

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

La probabilidad de ocurrencia de grandes desastres con consecuencias graves en las poblaciones colombianas crece día a día, por la aparición ó consolidación de escenarios de riesgo a diversas escalas (local, regional, o nacional), como consecuencia de la falta de planificación, el deterioro urbanístico, el crecimiento poblacional, el déficit habitacional, la construcción inadecuada de viviendas y/o asentamientos, además por las políticas económicas y sociales incipientes, que han transformado las estructuras sociales, económicas, físicas, culturales y medioambientales del país, haciéndolas susceptibles a sufrir daño o pérdida, frente a los peligros o amenazas naturales y/o antrópicas. (*Maskrey & Romero, 1986; Wilches, 1989*).

La vulnerabilidad de cualquier elemento estructural, físico o socioeconómico expuesto a un peligro natural es la probabilidad de resultar destruido, dañado o perdido. Esta no debe ser entendida como un proceso estático, sino que debe considerarse como un proceso dinámico, que integra el cambio y el desarrollo, alterando y afectando a todos los elementos expuestos (*Maskrey & Romero, 1986*).

Se puede decir que la amenaza debida a fenómenos naturales, por lo menos actualmente, solo puede ser observada, descrita y cuantificada, a diferencia de la vulnerabilidad que se construye día a día al interior de la sociedad, lo que la hace intervenible y modificable (*Jaramillo & Ortega, 1992*), a través de la toma de medidas estructurales, como la intervención de la vulnerabilidad de las edificaciones y medidas no estructurales con la regulación de los usos del suelo y el debido control por parte de los organismos competentes del cumplimiento de las normas de construcción sismo resistente (*Vargas & Tapia, 2001*).

En este capítulo se definen de una manera global los conceptos sobre riesgo, amenaza y vulnerabilidad, elementos teóricos fundamentales que se emplearán a lo largo del trabajo, haciendo especial énfasis en el tema de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, con base en tres ejes fundamentales: conceptos, hipótesis y teoría.

2.2 CONCEPTOS GENERALES

Las definiciones que se plantean a continuación, son las propuestas por la UNDRO (Organización de las Naciones Unidas encargado de la atención de desastres) en el año de 1979 en el reporte "*Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad*", conceptos que son ampliamente aceptados a escala mundial (*Cardona, 1989*) y que han sido tomados para el desarrollo del presente estudio.

1. Amenaza ó Peligro (**Hazard-H**): es la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente dañino con una cierta intensidad, en un periodo de tiempo y en un sitio determinado.
2. Vulnerabilidad (**Vulnerability-V**): grado de pérdida de un elemento o un grupo de ellos, resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada, expresada en una escala desde 0 (sin daño) hasta 1 (colapso total) o en cualquier escala proporcional a esta.
3. Riesgo Específico (**Specific Risk-Rs**): es la probabilidad esperada de pérdidas debidas a la ocurrencia de un fenómeno natural, expresado como una función de la amenaza ó peligro y la vulnerabilidad.

$$R_s = (H \times V)$$

4. Elementos en Riesgo (**Risk Elements-E**): Definidos como la población, las edificaciones, las obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades, la infraestructura, entre otros, susceptibles a ser afectados por un fenómeno natural.
5. Riesgo Total (**Total Risk-Rt**): es el grado de pérdidas debidas a un fenómeno natural, como una función del riesgo específico y el valor de los elementos en riesgo.

$$R_t = (E) \times (R_s) = (E) \times (H \times V)$$

2.3 AMENAZA SÍSMICA

Colombia está localizada en una de las zonas de mayor actividad sísmica del planeta, denominado “Cinturón circumpacífico”, que corresponde a los bordes del Océano Pacífico, en su territorio convergen tres placas tectónicas, Nazca, Suramericana y Caribe, como se muestra en la figura 1 (Tomado de la NSR-98, 1998).

