

# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO





## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍ	TULO 6 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO	6-1
6.1	INTRODUCCIÓN	6-1
6.2	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y REDUCCIÓN DE RESISTENCIA POR DUCTIL	IDAD
		6-3
6.2.	Generalidades	6-3
6.2.3	<ul> <li>Factores de reducción para sistemas elastoplasticos</li> <li>Leyes de atenuación para espectros elásticos e inelásticos en terreno firme</li> </ul>	6-5 6-6
6.3	FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO BLANDO	6-8
6.3.	1 Caso de Análisis – Sismo Pizarro	6-8
6.3.2	2 Factores de reducción en suelos blandos	6-8
6.4	COMPARACIÓN DEL MODELO PARA CÁLCULO DE R CON RESULTADOS A PARTIF	DE
REGIS	TROS INSTRUMENTALES	6-10
6.5	AJUSTE DE ESPECTROS POR DUCTILIDAD	6-13
6.5.	1 Ajuste de Espectros por Ductilidad de Palmira	6-13
6.5.2	2 Ajuste de Espectros por Ductilidad de Tuluá	6-15
6.5.3	3 Ajuste de Espectros por Ductilidad de Buga	6-16
6.6	SUAVIZADO DE ESPECTROS	6-18
6.6.	1 Proceso de suavizado	6-18
6.7	MAPAS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO	6-22
6.7.	1 Generalidades	6-22
6.7.2	2 Procedimiento practico para definir el espectro de diseño	6-23
6.7.	3 Procedimiento jurídico para definir espectros de diseno 1. Manago de Migrazonificación cíamico.	6-23
0.7.4	Mapas de Microzonnicación sismica	6-25
6.8	MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS	6-29
6.8.	Mapas a nivel de departamento	6-29
6.8.2	2 Mapas de amenaza para Palmira	6-30
0.0. 6.8.4	4 Mapas de amenaza para Tulua 1	6-35
6.9 ESTUI	CONSIDERACIONES TECNICAS PARA INSTRUMENTO JURIDICO DE ADOPCION DE DIOS DE MICROZONIFICACIÓN	LUS 6-39
LOIOI		0-55
6.10	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS	6-41
6.11	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	6-42
ANEX	O 6.1 BORRADOR ACTO ADMINISTRATIVO	



# LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Modelo bilineal del comportamiento no lineal estructural	6-3
Figura 6.2 Factores de reducción de fuerzas sísmicas, amortiguamiento del 2, 5 y 10% con respecto crítico	o al 6-5
Figura 6.3 Espectros de resistencia Fuente Activa	6-6
Figura 6.4 Comparación de factores de reducción en sismos, sismo de Pizarro componente Norte – Se Este - Oeste, registrado en la Universidad Javeriana sede Calí	ur y 6-8
Figura 6.5 Espectro de Resistencia para el sismo de Pizarro para las estaciones INGEOMINAS, Hosp Universitario y Navarro	oital 3-10
Figura 6.6 Espectro de Resistencia para el sismo de Pizarro, con una ductilidad de 3. Para las estacion INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro6	nes 3-11
Figura 6.7 Espectro inelásticos de aceleración para el sismo de Pizarro, con una ductilidad de 3. Para estaciones INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro	las 3-12
Figura 6.8 Ajuste de espectros por ductilidad del municipio de Palmira6	5-13
Figura 6.9 Ajuste de espectros por ductilidad del municipio de Tuluá6	5-15
Figura 6.10 Ajuste de espectros por ductilidad del municipio de Buga6	<u>5-16</u>
Figura 6.11 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural para el municipio de Palm	nira. 3-19
Figura 6.12 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural para el municipio de Tuluá. 	3-20
Figura 6.13 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural para el municipio de Buga 6	 3-21
Figura 6.14 Mapa de cuadrantes para el municipio de Palmira6	ծ-24
Figura 6.15 Mapa de cuadrantes para el municipio de Tuluá6	ծ-24
Figura 6.16 Mapa de cuadrantes para el municipio de Buga6	ò-25
Figura 6.17 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Palmira6	5-26
Figura 6.18 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Tuluá	<u>5-27</u>
Figura 6.19 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Buga 6	<u>5-28</u>
Figura 6.20 Aceleración máxima en terreno firme, Tr = 475 años6	j-29
Figura 6.21 Velocidad máxima en terreno firme, Tr = 475 años6	<u>5-29</u>
Figura 6.22 Desplazamiento máximo en terreno firme, Tr = 475 años6	<u>3-30</u>
Figura 6.23 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 años para Palmira6	<u>5-30</u>
Figura 6.24 Velocidad máxima en terreno, Tr =475 años para Palmira6	<u>5-31</u>
Figura 6.25 Desplazamiento máximo en terreno, Tr =475 años para Palmira6	<u>5-31</u>
Figura 6.26 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg para Palmira. 6	5-31
Figura 6.27 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg para Palmira. 6	5-32
Figura 6.28 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg para Palmira. 6	<u>5-32</u>
Figura 6.29 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =2500 años para Palmira6	<u>5-32</u>



Figura 6.30	Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 años para Tuluá 6-3	33
Figura 6.31	Velocidad máxima en terreno, Tr =475 años para Tuluá6-3	33
Figura 6.32 I	Desplazamiento máximo en terreno, Tr =475 años para Tuluá6-3	34
Figura 6.33	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg para Tuluá6-3	34
Figura 6.34	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg para Tuluá6-3	34
Figura 6.35	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg para Tuluá6-3	35
Figura 6.36	Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =2500 años para Tuluá6-3	35
Figura 6.37	Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 años para Buga6-3	36
Figura 6.38	Velocidad máxima en terreno, Tr =475 años para Buga6-3	36
Figura 6.39 I	Desplazamiento máximo en terreno, Tr =475 años para Buga6-3	36
Figura 6.40	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg para Buga6-3	37
Figura 6.41	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg para Buga6-3	37
Figura 6.42	Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg para Buga6-3	37
Figura 6.43	Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =2500 años para Buga6-3	38



# LISTA DE TABLAS



# CAPÍTULO 6 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

## 6.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos del proyecto consiste en la elaboración de los mapas de microzonificación sísmica de las áreas urbanas de los municipios de Palmira, Tulúa y Buga y el desarrollo de las recomendaciones para el diseño sismorresistente de estructuras en cada una de las zonas estudiadas. Estas recomendaciones serán complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decretos Reglamentarios 33 de 1998, 34 de 1999, 2809 de 2000 y 52 de 2002. Las recomendaciones que se presentan se enmarcan dentro del literal A.2.9 "Estudios de Microzonificación" del Decreto 33 de 1998.

