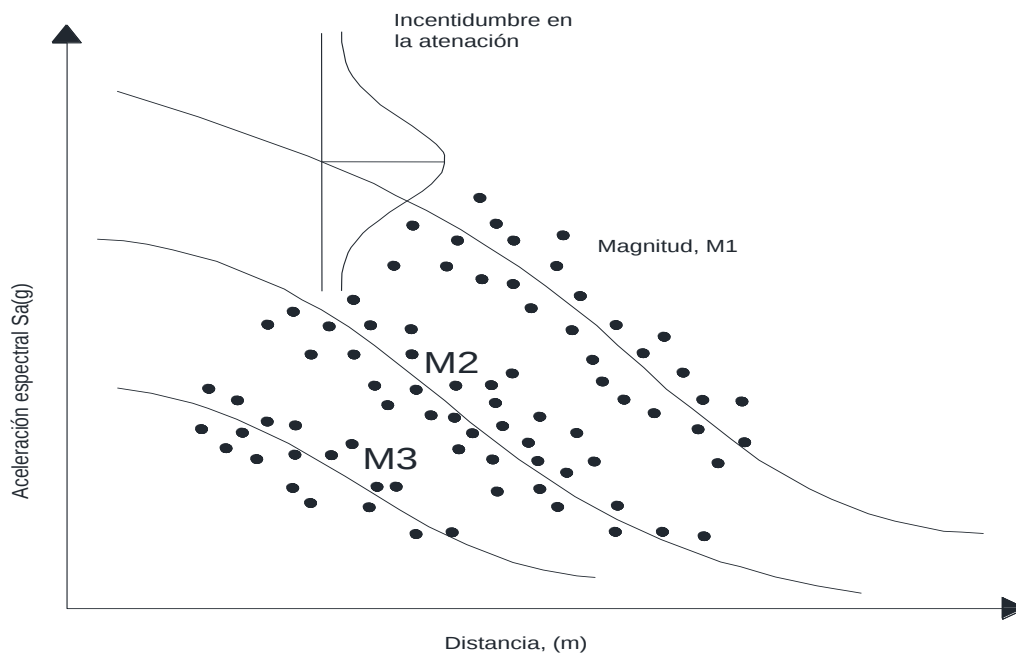


Figura 4.16. Relación de atenuación (Klügel et al., 2008).



4.5.4 Espectros de peligro uniforme

Como se mencionó anteriormente los espectros de peligro uniforme, EPU, son una representación de la relación que existe entre el período natural de vibración del suelo, T , y la aceleración espectral, S_a , para una probabilidad de excedencia dada asociada a un período de retorno, fueron utilizados espectros de peligro uniforme para caracterizar los eventos sísmicos contemplados en este trabajo (normales y de subducción) se generaron a partir de los análisis de peligro sísmico probabilista, contemplando periodos de retorno (T_r) de 125, 245, 475 y 2475 años, finalmente un total de ocho curvas de peligro sísmico fueron usadas para periodos (T) que van de cero a cinco segundos, las Figuras 4.17 y 4.18 muestran los espectros de peligro uniforme utilizados

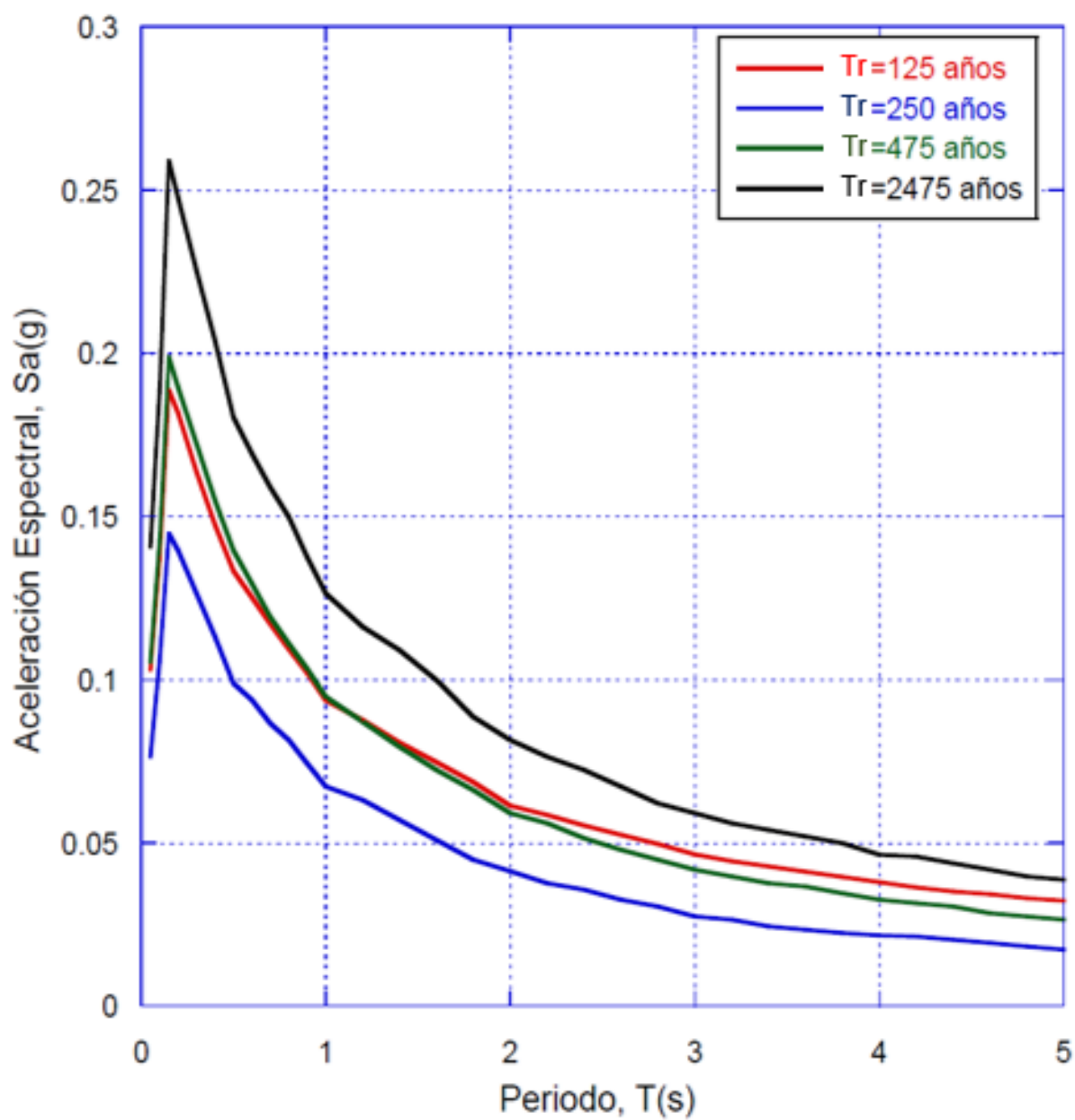


Figura 4.17. Espectros de peligro uniforme para eventos sísmicos normales.