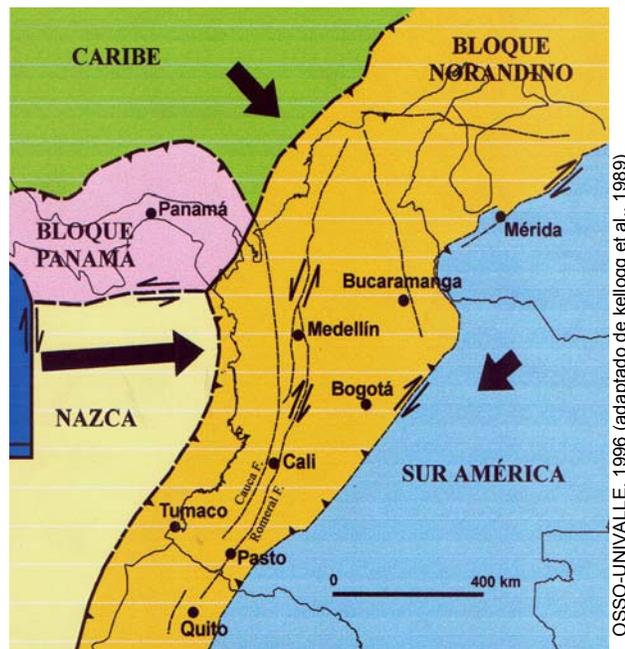


Figura 1. Marco tectónico regional

El país está atravesado por fallamientos que tienen dirección predominante norte-sur, coincidiendo con las cordilleras Central, Occidental y Oriental. Su principal accidente sismo tectónico es la zona de sub-ducción en el Océano Pacífico (NSR, 1998).

En el contexto de la ciudad de Cali, según *Velásquez & Meyer (1994)*, el rasgo tectónico más importante de la localidad lo constituye el “Sistema de fallas Cauca”, una de cuyas trazas denominada “Falla Cali” se ubica paralela al piedemonte oriental de la Cordillera Occidental, y desde el punto de vista de su relevancia para la amenaza sísmica sobre la ciudad, su grado de actividad conocido es bajo (*Woodward-clyde, 1983; OSSO, 1987-1992* , en *Velásquez & Meyer, 1994*).

Las fuentes sismogénicas son:

- La zona de sub-ducción, frente a la Costa del Pacífico, con eventos superficiales con magnitudes superiores a 8,6.
- La zona de Wadatti Benioff , la zona de interacción entre la placa de Nazca, subducida y la corteza continental, con eventos de magnitudes mayores a 6.
- Los sistemas de fallas Romeral, Cauca y otros (el primero fuente generador de los Sismos de Popayán en 1983 y el del Eje Cafetero el 25 de enero de 1999).
- En el Occidente Colombiano se libera aproximadamente más del 80 % de la energía Sísmica del país, la cual la convierte una zonas de mayor complejidad y actividad tectónica *Velásquez & Meyer, 1994*).

En la figura 2 se ilustran los tres tipos de fuentes sismogénicas relevantes en el SW de Colombia. **El número 1** corresponde a la zona de subducción, en el límite de convergencia entre las placas de Nazca y Sur América. Los eventos ocurren hasta profundidades de unos 40 Km, aunque en la figura se representan a mayor profundidad. **El número 2** delimita, aproximadamente, la zona Wadati-Benioff, con profundidades desde 60 hasta más de 120 Km. **El número 3** es un ejemplo de sismicidad superficial, cortical; corresponde a la zona de réplicas del terremoto del 6 de junio de 1994, en la región de Tierradentro en Paéz.