Los mapas de microzonificación sísmica sirven para establecer los requisitos mínimos de diseño sismo resistente. Para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad, la microzonificación sísmica establece una especificación de diseño de tipo espectral (para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) de manera que cualquier edificación, diseñada con la especificación proporcionada, tendrá en general la misma probabilidad de sufrir daño o colapso ante un evento sísmico futuro. De esta manera no se establecen, en principio, limitaciones a las características generales de las edificaciones a diseñar. Sin embargo, es claro que edificaciones con características dadas, tendrán especificaciones de diseño más exigentes que otras, dependiendo de su ubicación geográfica. Teniendo en cuenta las exigencias mínimas de la NSR-98, existe la posibilidad de no poder utilizar ciertos sistemas estructurales tradicionales en algunas zonas de los municipios, casos en los cuales el calculista deberá recurrir a sistemas estructurales que ofrezcan mayor rigidez y/o resistencia a las fuerzas horizontales.

Los requisitos de diseño sismo resistente que se especifican incluyen el nivel de fuerza sísmica de diseño a nivel de la superficie del terreno para diferentes tipos estructurales (desde casas de uno y dos pisos hasta edificaciones de mayor altura, o construcciones como bodegas, edificios industriales, tanques y otros). También se tiene en cuenta la posible ocurrencia de amplificaciones en la respuesta, consecuencia de las condiciones del subsuelo particulares en cada uno de los municipios. Los resultados del presente proyecto de investigación pueden complementarse en el futuro con información recolectada posteriormente. Ésta podría incluir las zonas en las cuales existe posibilidad de presentarse fenómenos especiales asociados al sismo tales como eventuales fallas de taludes amplificación topográfica o similares. De esta manera se establece la necesidad de adelantar estudios particulares, en especial, cuando la magnitud del proyecto lo amerite.

No obstante su aparente similitud en comportamiento sísmico, las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, las zonas especiales de reserva (humedales, pantanos y/o lagos), los rellenos, las zonas de fallamientos superficiales, entre otras, deben ser estudiadas por aparte. Esto se debe a que pueden tener un comportamiento sísmico diferente al esperado o a que en el futuro pueden presentar una restricción especial en cuanto a su uso.



Con base en un mapa de zonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantar un proyecto de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en la zona que se encuentre. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas.

Adicionalmente, la zonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños en sismos futuros esperados, tanto a nivel de las estructuras como en las líneas vitales. Igualmente, es posible estudiar los efectos sobre la infraestructura existente, la cual en su mayoría, carece de especificaciones de sismo resistencia y presenta una alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de un sismo intenso cercano. Solo después de muchos años de utilización de las especificaciones de diseño sismo resistente, esta vulnerabilidad a nivel municipal irá disminuyendo hasta alcanzar los estándares aceptables para la sociedad.

Cada punto que se encuentra en el perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad se le asigna un espectro de diseño el cual se define de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma NSR – 98 para edificaciones y que corresponden a los siguientes:

- Espectros de respuesta en términos de aceleración.
- Periodos de retorno de análisis: 475 años.
- Amortiguamientos con respecto al crítico: 5%
- Espectros a nivel de superficie del suelo o en terreno firme en función del tipo de cimentación en que se apoye el edificio y a criterio del ingeniero geotecnista.

Los espectros del análisis de respuesta dinámica (ver Capítulo 5) se someten a una serie de modificaciones para llegar a espectros de diseño. Estas incluyen ajustes por ductilidad, y suavizado por incertidumbre en el periodo estructural. El presente capítulo resume los análisis realizados para llegar a los espectros de diseño finales recomendados y presenta los mapas de microzonificación propuestos.



## 6.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y REDUCCIÓN DE RESISTENCIA POR DUCTILIDAD

#### 6.2.1 Generalidades

La reducción de resistencia de una estructura por comportamiento inelástico de la misma,  $R_{\mu\nu}$ , está definida como el cociente entre la demanda de resistencia lateral elástica y la demanda de resistencia lateral inelástica asociada a una demanda de ductilidad preestablecida. Para un evento dado y una demanda de ductilidad máxima disponible o tolerable (definida por las características estructurales), se debe calcular la resistencia lateral inelástica,  $F_y(\mu=\mu_i)$ , que debe tener la estructura para evitar que la demanda de ductilidad  $\mu_i$  sea mayor que la ductilidad disponible  $\mu$ . Esto quiere decir que si la estructura tiene menor resistencia, la demanda de ductilidad será mayor que la tolerable al tener en cuenta el comportamiento del tipo estructural.

El comportamiento no lineal de estructuras se puede modelar en forma aproximada mediante modelos simplificados como es el caso de uno de tipo bilineal aplicable a sistemas de un solo grado de libertad. En la Figura 6.1 se presenta este modelo en el cual se observa un comportamiento elástico hasta la fuerza de fluencia  $V_y$ , que corresponde en la abscisa al desplazamiento de fluencia,  $u_y$ . En este caso se cumple la relación:

$$V_{Y} = Ku_{y} = M\omega^{2}u_{y}$$
(1)

En la cual  $V_y$  es la resistencia de fluencia del sistema, K es la rigidez del sistema, M es la masa dinámica y  $\omega$  es la frecuencia circular natural definida mediante

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{2}$$

Con T igual al período de vibración fundamental de la estructura, igual al inverso de la frecuencia propia de vibración, f.