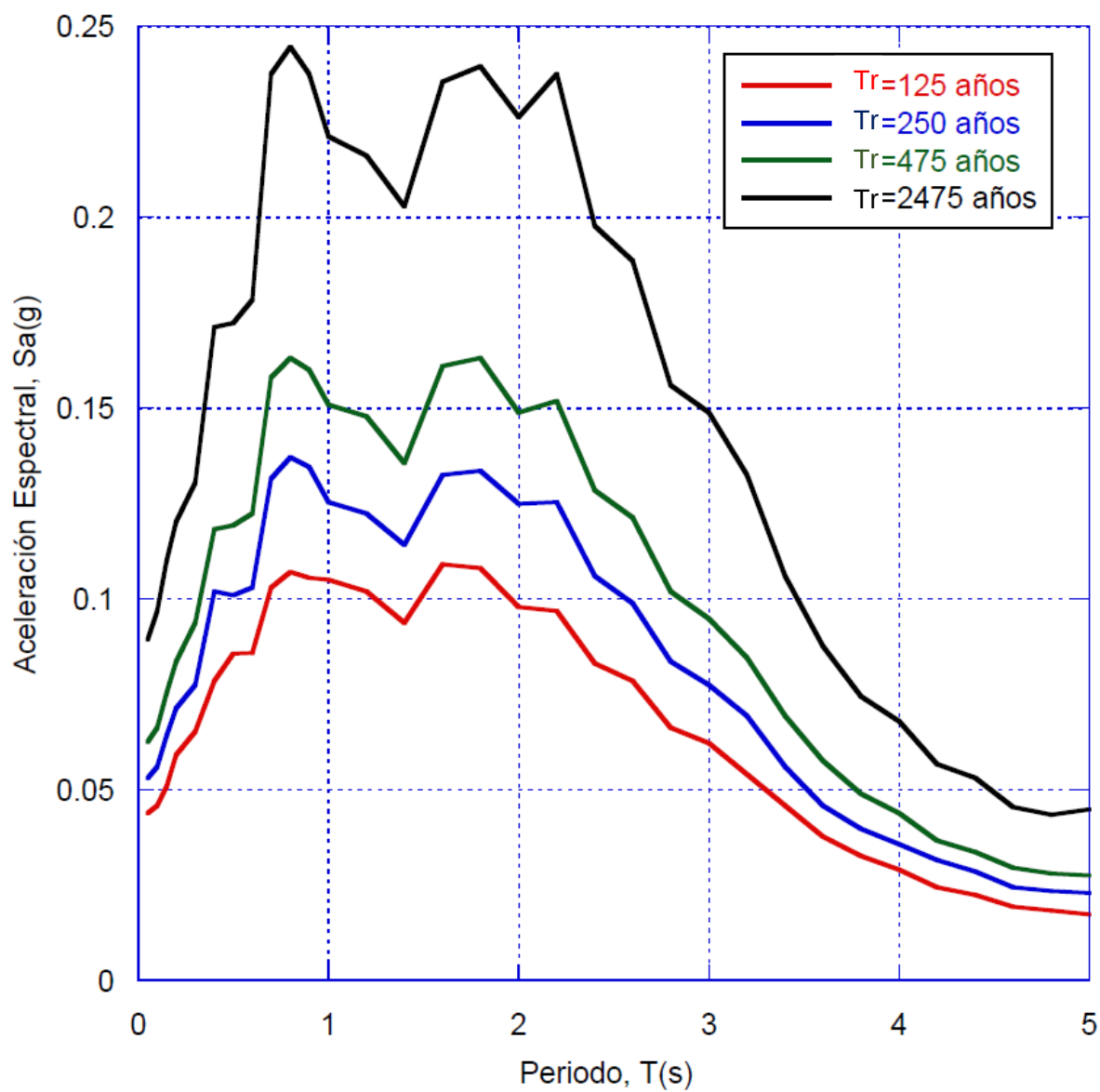


Figura 4.18. Espectros de peligro uniforme para eventos sísmicos de subducción.

4.5.5 Análisis de respuesta de sitio

El análisis de respuesta de sitio usado en este caso de estudio se llevó a cabo con la ayuda del programa RADSH (Bárcena y Romo, 1994). Las estratigrafías utilizadas son las que se muestran en las Figuras 4.12 y 4.13, las respuestas de sitio para cada tipo de estratigrafía se muestran en las figuras 4.19 a 4.24

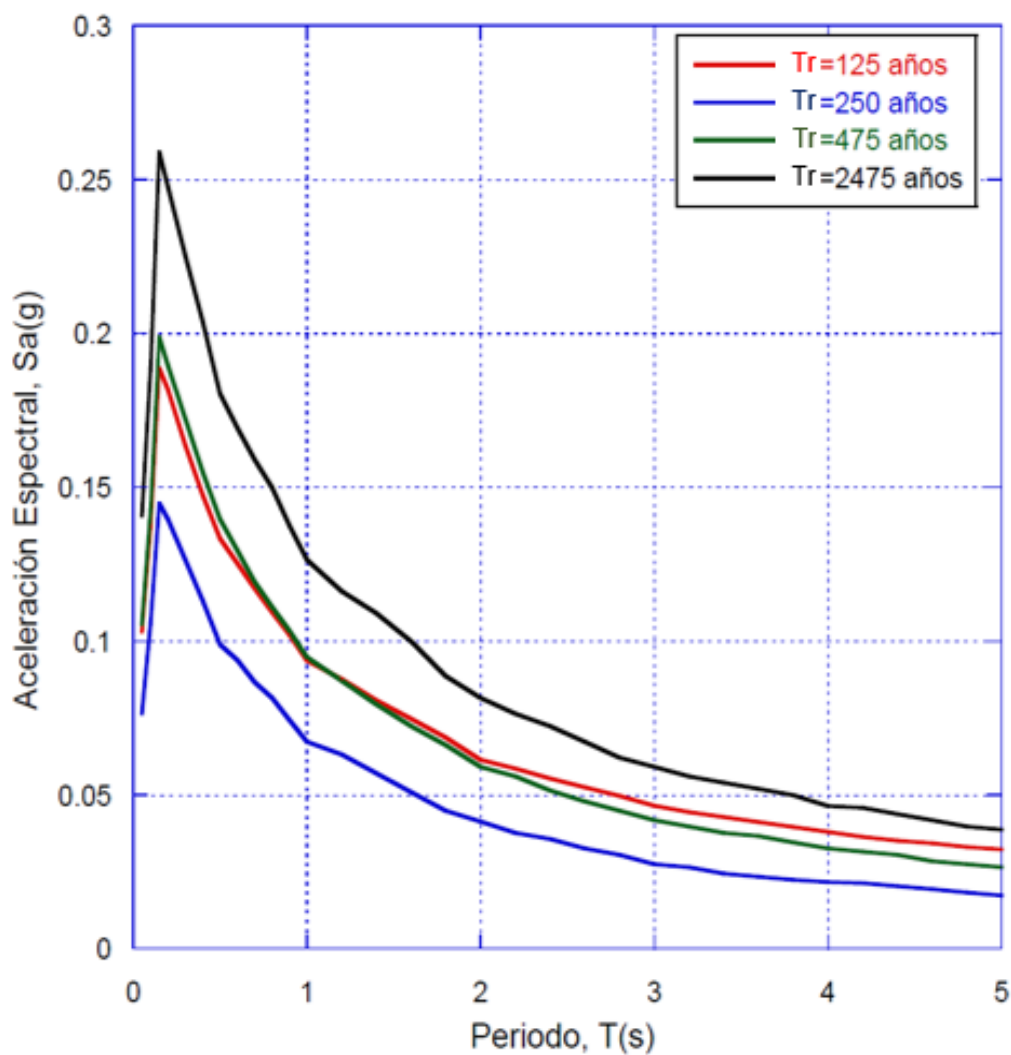


Figura 4.19. Respuesta de sitio para sismos normales en la zona de lomas.