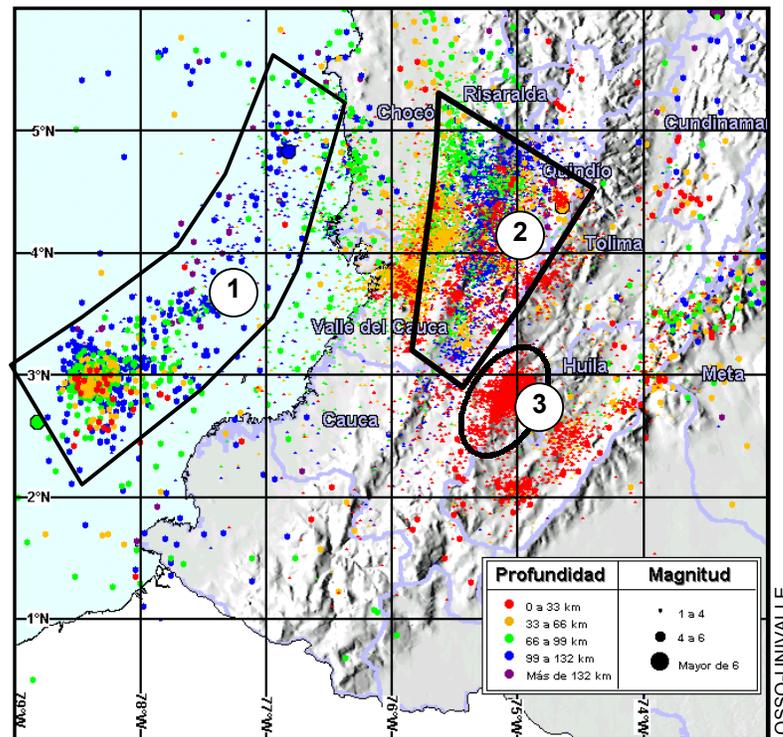


Figura 2. Mapa de sismicidad regional.

2.3.1 Sismicidad histórica.

El primer terremoto del catálogo colombiano que afectó a Popayán y a Cali ocurrió en 1556. La ciudad ha sido afectada por terremotos a más de 400 km entre los cuales se destacan los del 31 de enero de 1906 y 12 de diciembre de 1979, con epicentro frente al Litoral Pacífico colombo – ecuatoriano.

Los últimos sismos fuertes con algunos daños en Cali ocurrieron el 19 de noviembre de 1991 y el 18 de octubre de 1992, el 6 de junio de 1994 (Páez) y el del 8 de febrero de 1995 (Calima-Darién).

La Red Sismológica del Sur Occidente ha registra en promedio un sismo mensual sentido en la región. Se puede decir entonces, que en el contexto de una ciudad localizada sobre diversidad de suelos y con tipologías constructivas antiguas y modernas se presentan diversos escenarios de riesgo sísmico

Los efectos generados por sismos en las edificaciones de la ciudad de Cali se han concentrado principalmente en dos zonas de la ciudad y durante dos periodos de su acontecer histórico. El primer periodo se puede establecer entre 1556 -1925, cuando la ciudad era todavía un pequeño poblado de no más de 50.000 habitantes, conformado en su gran mayoría por edificaciones de adobe, bahareque y ladrillo, con cubiertas de barro, de las cuales aún quedan algunos vestigios y que hoy conforman el centro histórico de Cali.

Se puede decir, de acuerdo con los archivos y recopilaciones históricas y documentales, que la mayoría de daños por terremotos, hasta 1925 se localizaron en la zona que hoy conforma el centro de la ciudad, afectando por lo general a las edificaciones de construcción tradicional de uno y dos pisos, además, de los templos religiosos que muchas veces sucumbieron al fenómeno sísmico.

El segundo periodo se puede establecer a partir de 1925 hasta el presente, en la "Cali moderna", donde la zona con mayor afectación ha sido la zona del área de influencia del Río Cañaveralejo, y que de acuerdo con *Rosales* (2001), los daños más graves ocasionados por terremotos en los últimos años se han concentrado en esta zona, afectando edificaciones de mayor altura, debido a la amplificación sísmica de los depósitos de suelo.