Figura 6.1 Modelo bilineal del comportamiento no lineal estructural



Por otro lado, la demanda de ductilidad relaciona los desplazamientos máximos solicitados por la excitación sísmica,  $u_m$  y el desplazamiento de fluencia del sistema,  $u_v$  de la forma:

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \tag{3}$$

El diseño sísmico de edificios con períodos estructurales intermedios se basa en la premisa que los desplazamientos elásticos que se obtendrían con un sistema lineal elástico para la resistencia  $V_{e}$ , son aproximadamente iguales a los desplazamientos del mismo sistema con una capacidad de ductilidad prescrita y resistencia  $V_{y}$ , inferior a  $V_{e}$ . Con base en esto se puede establecer la relación entre  $V_{e}$  y  $V_{y}$  para una ductilidad dada como:

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y} \tag{4}$$

Donde  $R_{\mu}$ , es el factor de reducción de resistencia por ductilidad de la estructura.

Ha sido práctica calcular estos factores de reducción para sistemas de un grado de libertad y amortiguamiento preescrito y definirlos como la relación entre la resistencia necesaria para mantener el oscilador en el rango elástico sobre la resistencia necesaria para mantener el oscilador en una demanda de ductilidad prescrita de la forma:

$$R_{\mu}(T) = \frac{V(T,1)}{V(T,\mu)} \tag{5}$$

Donde T es el período de vibración natural de la estructura.

De este modo si se conoce  $R_{\mu}(T)$ , la resistencia necesaria para mantener una demanda de ductilidad preescrita  $\mu$ , se puede calcular mediante la división del espectro elástico por el factor de reducción  $R_{\mu}(T)$ , esto es:

$$V_{\rm m} = \frac{{\rm m}S_{\rm A}}{{\rm R}_{\mu}({\rm T})} \tag{6}$$

También es posible calcular el espectro de desplazamientos inelásticos para una demanda de ductilidad preescrita y espectro elástico de desplazamiento mediante:

$$Sd(\mathbf{T},\mu) = Sd(\mathbf{T})\frac{\mu}{R_{\mu}(\mathbf{T})}$$
(7)

Donde Sd(T) es el espectro elástico de desplazamiento.

Desde principios de los años 60's Newmark y Veletsos reconocieron el efecto no lineal de las estructuras durante sismos intensos de forma cuantitativa. Lo anterior se debió a la pregunta de porqué las estructuras se mantenían en pie a pesar de haber sido diseñadas para resistir menores demandas a las solicitadas. Desde entonces se reconoce la reducción de los



espectros elásticos para obtener las resistencias de diseño para estructuras que contaran con una cierta capacidad de ductilidad según el comportamiento sísmico esperado.

#### 6.2.2 Factores de reducción para sistemas elastoplásticos

Newmark y Hall (1982) desarrollaron un factor de reducción para sistemas elastoplásticos de un solo grado de libertad con relaciones de amortiguamiento de 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10 y 20% basados en tres sismos y excitaciones en forma de pulso, para demandas de ductilidad,  $\mu$  < 10. En la Figura 6.2 se presentan los gráficos de factor de reducción para ductilidades de desplazamiento 2, 3 y 5 para amortiguamientos de 2%, 5% y 10% respectivamente.



Figura 6.2 Factores de reducción de fuerzas sísmicas, amortiguamiento del 2, 5 y 10% con respecto al crítico.

Una forma simplificada de este factor R es el utilizado en la Ley 400 de 1997 para el diseño nolineal de edificaciones.

Los métodos modernos de diseño establecidos en los códigos y normas de diseño, establecen el procedimiento de diseño mediante el cual se pretende estimar la resistencia de diseño, Vy, a partir de la demanda sísmica calculada con el espectro elástico de aceleración, así:



$$V_Y = \frac{mSa}{R_\mu} = \frac{V_e}{R_\mu}$$

(8)

Donde  $S_a$  es la ordenada espectral de seudoaceleraciones y R<sub>µ</sub> es el factor de reducción de respuesta el cual está directamente relacionado con la capacidad de disipación de energía del sistema estructural bajo consideración.

Los anteriores factores de reducción para sistemas elastoplásticos tienen límites impuestos por la teoría de la dinámica estructural. Por ejemplo, para períodos estructurales cercanos a cero, es decir cuando  $T \rightarrow 0$ ,  $R_{\mu}(T) \rightarrow 1$ . Para periodos intermedios,  $R_{\mu}(T) \rightarrow \sqrt{2\mu-1}$ . Por otro lado, cuando  $T \rightarrow \infty$ ,  $R_{\mu}(T) \rightarrow \mu$  para cualquier valor de ductilidad y amortiguamiento estructural.

#### 6.2.3 Leyes de atenuación para espectros elásticos e inelásticos en terreno firme

En la Figura 6.3 se presentan, para el caso de fuentes "Activas", espectros de respuesta para diferentes demandas de ductilidad, magnitudes y distancias hipocentrales para relación de amortiguamiento con respecto al crítico,  $\xi = 0.05$ . Se presenta tanto el espectro elástico tomado de los desarrollos presentados en el Capítulo 3 como los espectros de respuesta inelásticos calculados con los valores de R del modelo propuesto. Estas figuras constituyen leyes de atenuación para las ordenadas de los espectros de respuesta elásticos.



Figura 6.3 Espectros de resistencia Fuente Activa.





Continuación Figura 6.3 Espectros de resistencia Fuente Activa.