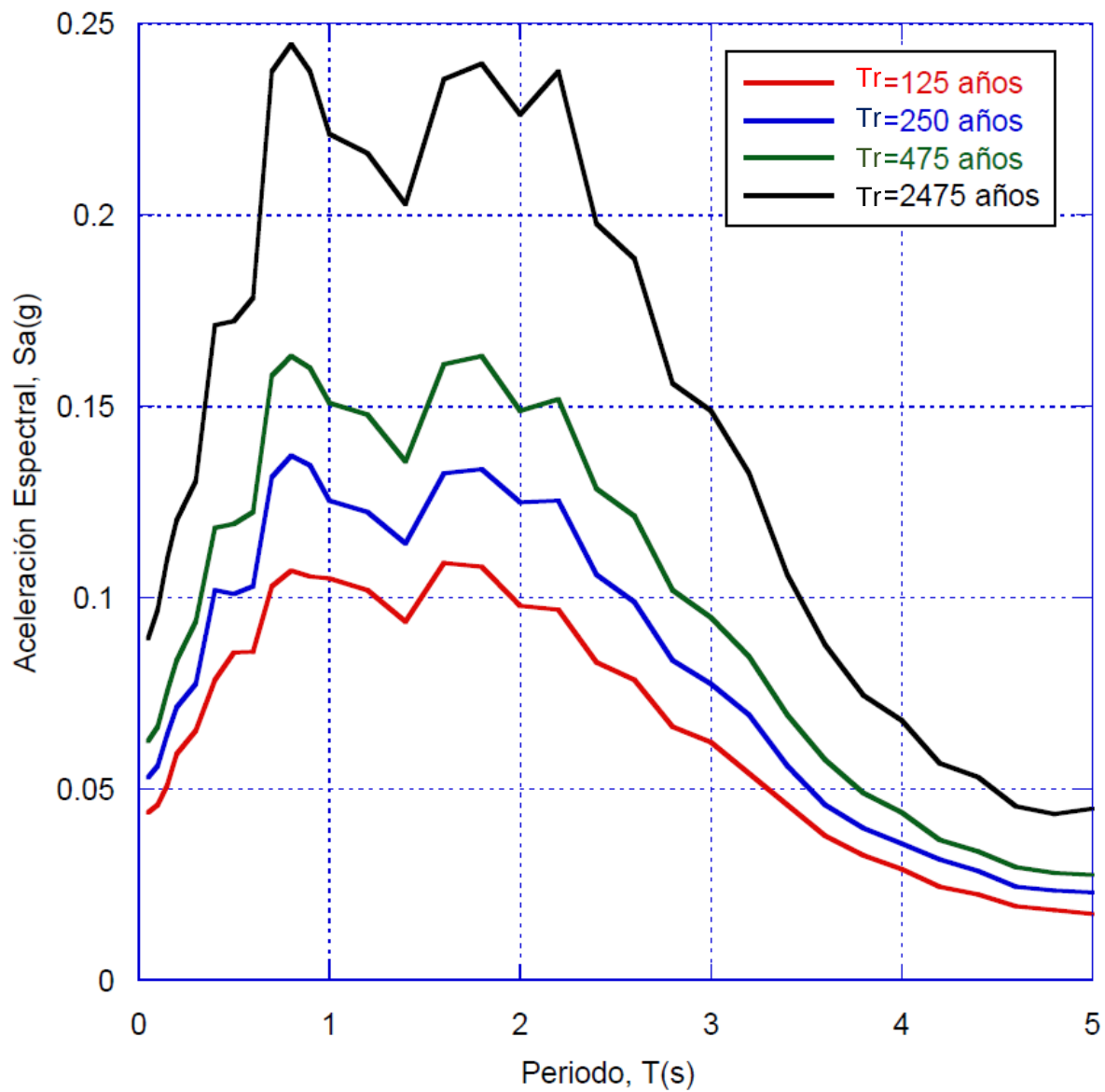


Figura 4.20. Respuesta de sitio en la zona de lomas para sismos de subducción.

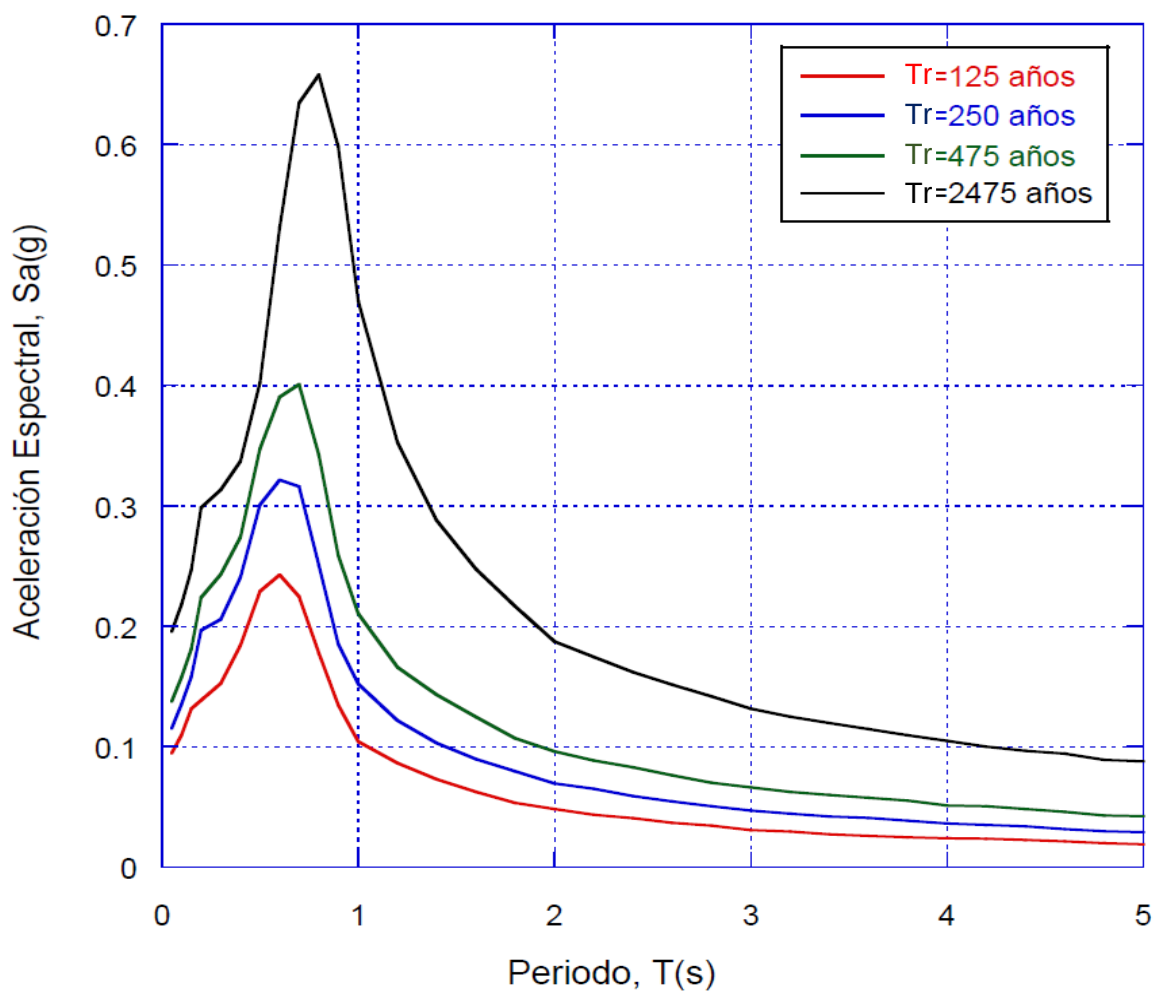


Figura 4.21. Respuesta de sitio para sismos normales en la zona de transición.