2.3.2 Catálogo macrosísmico.

La recopilación de este catálogo macrosísmico contiene datos sobre sismos reportados como sentidos en Cali desde 1566 hasta el presente. Según *Rosales* (2001), la documentación de estos sismos proviene principalmente de dos catálogos: el construido por HJ. Meyer -MEY- para Woodwad-Clyde (1983) (y de éste para la CVC, en el Proyecto Calima III y en el Estudio del Riesgo Sísmico para Cali, 1989), y el construido por el Padre *Ramírez* (1975) y compilado en su libro: "Los terremotos en Colombia". Este catálogo fue complementado y compilado por *Rosales* (2001), con información del Archivo macrosísmico del OSSO, información del CERESIS, de NEIC y toda la información generada y copiada por la Red del Observatorio Sismológico

Para efectos de este trabajo, se reseñan los terremotos ocurridos entre 1556 a 1925, compilados por *Rosales* (2001), en el "Catalogo de Sismos Con Efectos en Cali 1556-2000", con efectos en las edificaciones localizadas en el centro de la ciudad (zona de influencia del área en estudio), cuando Cali todavía era un pequeño poblado.

Año de 1556.

"...ocurrió un terremoto, el mismo año 66, que arruino, especialmente en Popayan, los edificios de tapias y tejas que se empezaban a construir, pero dejo en pie los de bahareque o embarrado, que llamaban, y paja, como era casi su totalidad el caserio de Cali..." (descrito por Pedro Cieza de León en Arboleda, 1956)

"... Los pocos edificios que empezaban a construirse de tapia y teja, vinieron a tierra tanto en Cali como en Popayán y gracias a ser el resto cubiertos de paja, no quedo totalmente arruinada la ciudad..." (en Ramírez , 1975) según Arroyo 1907).

"...El primero de que hay noticia fue el de 1566, que destruyo las pocas edificaciones de tapia y teja que existían, quedando en pie solamente las de paja..." (en Ramírez (1975) según Aragón, 1941).

4 de Mayo de 1688.

“...Se sintió un movimiento terráqueo bastante fuerte que causo daños en la ciudad de Cali, consistentes principalmente en el cuarteó de edificios...”(OSSO para UNDRO/ACD/ONAD, 1989 con base en Ramírez, 1975)

9 de Julio de 1766.

En Julio 1766 ocurrió un terremoto que afectó varios templos de la ciudad y varias casas.

“...Las casas bajas , han quedado con poca diferencia del mismo modo arruinadas, aunque en las del barrio San Francisco unas padecieron mucho, y otras nada, y aún no escapándose las de paja, cayeron 4 en diversos barrios...”

(del Padre Francisco Xavier Azzoni en Ramírez,1975).

“...El nueve del corriente julio acometió en esta ciudad como a las cuatro de la tarde un formidable terremoto y tan fuerte que desde los primeros remezones descompuso templos, casas altas y bajas del centro de la ciudad, en tal forma que no son capaces de habitación...”(Tomado de Velásquez & Meyer 1992, según actas del cabildo de Cali (Arboleda, 1956), en Rosales (2001).

“...Un formidable terremoto hizo estragos en la ciudad de Santiago de Cali, se desplomaron templos y casas...” (Silva, 1957), en Rosales (2001).

5 de noviembre de 1884.

"...Terremoto de anoche, miércoles a las 7:45 de la noche, sintióse un terremoto en esta ciudad muy fuerte, el mas fuerte que de 50 años a esta parte se haya sentido. Duró al parecer de 15 a 20 segundos y ha causado daños en lagunas casas y muy graves en la iglesia de San Pedro dejándola en situación de no poder servir para la celebración de los oficios religiosos...(El Ferrocarril, Cali 7 de noviembre de 1884), en Rosales (2001).

"...Temblor sentido en Cali..." (Milne, Jhon. "A Catalogue of Destructive Earthquakes", London, 1906), en Ramírez (1975).

25 de mayo de 1885.