## 6.3 FACTORES DE REDUCCIÓN PARA SUELO BLANDO

### 6.3.1 Caso de Análisis – Sismo Pizarro

En la Figura 6.4 se puede observar la variación de los factores de reducción de respuesta elástica con el período estructural para mantener una demanda de ductilidad constante en los espectros de resistencia resultantes. Las figuras presentan los resultados de un análisis correspondiente a los registros del sismo de Pizarro, Colombia (tomados en la Universidad Javeriana de Calí para los sentidos Norte – Sur y Este – Oeste, respectivamente) considerando un modelo de comportamiento elastoplástico para la estructura. Con base en la señal registrada se puede calcular el espectro inelástico de respuesta para ductilidad constante, en este caso igual a 4 como ejemplo. Este espectro elástico se puede dividir por el espectro inelástico correspondiente a la misma señal para obtener la Figura 6.4, en las cuales se presentan los factores de reducción para una demanda de ductilidad de 4.



Figura 6.4 Comparación de factores de reducción en sismos, sismo de Pizarro componente Norte – Sur y Este - Oeste, registrado en la Universidad Javeriana sede Calí.

Este par de ejemplos sirven para comprobar que en el caso de registros de suelo blando en el sismo de Pizarro, los valores del factor de reducción de respuesta por ductilidad toman valores cercanos a 1.0 en períodos cercanos a cero y tienden a la capacidad de ductilidad estructural prescrita  $\mu$  para períodos largos. Para efectos comparativos, se ilustran en forma simultánea los factores de reducción establecidos por la NSR-98 para la misma ductilidad especificada de 4, con lo cual se evidencia una diferencia significativa con los factores de reducción correspondientes a registros reales. Para estructuras con periodos entre 0 y 1 segundos, al emplear el R establecido por la NSR-98, se estaría subdiseñando. Los efectos de la subestimación de los factores de reducción de la respuesta por efectos de ductilidad en el rango de períodos intermedios son más críticos en sitios de suelo blando. Después del sismo de México de 1985, Meli (1986) identificaron que la amplificación de estos factores se presentaba en el rango de períodos compatibles con los períodos de vibración fundamental del suelo.

#### 6.3.2 Factores de reducción en suelos blandos

Rosas et al (1990) propusieron aproximaciones para calcular el factor de reducción de respuesta para suelos con períodos naturales de vibración característicos de los del Valle de México. Miranda (1991) amplió lo anterior para cualquier periodo natural de vibración de los depósitos de suelo, reconociendo diferentes tipos de suelo y origen de los mismos. Ordaz et . al. (1996), reconocieron que cuando el período estructural es igual al periodo del suelo, el factor de reducción se incrementa con respecto al de suelos firmes y que en ciertos períodos



intermedios los valores de  $R_{\mu}$  tienden a ser mucho mayores que los propuestos por Newmark y Hall, sobretodo en edificaciones construidas sobre suelos blandos. Por ello, Ordaz y Pérez Rocha (1998) desarrollaron factores dependiendo de las condiciones de suelo usando 445 registros de la red acelerográfica de Guerrero. Para el efecto utilizaron modelos elastoplásticos con amortiguamiento con respecto al crítico de 5% y demandas de ductilidad de  $\mu = 1.5, 2, 4$  y 8. La expresión propuesta, que es independiente de las condiciones de suelo, tiene la siguiente forma:

$$R_{\mu}(T) = 1 + \left(\frac{S_d(T)}{D_{\max}}\right)^{\beta(\mu)} \left(\frac{S_v(T)}{v_{\max}}\right)^{\alpha(\mu)} (\mu - 1)$$
(9)

Donde  $D_{max}$  es el desplazamiento máximo en un lugar (valor del espectro de desplazamientos cuando  $T \rightarrow \infty$ ) para un sismo de magnitud y distancia epicentral conocido. Este parámetro se puede generar a partir del espectro de amplitudes de Fourier (EAF) de desplazamiento y a continuación haciendo uso de la teoría de vibraciones aleatorias (TVA). Además de los términos ya descritos, SE TIENE:

V<sub>max</sub> es la velocidad máxima del terreno en cm/s

D<sub>max</sub> es el desplazamiento máximo del terreno en cm

- $\alpha$  es el exponente dependiente de la ductilidad al cual está elevado el espectro normalizado de velocidad
- $\beta$  es el exponente dependiente de la ductilidad al cual está elevado el espectro normalizado de desplazamiento

El modelo que reconoce la rigidez de posfluencia de las estructuras para la extensión al caso bilineal del factor de reducción de Ordaz y Pérez Rocha (1998) tiene la siguiente forma:

$$R(\mu) = 1 + \alpha_{y}(\mu - 1) + \left(\frac{S_{d}}{D_{\text{max}}}\right)^{\beta_{5}} \left(\mu - 1 - \alpha_{y}(\mu - 1)\right)$$

$$\beta_{5} = 0.388(\mu - 1)^{0.173}(\alpha_{y}\mu + 1)$$
(10)

Para el caso del modelo bilineal (ecuación 10) se realizaron cálculos sobre 50 registros de terreno blando y 50 registros de terreno firme de sismos de México y Colombia para poder comparar los valores de R con los dados por el modelo propuesto. En la Tabla 6.1 se presentan los valores de la desviación estándar de logaritmos naturales entre los factores de reducción para diferentes suelos, ductilidades y rigideces de pos fluencia, correspondientes al modelo y a los registros.

Tabla 6.1	Desviación estánda	del factor de reducc	ión para sistemas bilineales
-----------	--------------------	----------------------	------------------------------

	σ SUELO FIRME			σ SUELO BLANDO		
$\alpha_y$	μ=2	μ=3	μ=4	μ=2	μ=3	μ=4
0.00	0.21	0.21	0.23	0.21	0.26	0.26
0.10	0.20	0.21	0.22	0.20	0.22	0.17
0.20	0.18	0.22	0.26	0.14	0.16	0.24
0.30	0.16	0.22	0.25	0.16	0.22	0.25
0.50	0.14	0.20	0.21	0.12	0.21	0.32



## 6.4 COMPARACIÓN DEL MODELO PARA CÁLCULO DE R CON RESULTADOS A PARTIR DE REGISTROS INSTRUMENTALES

Los factores de reducción basados en el modelo propuesto (ecuación 10) pueden emplearse, de forma directa, sobre los espectros de diseño evaluados mediante teoría de amenaza sísmica. Para poder aplicar esta metodología se debe contar con el desplazamiento máximo asociado al período de retorno en cuestión (ecuación 10) el cual debe calcularse con el modelo probabilístico descrito en el Capítulo 5.