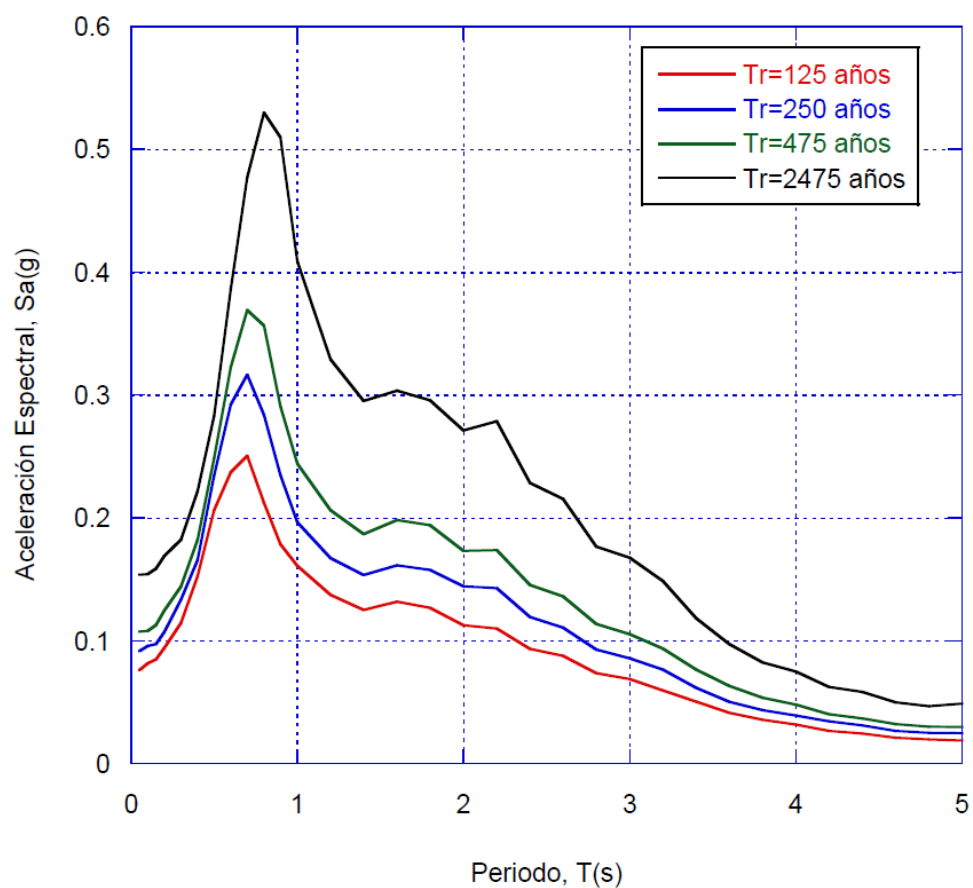


Figura 4.22. Respuesta de sitio en la zona de transición para sismos de subducción.

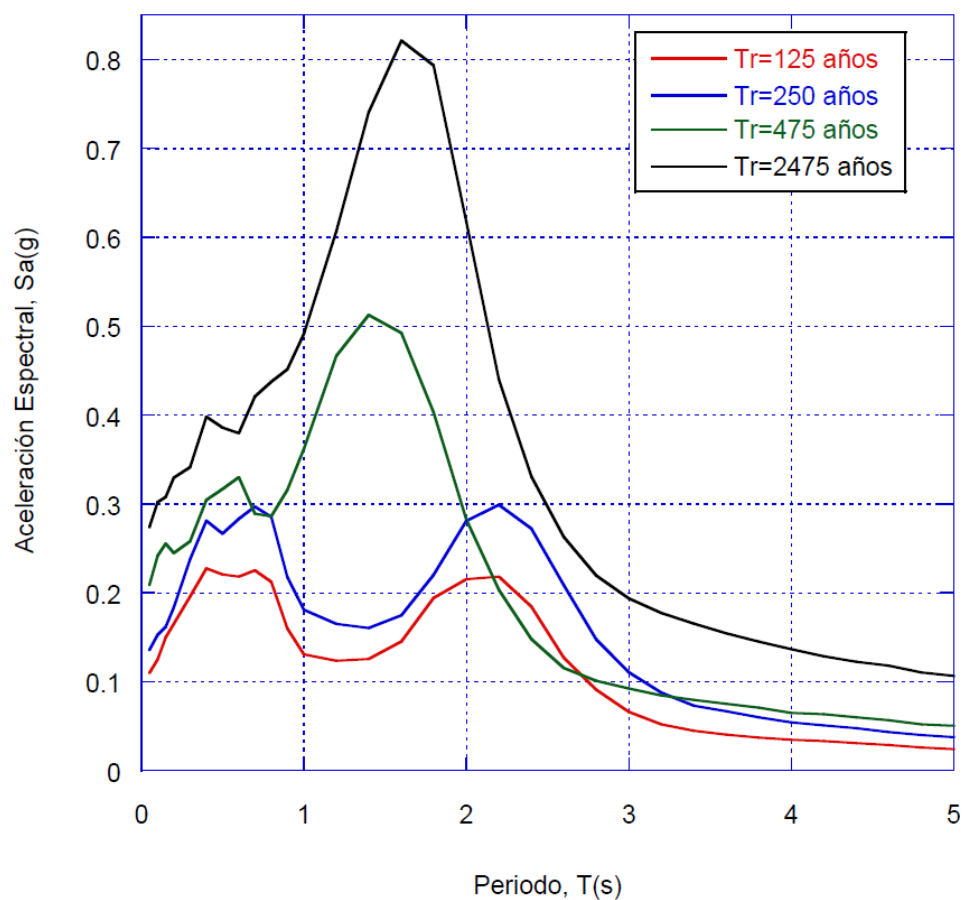


Figura 4.23. Respuesta de sitio para sismos normales en la zona lacustre.

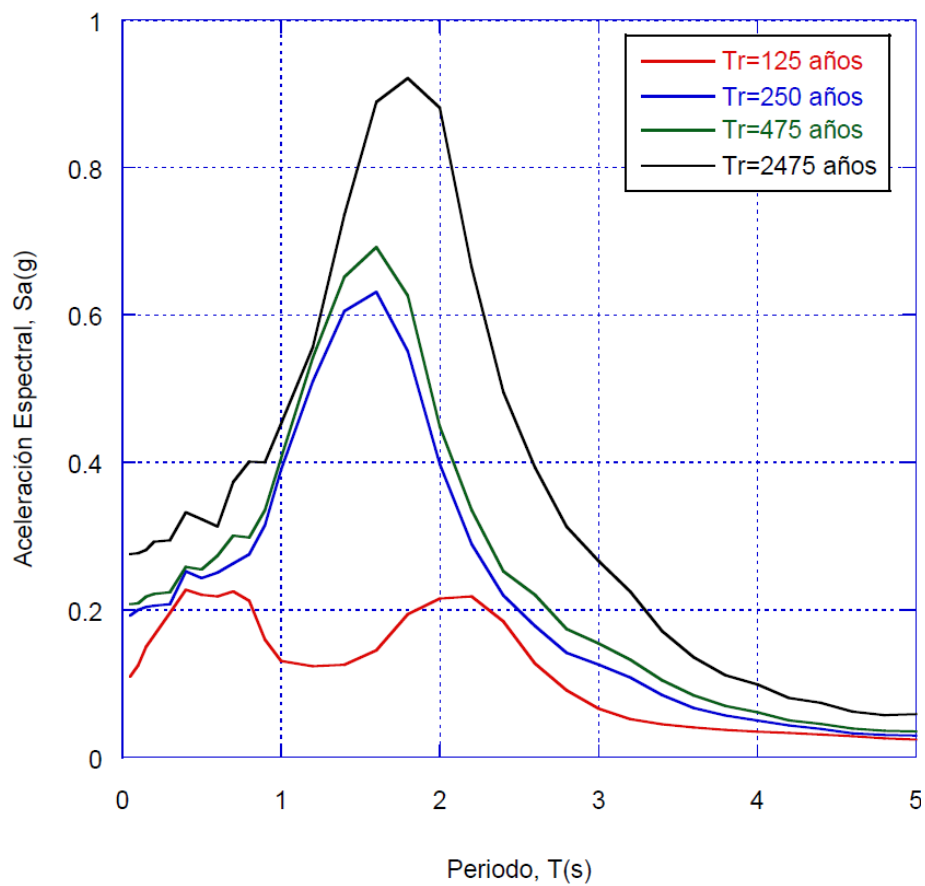


Figura 4.24. Respuesta de sitio para sismos de subducción en la zona lacustre.