"... En Cali se destruyo el templo de San Pedro, que fue reconstruido. En Popayán el movimiento Sísmico fue tan violento como en Cali" (del Diario del Pacífico, 1937), en Rosales (2001).

31 de enero de 1906.

"...sobre este evento cuyo proceso focal se inicio a centenares de kilómetros, frente a las costas de Ecuador y Colombia, varios reportes (archivos de prensa ;Sebastián, 1965; Rudolph & stzirtes, 19911) indican daños en Cali, principalmente en iglesias..." (Tomado de Velásquez & Meyer, 1992), en Rosales (2001).

6 de junio de 1925.

"... Los templos sufrieron graves daños en las frontis, torres, cúpulas, naves y arcos, San Pedro Y San francisco cerrados pues amenazan desplome. Ermita convertida en despojos, la Torre Santa Librada esta rota y habrá de caerse prontamente. los edificios de mas de un piso requieren costosas reparaciones..." (El Relator, 8 de junio de 1925), en Rosales (2001).

Se sintió en todo el país especialmente en el Occidente colombiano. Daños:

- *Iglesia de San Pedro, Catedral: bóveda cuarteada y los alfiles en la fachada y una parte de la torre se desplomaron.*
- *Ermita de Nuestra Señora de los Dolores, desapareció por completo; el muro que sostenía el óleo del Señor de la Caña quedó en pie.*
- *La antiquísima iglesia de Santa Rosa (situada en el parque del mismo nombre) fue destruida.*
- *Capilla de San Antonio, Iglesia de San Juan de Dios, Hospital San Juan de Dios y el templo de San Nicolás.*
- *La torre Mudéjar de San Francisco no sufrió daños pero la bóveda su sufrió graves daños estructurales (rajaduras de espesor de hasta 5 cm aparecieron en la cúpula lo que hacía prever su desplome).*
- *Muchas casas de particulares se desplomaron, especialmente las mas viejas.*