Conociendo el desplazamiento y la velocidad máxima asociada a un mismo período de retorno en un sitio determinado y las leyes de atenuación asociadas, se puede aplicar el factor para evaluar los espectros de resistencia y desplazamientos de diferentes demandas de ductilidad. Adicionalmente, la rigidez de pos fluencia de las estructuras está siendo reconocida en el desarrollo de las nuevas técnicas de diseño sismorresistente. Sin embargo, existe un vacío al respecto debido a que, siguiendo los conceptos de Newmark y Veletsos (1960), muchos de los factores de reducción que existen hasta el momento consideran estructuras elastoplásticas.

Empleando información de sismos registrados en la zona se puede corroborar el correcto comportamiento del modelo propuesto en la ecuación 10 para el cálculo del factor R. En las Figura 6.5 se presentan los espectros de resistencia para diferentes demandas de ductilidad del sismo de Pizarro en 3 puntos de control (INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro respectivamente). La relación entre la resistencia del sismo elástico y la resistencia asociada a una demanda de ductilidad es el factor de reducción obtenido a partir de registros, el cual debe compararse con el calculado a través del modelo propuesto.



Figura 6.5 Espectro de Resistencia para el sismo de Pizarro para las estaciones INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro



En la Figura 6.6 se presentan los espectros de los factores de reducción (para una ductilidad de 3) comparados con la aproximación propuesta y con el factor de Newmark y Hall. En las figuras se puede observar una alta similitud entre el factor R de ductilidad calculado y el propuesto en la ecuación 10. Igualmente, muestran la diferencia que existe entre el R exigido por la NSR-98 y el propuesto por Ordaz y Pérez Rocha.



Figura 6.6 Espectro de Resistencia para el sismo de Pizarro, con una ductilidad de 3. Para las estaciones INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro

En las Figura 6.7 se comparan los espectros de resistencia a una demanda prescrita con las respuestas teóricas del modelo propuesto, observándose en todos los casos una correlación aceptable.





Figura 6.7 Espectro inelásticos de aceleración para el sismo de Pizarro, con una ductilidad de 3. Para las estaciones INGEOMINAS, Hospital Universitario y Navarro



## 6.5 AJUSTE DE ESPECTROS POR DUCTILIDAD

La presentación anterior corresponde al estado actual de la evaluación de los espectros de diseño inelásticos. Éstos son los empleados en el diseño estructural y corresponden a lo que incluirán las normativas futuras de diseño sismorresistente en relación a este tema.

Con base en el modelo propuesto anteriormente para el cálculo de los espectros de los factores de reducción de la respuesta por ductilidad, se podría realizar un ajuste a los espectros de amenaza elásticos obtenidos en los análisis presentados en el Capítulo 5. De esta manera, al utilizar los factores de reducción establecidos por las NSR-98, se pueden obtener los espectros de resistencia compatibles con los niveles de reducción por ductilidad encontrados anteriormente.

## 6.5.1 Ajuste de Espectros por Ductilidad de Palmira

Para efectos de evaluar la incidencia de la corrección por ductilidad de los espectros, en la Figura 6.8 se presentan los espectros de respuesta y los espectros corregidos con la metodología propuesta para cada uno de los puntos de control en el municipio de Palmira



Figura 6.8 Ajuste de espectros por ductilidad del municipio de Palmira.









Continuación Figura 6.8 Ajuste de espectros por ductilidad del municipio de Palmira.



Como puede observarse de los análisis realizados, para el caso de los municipios estudiados y por tratarse de suelos dominantemente duros, las correcciones propuestas no tienen una incidencia relevante en las formas finales de los espectros de diseño corregidos con respecto a los espectros sin corregir. Por esta razón, en el presente caso no se aplica el ajuste propuesto y los espectros elásticos de diseño corresponden a los mismos obtenidos en el análisis.



## 6.6 SUAVIZADO DE ESPECTROS

Para efectos de definir los espectros de diseño, los espectros resultantes del análisis de de respuesta dinámica se someten a un proceso de suavizado asociado a la incertidumbre que existe en el cálculo del periodo estructural. Gracias a este proceso se logran suavizar los picos y los valles del espectro de amenaza uniforme que se presentan en la zona de periodos cortos (periodos inferiores a 0.5 seg).

#### 6.6.1 Proceso de suavizado

Partiendo de los espectros que resultan de los análisis de respuesta dinámica (ver Capítulo 5), se aplica un proceso de suavizado gracias al cual se tiene en cuenta la incertidumbre asociada con el cálculo del período estructural.

El proceso de suavizado por incertidumbre del periodo estructural incluye los siguientes pasos:

- 1. Seleccionar el espectro asociado a un periodo de retorno de 475 años para cada uno de los puntos de control.
- 2. Se aumenta el número de ordenadas del espectro seleccionado mediante un procedimiento tipo Bezier
- 3. Para cada ordenada del espectro se establece un rango comprendido entre el 80 % y el 120 % del periodo de análisis. Es decir para un período de 1 segundo se selecciona simultáneamente períodos de 1.2 y de 0.8 y así para todos los periodos.
- 4. Se calcula la aceleración espectral promedio y la desviación estándar de los valores comprendidos dentro del rango seleccionado.
- 5. Se calcula el valor promedio más una desviación estándar y este valor se asigna a la aceleración espectral de la ordenada espectral seleccionada.
- 6. Se continúa el proceso para todos los puntos del espectro.