5 EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA.

Con base en los análisis de respuesta realizados se calcula la probabilidad de falla de la infraestructura crítica de la siguiente manera:

Se selecciona la respuesta de sitio de acuerdo a la zona en la que se encuentra ubicada la edificación (lomas, transición o lacustre). De esta respuesta se toma la aceleración máxima del suelo (PGA) la cual en caso de ser necesario se convierte a PGD (desplazamiento máximo) mediante la metodología propuesta por (Argyroudis et al, 2013). Con los parámetros (PGA o PGD) dependiendo de cada caso se entra al eje de las abscisas de la curva de fragilidad previamente seleccionada para cada infraestructura y se determina una probabilidad de falla para diferentes tipos de daño (mínimo, moderado, severo y completo). Esta metodología se lleva a cabo para cada infraestructura crítica dentro del área de estudio, los resultados de este procedimiento se muestran en las Tablas 5.1 a 5.4.

Tabla 5.1. Probabilidad de falla para daños moderados en la zona de transición.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Metro	0	0	0	1	0	0	1	5
Metrobús	0	0	0	1	0	1	2	3
Tren ligero	0	1	1	6	1	1	5	26
Puentes	0	0	0	5	0	4	5	10
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	3	3	12	3	8	11	22
Mixtos	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla 5.2. Probabilidad de falla con daños moderados en la zona lacustre.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Metro	0	5	6	16	0	1	6	16
Metrobús	0	3	5	15	0	2	5	15
Tren ligero	1	26	28	38	1	3	28	38
Puentes	0	10	12	22	0	2	12	22
Avenidas	0	0	0	1	0	0	0	1
Edificios								
Concreto	3	22	24	34	3	5	24	34
Mixtos	0	0	2	12	0	2	2	15

Tabla 5.3. Probabilidad de falla con daños severos en la zona de transición.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Metro	0	0	0	0	0	0	0	4
Metrobús	0	0	0	0	0	0	2	0
Tren ligero	0	0	0	3	0	0	2	6
Puentes	0	0	0	3	0	2	3	5
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	2	2	3	0	3	5	5
Mixtos	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla 5.4. Probabilidad de falla para daños severos en la zona lacustre.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Metro	0	4	5	7	0	0	5	7
Metrobús	0	0	2	5	0	0	2	5
Tren ligero	0	6	8	11	0	0	8	10
Puentes	0	5	7	10	0	0	7	12
Avenidas	0	0	0	0	0	0	0	0
Edificios								
Concreto	0	5	7	10	2	4	7	10
Mixtos	0	0	2	5	0	0	2	4

Tabla 5.5. Probabilidad de falla para daños moderados en la zona de transición.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Teatros y Auditorios	0.0	1.0	1.5	23.0	1.1	2.0	12.0	38.0
Viviendas	1.0	1.1	2.0	2.6	1.2	2.3	2.4	2.8
Pasos elevados	0.4	1.0	2.1	8.2	1.2	2.9	5.6	16.8

Tabla 5.6. Probabilidad de falla con daños severos en la zona de transición.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Teatros y Auditorios	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	6.0
Viviendas	1.0	1.1	2.0	2.6	1.2	2.3	2.4	2.8
Pasos elevados	0.1	0.2	0.5	2.7	0.3	0.8	1.7	5.8



Tabla 5.7. Probabilidad de falla con daños moderados en la zona lacustre.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Teatros y Auditorios	1.7	35.0	50.0	54.0	1.7	20.0	51.0	57.0
Viviendas	2.1	2.7	3.0	3.4	2.1	2.4	3.1	3.1
Pasos elevados	2.3	16.1	19.5	36.1	2.3	5.3	19.8	35.6

Tabla 5.8. Probabilidad de falla para daños severos en la zona lacustre.

Infraestructura	Probabilidad de falla en (%) para sismos de subducción				Probabilidad de falla en (%) para sismos normales			
	Tr (Años)				Tr (Años)			
	125	250	475	2475	125	250	475	2475
Teatros y Auditorios	0.0	5.0	11.0	38.0	0.0	0.0	12.0	38.0
Viviendas	2.1	2.7	3.0	3.4	2.1	2.4	3.1	3.1
Pasos elevados	0.6	6.4	8.3	18.8	0.6	1.6	8.4	18.5

Con base en las probabilidades de falla calculadas anteriormente, se detectó que la zona más crítica de la red simplificada es la intersección ubicada en Tlalpan y Periférico, debido a su alta probabilidad de falla ante sismos con periodos de retorno de 2475 años, esta intersección reduciría su capacidad generando congestionamientos y bloqueos. Debido a ello en el capítulo 7 se realizan una serie de recomendaciones con la finalidad de que este bloqueo no entorpezca las actividades de rescate. En la Figura 5.1 se muestra la ubicación de la intersección antes mencionada.

Por otra parte puede observarse que las probabilidades de falla obtenidas mediante las curvas de fragilidad específicas para la CDMX son considerablemente mayores, debido a esto es de suma importancia estar bien preparados ante eventos sísmicos, al respecto se realizan una serie de recomendaciones a seguir si se quiere generar una respuesta eficiente ante un sismo.



6 EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA

La evaluación de la resiliencia sísmica se lleva a cabo mediante la implementación de la ecuación 3.4, que define a la resiliencia como:

$$R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+t_h} Q(t) dt \bar{Q}}{t_h} \dots\dots\dots \text{E.c 3.4}$$

Donde:

$P (DS = d | IM = s)$ se calcula a partir de las curvas de fragilidad y es la probabilidad condicional de estar en el estado de daño **d** dado el escenario del evento con **IM** igual a **s** , este elemento de la ecuación se tiene después de haber realizado la evaluación de la probabilidad de falla para cada estado de daño.

$P (IM = s)$ es la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos generando la intensidad **s** , calculada por un análisis de riesgo sísmico probabilístico realizado en la zona de estudio, finalmente este parámetro se obtiene como el inverso del periodo de retorno.

t_h es el tiempo que tarda el componente evaluado en recuperar su funcionalidad

Finalmente el único parámetro que falta por definir es la función de recuperación de funcionalidad (**$Q (t)$**), en las Figuras 6.1 y 6.2 se muestran dichas funciones, para cada componente del sistema. Una vez que se tienen todos los elementos necesarios, para calcular la resiliencia sísmica de los diferentes tipos de infraestructura presentes en el área de estudio, se programó la ecuación 3.4 en una hoja de cálculo, con la cual se obtuvo la resiliencia para cada uno de estos elementos, la funcionalidad esperada de cada componente se muestra en las Figuras 5.3 y 5.4.

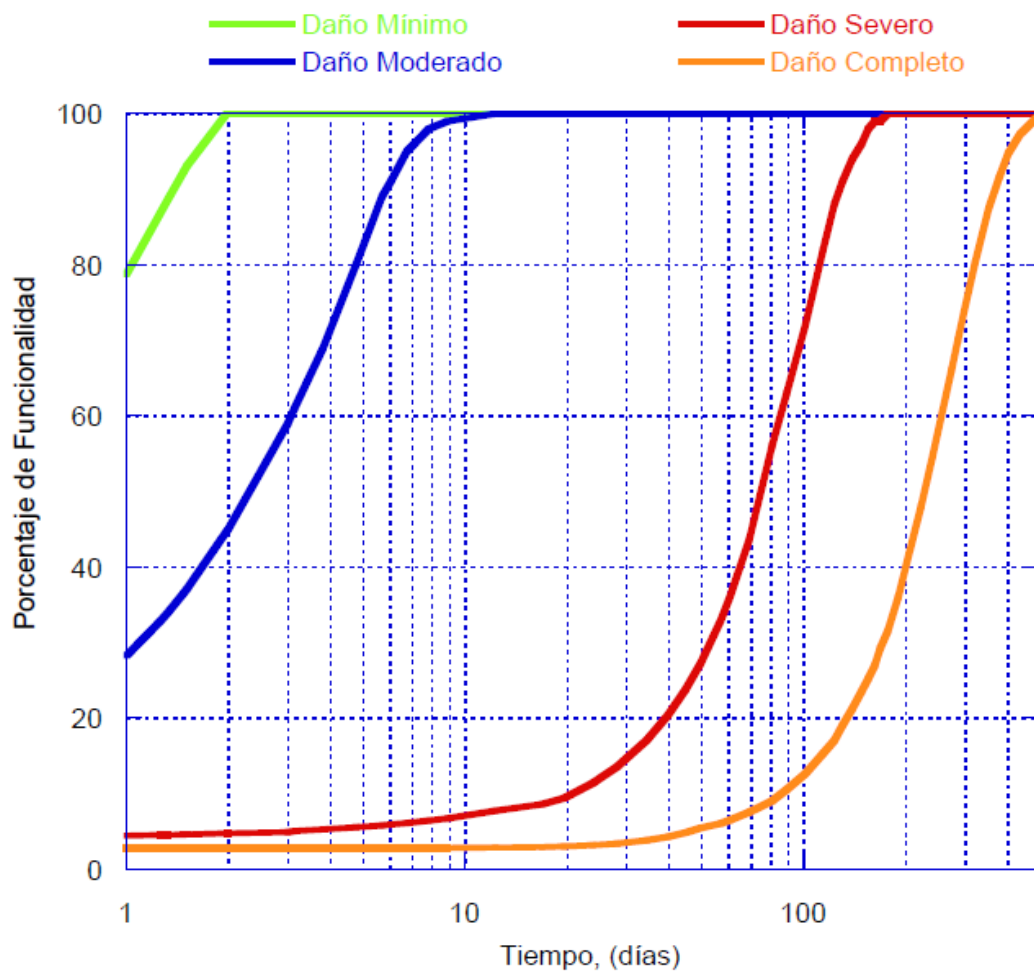


Figura 6.1. Funciones $Q(t)$ para evaluar el tiempo de recuperación en puentes, (Hazus-MH Technical Manual. 1999).

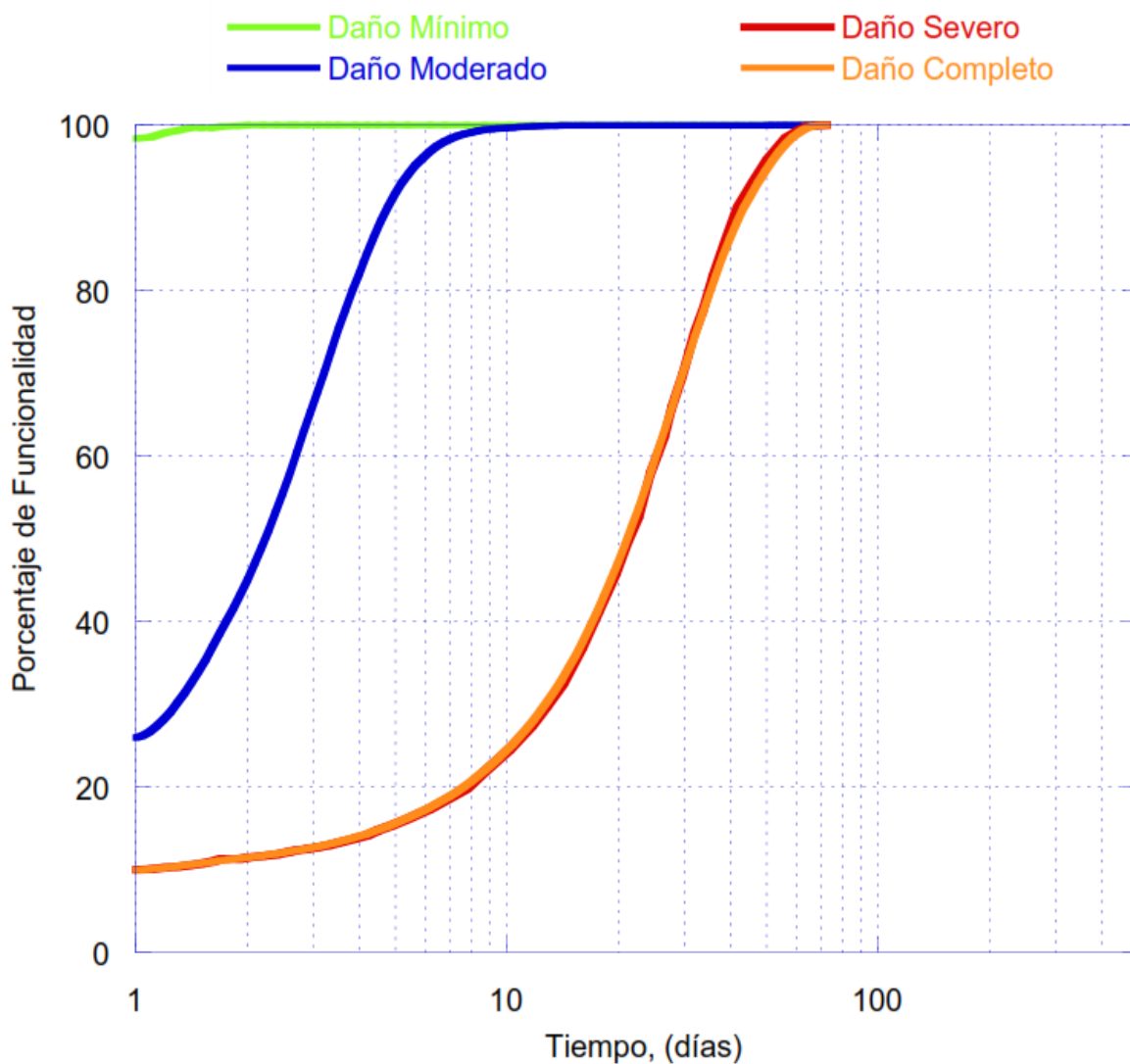


Figura 6.2. Funciones $Q(t)$ para evaluar el tiempo de recuperación en avenidas, (Hazus-MH Technical Manual. 1999).