El proceso se realiza para todos los espectros asociados a un periodo de retorno de 475 años encontrados para los puntos de control.

En las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se presentan los resultados de realizar el proceso de suavizado descrito anteriormente sobre la forma de los espectros de diseño en cada uno de los puntos de control de cada uno de los municipios (Palmira, Tuluá y Buga respectivamente).





Figura 6.11 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural para el municipio de Palmira.



# 6.7 MAPAS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

### 6.7.1 Generalidades

Tal y como se describió en el Capítulo 2, los municipios de Palmira, Tulúa y Buga están asentados en depósitos del cuaternario principalmente, altamente heterogéneos en cuanto a los materiales que conforman sus estratigrafías dominantes pero relativamente uniformes en términos de la rigidez general. Por lo anterior, la respuesta dinámica esperada para las diferentes zonas de cada una de las ciudades es en buena medida homogénea. A pesar de esta aparente uniformidad, cada uno de los municipios presenta particularidades que deben tenerse en cuenta en la especificación de diseño ya que generan variaciones que pueden llegar a ser significativas. Teniendo en cuenta dicha necesidad, en este numeral se presenta la zonificación propuesta para cada una de las ciudades complementada con la metodología propuesta para llevar a la práctica los resultados obtenidos.

Aunque en un principio se intentó dividir cada una de las tres ciudades en zonas homogéneas con su correspondiente espectro de diseño, esto no fue posible debido principalmente a la dificultad de definir los límites de cada una de las zonas y a las variaciones continuas en la respuesta dinámica de un sitio a otro. Teniendo en cuenta esta dificultad se decidió realizar una interpolación de los espectros de diseño encontrados en los puntos de control (un punto de control corresponde a la ubicación de cada uno de los sondeos geotécnicos realizadas en cada uno de los tres municipios) siguiendo el procedimiento de kringing [Golden Software, 2002]. Mediante este procedimiento se encuentra el espectro de diseño para cualquier punto que se encuentre al interior del perímetro urbano o de las zonas de expansión de cada una de las tres ciudades estudiadas, logrando lo siguiente:

- a) Representar en forma confiable la respuesta obtenida en cada uno de los puntos de control, logrando con esto una optimización del diseño.
- b) Lograr una transición bidimensional (en el plano) suave y uniforme entre todos los espectros de los puntos de control disponibles dentro del perímetro urbano de cada ciudad
- c) Evitar especificaciones muy conservadoras al tratar de proponer zonas de comportamiento sísmico uniformes que al parecer no son de fácil delimitación en los municipios estudiados.
- d) Permitir la adopción de nuevos puntos de control en el futuro sin necesidad de modificar todos los resultados del estudio.

Las principales limitantes del procedimiento implementado para la zonificación sísmica de las tres ciudades estudiadas radican en el número de puntos de control en cada una de las ciudades y la falta de puntos adicionales en las zonas de expansión de cada una de las cabeceras municipales. A medida que se cuente con un mayor número de puntos de control se diminuirá considerablemente la incertidumbre con respecto a los espectros de diseño en puntos lejanos a los puntos de control. Sería conveniente que en estudios posteriores se realicen



nuevas perforaciones (principalmente en las zonas de expansión y en la ronda de los ríos) que ayuden a complementar los resultados de los trabajos realizados en la presente investigación.

El espectro de diseño en cada uno de los puntos de control (sondeos geotécnicos) corresponde al espectro suavizado siguiendo el proceso explicado en los numerales anteriores y que se presentan en el numeral 6.6.

#### 6.7.2 Procedimiento practico para definir el espectro de diseño

Para efectos de definir los espectros de diseño en un predio específico de la ciudad que tenga en cuanta la metodología anterior, se ha desarrollado un sistema de visualización (SISValle V 1.1) en el cual se han incluido los espectros interpolados, según lo explicado anteriormente, cada 50 m. El sistema indicará al usuario el espectro de diseño suavizado recomendado en cada punto de la ciudad, mediante la selección visual (o con coordenadas) del predio exacto a estudiar con ayuda de todo el sistema de visualización disponible. En el Capítulo 9 se explica en detalle el funcionamiento del sistema y el procedimiento para obtener los espectros de diseño en cualquier punto de la ciudad.

#### 6.7.3 Procedimiento jurídico para definir espectros de diseño

Adicionalmente a los anterior y para efectos de la adopción "jurídica" de los espectros de diseño obtenidos del estudio de microzonificación, se desarrolla un sistema de cuadriculas sobre la ciudad con dimensiones de 300 m x 300 m y distribuidas como se indica en las Figuras 6.14, 6.15 y 6.16 para cada los municipios de Palmira, Tulúa y Buga respectivamente. Cada cuadrícula se identifica con un número de referencia y con coordenadas mínima y máxima en longitud y latitud. En el anexo 6.1 se presenta el listado de las cuadriculas y las coordenadas correspondientes para cada uno de los tres municipios. Adicionalmente se indica el espectro de diseño para cada uno de los cuadrantes.

De acuerdo con lo anterior, el procedimiento "jurídico" para seleccionar el espectro de diseño de un predio específico es el siguiente:

- Definir las coordenadas del centroide del predio. Para este efecto se puede utilizar como apoyo el sistema SISValle V 1.1 que se presenta en el Capítulo 9 o se puede recurrir al mapa oficial del municipio.
- 2. Una vez definida las coordenadas se buscará el cuadrante en el cual se encuentra el centroide del predio para lo cual se utilizaran las coordenadas mínimas y maximas en latitud y longitud de cada cuadrante.

Es decir que la Latitud del centroide del predio esté entre el valor mínimo de latitud del cuadrante y el valor máximo de latitud del cuadrante

Y que la Longitud del centroide del predio esté entre el valor mínimo de longitud del cuadrante y el valor máximo de longitud del cuadrante

 Una vez ubicado el cuadrante se utilizará como espectro de diseño el espectro asociado a cada cuadrante, el cual se especifica en las mismas tablas relacionadas en el Anexo 6.1.