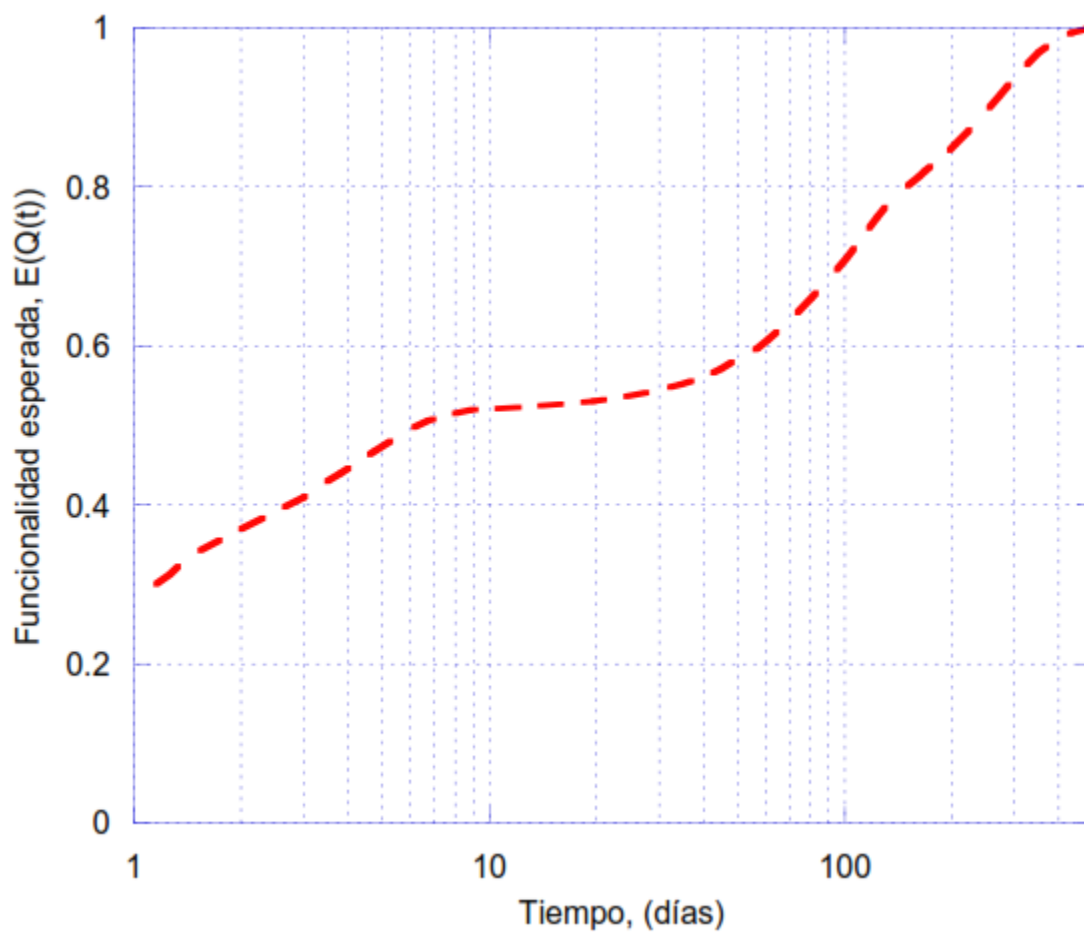


Figura 6.3. Funcionalidad esperada en puentes ante los eventos sísmicos considerados.

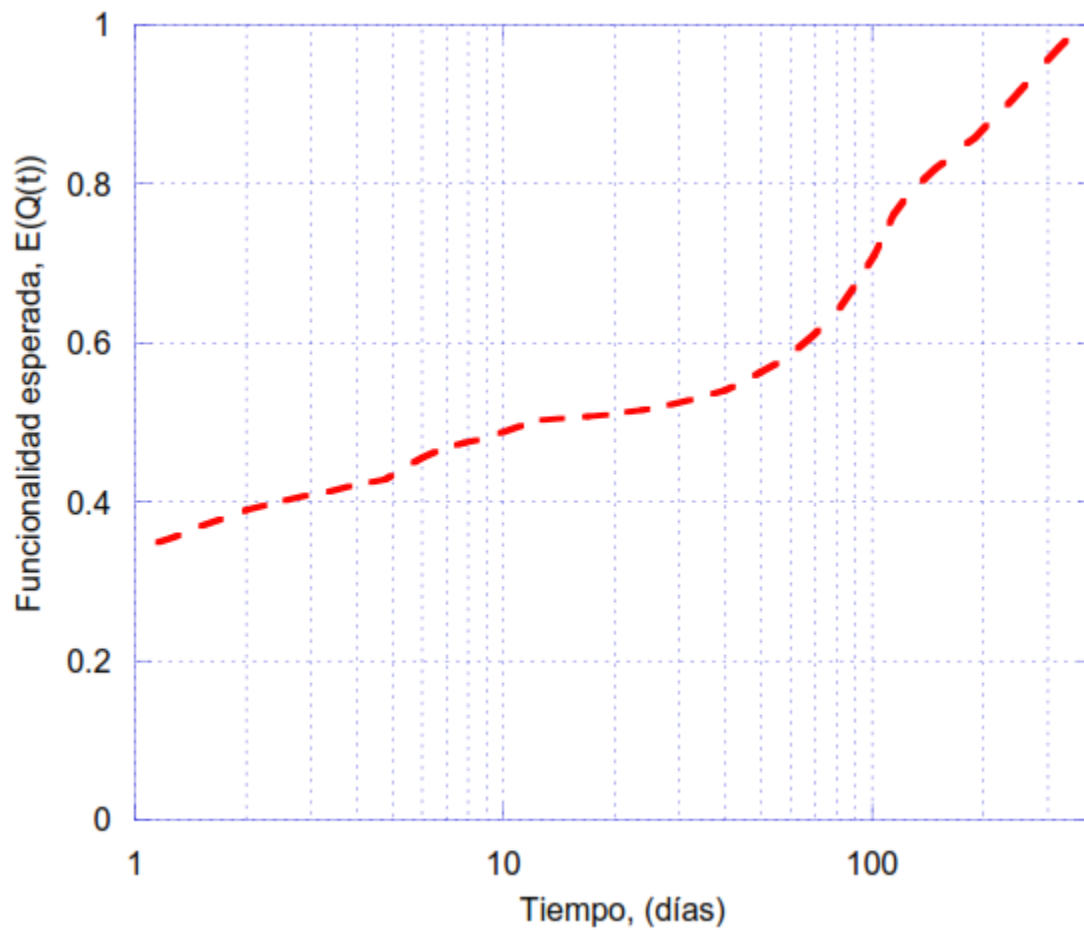


Figura 6.4. Funcionalidad esperada en avenidas y ejes viales ante los eventos sísmicos considerados.



7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este trabajo describe la aplicación de una metodología novedosa para evaluar la resiliencia sísmica. El enfoque se compone de cuatro pasos: 1) caracterización del ambiente sísmico, 2) identificación de los modos de falla y determinación de las curvas de fragilidad, 3) evaluación de la probabilidad de daño (mínimo, moderado, severo o completo), y 4) evaluación de la resiliencia. La evaluación de resiliencia se llevó a cabo en los componentes clave que permiten la movilización de los servicios de emergencia y de la población en general después de ocurrido un evento catastrófico (puentes y avenidas) la resiliencia para estos componentes es de 82% y 89% respectivamente. A pesar de que la zona de estudio se encuentra mayormente desplantada sobre un suelo rígido algunos edificios alcanzaron probabilidades de falla de hasta de un 38% lo que exige a la CDMX estar bien preparada ante eventos desfavorables, para ello se realizan una serie de recomendaciones.

El conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de estrategias que combatan los daños ocasionados por los desastres y que fortalezcan las capacidades de resiliencia de la sociedad. Este conjunto de acciones involucra las etapas de: identificación de los riesgos, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción. Para gestionar los riesgos que puedan afectar la actividad social y económica, es necesario combinar tres enfoques:

1. Gestión prospectiva del riesgo, cuyo objetivo es evitar la acumulación de nuevos riesgos
2. Gestión correctiva del riesgo, la cual busca reducir los riesgos existentes
3. Gestión compensatoria del riesgo para mejorar la resiliencia de las personas y de las sociedades que enfrentan un riesgo residual que no se puede reducir de manera efectiva



Al enfocarnos en riesgos sísmicos los sistemas de alerta temprana son una herramienta muy útil para reducir las pérdidas, el sistema de alerta temprana es un conjunto de elementos relacionados entre sí que proveen información oportuna y eficaz a los individuos, a las comunidades expuestas a una amenaza y a las autoridades correspondientes para actuar con tiempo suficiente y de una manera apropiada. Un elemento clave al hablar de sismos es el Servicio Sismológico Nacional, el objetivo principal de esta institución es proporcionar información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el territorio nacional y determinar sus principales parámetros como son la magnitud y el epicentro. De igual manera, se encarga de proporcionar la información necesaria para mejorar nuestra capacidad de evaluar y prevenir el riesgo sísmico y volcánico a nivel nacional.

Los diez aspectos esenciales para lograr ciudades resilientes (UNISDR)

1. Establecer la organización y la coordinación necesaria para comprender y reducir el riesgo de desastre dentro de los gobiernos locales, con base en la participación de los grupos de ciudadanos y de la sociedad civil.
2. Establecer tareas específicas a cada elemento capaz de brindar ayuda ante un evento desfavorable para que todos los organismos comprendan su papel y la contribución que pueden hacer en la reducción del riesgo.
3. Asignar un presupuesto para la reducción del riesgo y ofrecer incentivos a propietarios de viviendas, familias de bajos ingresos, comunidades, negocios y al sector público para que inviertan en la reducción de los riesgos que enfrentan.



4. Mantener información actualizada sobre las amenazas y las vulnerabilidades, generar evaluaciones del riesgo y utilizarlas como base para los planes de contingencia, estos planes deben de estar disponibles a todo el público y deben ser divulgados con la finalidad de que los ciudadanos puedan aplicarlos ante una emergencia
5. Invertir y mantener infraestructuras con diseños bien concebidos, capaces de hacer frente a las amenazas de la zona.
6. Evaluar la seguridad de todas las escuelas e instalaciones de salud y mejórelas cuando sea necesario
7. Aplicar y hacer cumplir reglamentos de construcción y principios para la planificación del uso de suelo que cumplan con los aspectos relativos al riesgo. Identificar terrenos seguros para los ciudadanos de bajos ingresos y, cuando sea factible, modernizar los asentamientos informales.
8. Realizar programas educativos y de capacitación sobre la reducción del riesgo de desastres, tanto en las escuelas como en las comunidades locales.
9. Instalar sistemas de alerta temprana y desarrollar las capacidades para la gestión de emergencias, así como llevar a cabo con regularidad simulacros para la preparación del público en general.
10. Después de un desastre ayudar de manera inmediata a los sobrevivientes y comenzar los trabajos de reconstrucción lo antes posible con la finalidad de reactivar la economía.



REFERENCIAS

- Argyroudis S, Kaynia AM, Pitilakis K. Development of fragility functions for geotechnical constructions: application to cantilever retaining walls. *Soil Dyn Earthq Eng* 2013; 0: 106–16.
- Argyroudis S, Pitilakis K. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits. *Soil Dyn Earthq Eng* 2012; 35: 1–12.
- Bárcena, A. y Romo M. P. RADSH - Programa de computadora para analizar depósitos de suelos estratificados horizontalmente sujetos a excitaciones dinámicas aleatorias, 1994. Informe Interno, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Bitrán Daniel, (2001), Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-991. CENAPRED, pp.. 46-51.
- Bolt B. A., Causes of Earthquakes en Wiegel, R. L.Ed. Earthquake, 1970.
- Cárdenas Rubén G., Las ondas sísmicas y el interior de la tierra, Ed. Cenciorama, Facultad de Ciencias, UNAM, 2010
- Cázares J, 2013. Estimación de la vulnerabilidad sísmica para estructuras de mampostería considerando la calidad de la supervisión. M.S. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cornell, C. A. Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America* 1968; 58: 1583-1606.
- C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad), Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 2008.
- Dong Y, and Frangopol DM (2015) Risk and resilience assessment of bridges under mainshock and aftershocks incorporating uncertainties, *Engineering Structures*, 83, 198-208.



- Esteva, L. Criteria for the construction of spectra for seismic design, 3rd Pan-American Symposium of Structures, Caracas, Venezuela; 1967, 3-8 July.
- Gupta, I. D. The state of the art in seismic hazard analysis. *Journal of Earthquake Technology* 2002; Paper No. 428, Vol. 39, No. 4, December, pp. 311-346.
- Gutenberg B. y Richter C. F., *Seismicity of the Earth*, Princeton University Press, Princeton, 1954.
- Gutiérrez Martínez Carlos, Quaas Weppen Roberto, Ordaz Schroeder Mario, Guevara Ortiz han que, Muiiá Vilá Knsbna Suieh Shn y Santovo G. Galeano Miguel Deriva de los continentes (2001), Fascículo Sismo, Centro Nacional de Prevención del Desastre. CENAPRED.
- Hardin, B., y Drnevich, V., Shear modulus an damping in soil, Measurements and parameters effects. *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, Vol.98, No.SM6, 1972.
- HAZUS-MH: technical manuals. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Science; 2004.
- Housner G. W., *Fundamentos de Ingeniería Sísmica*, Ingeniería, Vol. 32, No. 3, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, Julio 1962.
- Hudson, M., Idriss, I. M., y Beikae, M. QUAD4M: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base, 1994. Center for Geotechnical Modeling, Dep. of Civil and Env. Engng, University of California, Davis.
- Idriss, I. M., Lysmer, J., Hwang, R., y Seed, H.B. QUAD4: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures, 1973. Report No. EERC 73-16, University of California, Berkeley, CA.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., y Seed, H.B. FLUSH: A computer program for aproximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems 1975. Report No. EERC 75-30, University of California, Berkeley, CA.
- Karamlou A, and Bocchini P (2015) Computation of bridge seismic fragility by large-scale simulation for probabilistic resilience analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, DOI: 10.1002/eqe.2567.



- Kostoglodov Vladinnr. Pacheco Javier Francisco (1999), Cien años de sismicidad en México, UNAM.
- Klügel, J. U. Seismic Hazard Analysis - Quo vadis, Earth-Science Reviews 2008; Volume 88, Issues 1-2, May, Pages 1-32, ISSN 0012-8252.
- Marco de Acción de Hyogo 2005-2015 Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres REVISIÓN DE MEDIO TÉRMINO 2010-2011
- Mayoral J.M, Romo M.A y Osorio L. Seismic parameters characterization at Texcoco Lake México. Soil Dynamics Earthquake Engineering, 28: 507-521, 2007
- Mayoral J.M, Badillo A y Alcaráz M. Vulnerability assessment and resilience analyses of an enhanced urban overpass foundation. Submitted to the Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016.
- Norris C. H., Structural Design for Dynamic Loads, Ed. Mc Graw Hill, New York, 1959.
- Prince J., Espectros de Temblores y su Aplicación, Instituto de Ingeniería, UNAM, Publicación 78, México 1963.
- RCDF (2004), "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal" Administración Pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno
- Reinoso Angulo Eduardo y Orozco Narváez Vicente. (2007), Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. Revista de Ingeniería Sísmica No.76
- Romo M. P., 1976. Soil-structure interaction in a random seismic environment, PhD dissertation, University of California, Berkeley
- Rosenblueth Emilio. García Acosta Virginia, Rojas Rabiela Teresa. Núñez de la Peña Francisco Javier. Orozco Castellanos Jesús (1989), Macrosismos, Sismos y Sismicidad en México, pp. 2-4
- Rosenblueth E., Modelos probabilísticos de la ocurrencia de temblores, Memorias del Simposio Generación, Propagación y Efectos de Temblores, Abril, 1987



- Schnabel B, Lysmer J, y Seed HB. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. CA: University of Berkeley; 1972 Rep. no. EERC72-12, College of Engineering.
- Suárez R. Gerardo. Jiménez J. Zenón (1987), Sismo en la ciudad de México y el terremoto del 19 de septiembre de 1985. Cuadernos del Instituto de Geofísica, Instituto de Geofísica, UNAM México. D.F.
- SYNER-G: typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk . In: Pitilakis K, Crowley H, Kaynia A, Ed. Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities. Geotechnical, geological and earthquake engineering, 27. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- Tarback y Lutgens, Geología Física, Ed. Omega, 2000.
- Tarling D. Y Tarling M., Derivas Continentales, Ed.Orbis, 1986.
- The Rockefeller Foundation (2014). “City Resilience Framework” (En línea). Disponible en: <http://www.rockefellerfoundation.org/uploads/files/0bb537c0-d872-467f-9470-b20f57c32488.pdf>. (Consultado el día 11 de Diciembre de 2014).
- Thomson W. T., 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium, J.Appl. Phys. 21, pp 89-93
- Timoshenko S. y Goodier J. N., Theory of Elasticity, Ed.Mc Graw Hill, New York, 1951.
- Trifunac, M. D. y Lee, V. W. Direct Empirical Scaling of Response Spectral Amplitudes from Various Site and Earthquake Parameters. Report NUREC/CR 4903. U.S. Nuclear Regulatory Commission 1, 1987; 341 pp.
- UNISDR, The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, creada en diciembre de 1999.



Venkittaraman A, and Banerjee W (2013) Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, DOI: 10.1002/eqe.2392

Vucetic, R., y Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, USA, 1991.