Figura 6.14 Mapa de cuadrantes para el municipio de Palmira.



## 6.7.4 Mapas de Microzonificación sísmica

La metodología de microzonificación propuesta no establece como tal zonas homogéneas o sectores de igual comportamiento. Por esta razón, no es posible adoptar como tal un mapa de microzonificación sísmica. Se tiene más bien un mapa de variación continua de espectros de respuesta de diseño en toda la ciudad. Para efectos de ilustración únicamente se presentan mapas de microzonificación sísmica con tendencias de variación en los espectros.

#### 6.7.4.1 Microzonificación del área urbana de Palmira

El área urbana de Palmira presenta una relativa homogeneidad en la respuesta sísmica esperada. Los estudios adelantados muestran la existencia de zonas cuyos depósitos de suelos son más blandos en comparación con otras; por consiguiente, se pueden esperar variaciones sensibles en las formas espectrales de diseño. La Figura 6.17 presenta en forma ilustrativa las variaciones en las formas espectrales de diseño para la ciudad.





Figura 6.17 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Palmira.



## 6.8 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS

#### 6.8.1 Mapas a nivel de departamento

Con base en el sistema SISValle V 1.1 (ver detalles del mismo en el Capítulo 9), se presentan una serie de mapas de amenaza representativos para cada uno de los municipios. Como se explica en detalle en el Capítulo 9 el sistema permite obtener mapas de amenaza a nivel del Departamento (para terreno firme) o a nivel del área urbana de cada municipio (a nivel de superficie del terreno).

En las Figuras 6.20, 6.21 y 6.22 se presentan los mapas de amenaza sísmica en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento máximo en terreno firme para un periodo de 475 años.



Figura 6.20 Aceleración máxima en terreno firme, Tr = 475 años.



Figura 6.21 Velocidad máxima en terreno firme, Tr = 475 años.





Figura 6.22 Desplazamiento máximo en terreno firme, Tr = 475 años.

## 6.8.2 Mapas de amenaza para Palmira

En las Figuras 6.23 a 6.29 se presentan los siguientes mapas de amenaza para el área urbana del municipio de Palmira:

- Aceleración en superficie del terreno para T=475 años
- Velocidad máxima del terreno para T=475 años
- Desplazamiento máximo del terreno para T=475 años.
- Juego de mapas de aceleración espectral en superficie del terreno para T=475 años y para varios períodos estructurales (T=0.5, T=1.0 y T=1.5 segundos).
- Aceleración máxima en superficie del terreno para T=2500 años.



Figura 6.23 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 años para Palmira.





Figura 6.24 Velocidad máxima en terreno, Tr =475 años para Palmira.



Figura 6.25 Desplazamiento máximo en terreno, Tr =475 años para Palmira.



Figura 6.26 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg para Palmira.





Figura 6.27 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg para Palmira.



Figura 6.28 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg para Palmira.



Figura 6.29 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =2500 años para Palmira.



## 6.9 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA INSTRUMENTO JURÍDICO DE ADOPCIÓN DE LOS ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN

La adopción por parte de las administraciones municipales de la reglamentación que ponga en práctica obligatoria los resultados de los estudios de microzonificación deben tener en cuenta las siguientes consideraciones técnicas.

- Todas las recomendaciones de diseño aquí establecidas son complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998 y Decreto 34 de 1999 y en ningún caso podrá tomarse un requisito inferior al establecido por la Norma.
- 2. Todos los espectros de diseño recomendados son a nivel de la superficie del terreno para un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%.
- 3. En las zonas con efectos topográficos de consideración como son las zonas cercanas a los bordes de los taludes deben aplicarse, factores de amplificación de acuerdo con las recomendaciones del ingeniero geotécnico.
- 4. Para estructuras con períodos de vibración fundamental mayores o iguales a 2.0 seg deben adelantarse análisis sísmicos especiales que se salen del alcance de las presentes recomendaciones.
- 5. Podrán utilizarse fuerzas de diseño diferentes a las que resultan de la utilización de los espectros de diseño recomendados siempre y cuando se justifique el valor empleado con análisis de respuesta de perfiles debidamente estudiados, utilizando hipótesis equivalentes a las dadas en el presente estudio y atendiendo los requisitos mínimos establecidos en las NSR-98 (Capítulo A.2). Para el efecto deberán utilizarse en el análisis al menos los tres (3) acelerogramas de diseño establecidos en el presente estudio y que se incluyen en formato digital anexo. En ningún caso la fuerza sísmica de diseño adoptada podrá ser inferior al 80% de la fuerza que resulta utilizando los espectros dados en el presente estudio.
- 6. Para efectos de aplicación de requisitos complementarios de las NSR-98, los municipios de Palmira, Tulúa y Buga siguen perteneciendo a una zona de Amenaza Sísmica Alta.
- Los valores de Aa para cada una de las zonas de la ciudad corresponderán a los valores de aceleración espectral que resulten del espectro de diseño especificado en el sitio para un periodo estructural igual a cero (T = 0.0 seg).
- 8. Para el caso de estructuras de período corto (viviendas de uno y dos pisos y edificaciones de muros de pocos pisos), la selección del valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para el sistema estructural, R, deberá realizarse de acuerdo con lo establecido en el numeral A.2.9.4 del Decreto 34 de 1999.



- 9. En Terrenos con pendiente superior a 10 grados (17%), deben realizarse estudios de estabilidad de taludes, geotécnicos y estudios adicionales de amenaza por fenómenos de remoción en masa que incluyan los efectos sísmicos. Para este efecto se deben aplicar tanto lo contenido en la sección A.2.4.1.6 y el Título H del Decreto 33 de 1998.
- 10. Podrán considerarse en el diseño los efectos de la interacción dinámica suelo estructura de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Apéndice A-2 de la NSR-98.

Con base en estas consideraciones se presenta un borrador de Acto Administrativo en el Anexo 6.1.



## 6.10 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

Con base en los resultados encontrados en el presente estudio se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales:

- 1. Los datos disponibles hasta el momento referentes a acelerogramas de eventos sísmicos registrados en estaciones ubicadas en los suelos de la zona de estudio resultan vitales para adelantar los estudios de microzonificación sísmica de los municipios pero son aún insuficientes para poder proponer modelos de comportamiento general. Se requiere en general mucha más instrumentación especialmente en la zona de suelos blandos para lograr captar las señales de sismos que ocurran en el futuro. Esta instrumentación debe hacerse a través de acelerógrafos distribuidos en las diferentes zonas de los municipios, con el fin de calibrar el modelo propuesto por este proyecto.
- 2. Para efectos de conocer el comportamiento global del depósito se recomienda la instalación de instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.
- 3. Otro aspecto que requiere mayor estudio es el de la caracterización geotécnica en profundidad de los sitios bajo estudio. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse en el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. Además deben realizarse perforaciones adicionales en las diferentes zonas de la ciudad con el fin de confirmar la delimitación de cada una de ellas y definir si las estratigrafias típicas propuestas en este estudio se mantienen o deben modificarse. Debe darse prioridad a los métodos de investigación de campo y a ensayos básicos como son la medición de la velocidad de onda de cortante en el sitio con métodos como el Down Hole o similares. En cuanto a la ubicación de posibles nuevos puntos de investigación deberá darse prioridad a las zonas de expansión de cada uno de los municipios y las zonas de la ciudad en que los puntos de control se encuentren mas alejados.
- 4. Los aspectos de modelación bi y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo. Es necesario adaptar programas de computador avanzados en máquinas mucho más potentes que los computadores personales. Es necesario adentrarse en la modelación bi y tridimensional con la utilización de computadores de alto desempeño con múltiples procesadores. Se requiere en este campo la participación de grupos internacionales de apoyo. La instrumentación resulta vital para conocer mejor las características de amplificación de diferentes depósitos y el comportamiento de los efectos topográficos. Las investigaciones geofísicas a gran profundidad se requieren para modelar la forma general de la cuenca y la conformación tridimensional de los depósitos característicos que dominan la respuesta dinámica.
- 5. Los efectos geométricos locales, asociados a la heterogeneidad de los depósitos de suelo o a cambios topográficos en superficie (como el caso de taludes o colinas) deben evaluarse en detalle a nivel local de cada municipio para efectos de complementar la normativa de diseño. Para esto se recomienda igualmente adelantar una instrumentación básica que permita el dimensionamiento de estos efectos.



## 6.11 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Aguilar, R., A. Arciniega, M. Ordaz, L.E. Pérez-Rocha, E. Reinoso, y F.J. Sánchez-Sesma. 1991. Respuesta sísmica del Valle de México: Aplicaciones y teoría, Informe final de actividades del Centro de Investigación Sísmica A.C. a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.

Alcaldía de Manizales & Universidad de los Andes. 1998. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales - Caldas, Universidad de los Andes, Marzo de 1998

**Berg. Glen V.** 1982. Seismic Design Codes and Procedures. Earthquake Engineering research Institute.

Chopra Anil. K. 1982. Dynamics of Structures. Earthquake Engineering Research Institute.

**Corporación Autónoma Regional del Quindio, CRQ.** 1997. Microzonificación Sísmica Preliminar de la Cuidad de Armenia - Quindio", Universidad de los Andes, Julio de 1997

**García L. E**. 1996. Dinámica Estructural y Diseño Sismorresistente. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

Golden Software. 2002. SURFER, Surface Mapping System Version 8.00, February 2002.

Housner G.W & Jennings P.C. 1982. Earthquake Design Criteria. Earthquake. Engineering research Institute.

**Hudson D.E.** 1982. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering research Institute.

**INGEOMINAS & Universidad de los Andes.** 1992. Microzonificación Sísmogeotectonica de Popayán.

INGEOMINAS. 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico-Científico.".

**Meli, R.** 1986. Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la Ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), *Informe Interno DE/ESTV2/1*, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Meli, R. & Avila, J. 1988. Analysis of building response, Earthquake Spectra, 5, 1-18.

**Miranda E.** 1991. Seismic and Upgrading of existing structures. Tesis Doctoral. Universidad de California en Berkeley- Berkeley, CALIFORNIA, Estados Unidos de América

**National Earthquake Hazards Reduction Program.** 1994. Recommended provisions for seismic regulation for building". Part 1 and 2. 1994 Edition.

**Newmark N.M. & Hall W.J.** 1982. Earthquake Spectral and Design. Earthquake Engineering Research Institute.

**Ordaz, M, Reinoso E. y Pérez Rocha L. E.** 1996. Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos, Ingeniería Sísmica, (53) 25-35.



**Ordaz M. & Perez-Rocha L. E.** 1998. Estimation fo strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach, Earthquake Engineering Structural Dynamics 27 – 99-901.

**República de Colombia.** 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997.Decreto 33 de 1998.

Rosas H. & Ruiz, S (1990), Factor de amplificación de la respuesta de estructuras con resistencia asimétrica, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 39, pp. 15-26

Sarria A. 1996. Ingeniería Sísmica. Ediciones UNIANDES.

**Seed H. B, Idriss & I.M Lysmer.** 1982. Ground motions and soil liquefaction during Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.

**Universidad de los Andes & INGEOMINAS.1997**. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá.

Universidad de los Andes. 2002. Microzonificación Sísmica de la ciudad de Manizales.

**Veletsos A. S. & Newmark N. M.** 1960. Effect of inelastic behavior on the response of simple system to earthquake motion. Proceedings of second world conference on earthquake engineering 895 – 912.