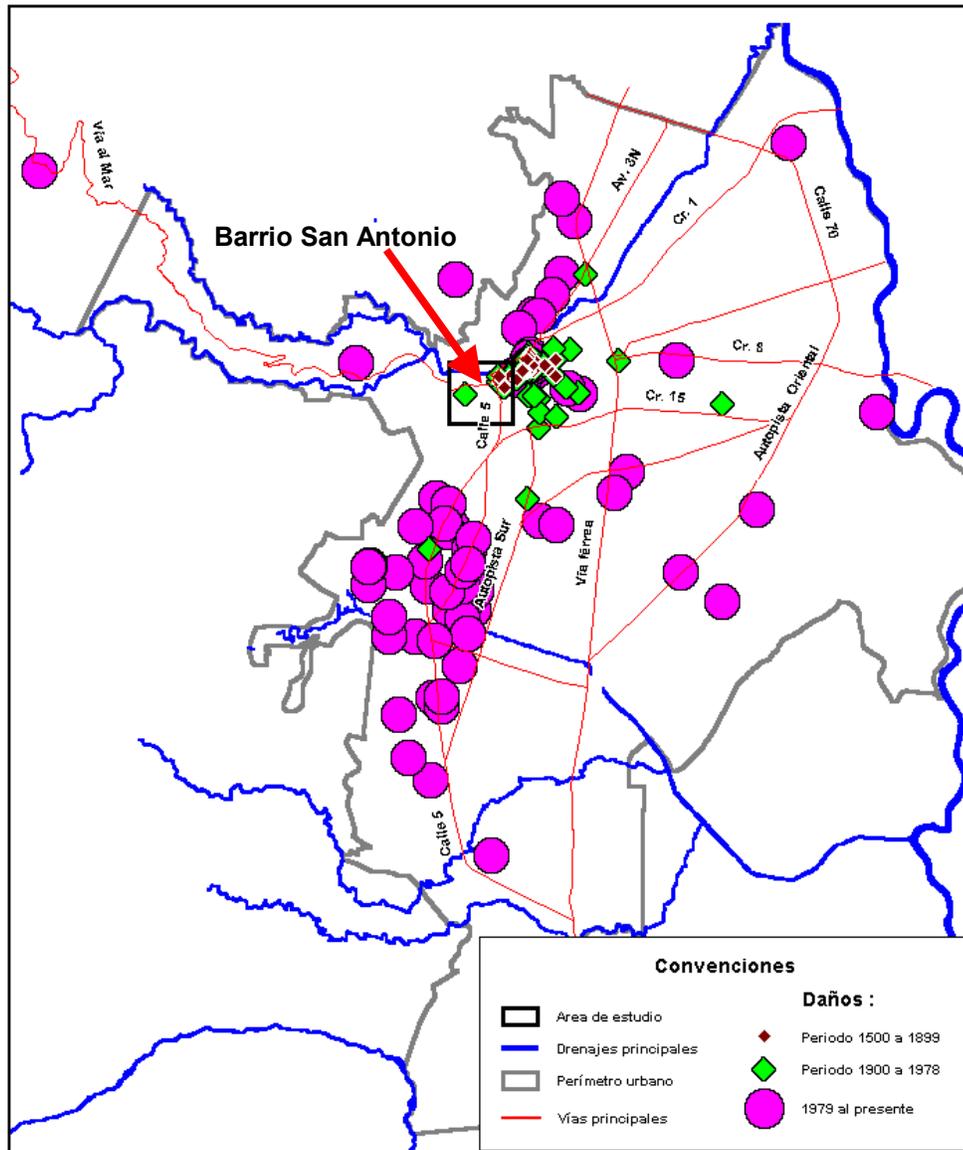
(Síntesis de daños a partir de *Despertar Vallecaucano*, No. 20, marzo-abril de 1975: “El terremoto del 7 de junio de 1925”), en *Rosales* (2001). Al parecer este terremoto es la única evidencia de daño sísmico en el barrio San Antonio, del cual se tiene reseña hasta ahora.*



Figura 4. Iglesia La Ermita en Cali, destruida por el terremoto de 1925.

De acuerdo con *Meyer* (1990), los daños observados en la Cali moderna, han sido debidos a singularidades en una u otra edificación y solo han resaltado como más o menos generalizados los efectos en edificaciones de gran volumen, estructura deficiente y poca densidad de muros, como iglesias antiguas, fracturamiento de muros en bloques de vivienda de cuatro y cinco pisos, caída de fachadas sin amarre y enchapados, y daños en líneas vitales aéreas, estos últimos debidos principalmente al efecto de péndulo invertido de transformadores en postes.

* En 1967:02:09 hubo daños en la cercana iglesia del barrio San Cayetano (tal vez hubo daños en casas de San Antonio ?).



Rosales, 2001

Figura 5. Localización de daños sísmicos en Cali

Tabla 3. Sismos con daños en Cali y sus fuentes sismogénicas.

ID	año:mes:día	LT	Prof.	MM	Mag.	Tipo	N	W	Fuente	Dist. a Cali
1	1566	--	--	VII	5	Ms	3	76.5		51
2	1672-1678	--	--	--	--	--	--	--	--	
3	1688:05:04	--	--	--	--	--	--	--	--	
5	1766:07:09	4:21	--	VIII	6	Ms	3.7	76.3	1	37
8	1884:11:05	23:45	--	--	5	Ms	3.5	76.4		14
9	1885:05:25	15:05	--	VI	6	Ms	2.5	76.5		106
15	1893:11:14	16:15	--	--	3.5	Ms	2.5	76.5		106
19	1906:01:31	10:36	?	?	8.9	Ms	1	81.5	2	617
20	1925:06:07	18:41	170	VII-VIII	6.8	Ms	3	78	2	172
23	1938:02:04	21:23	--	VII	7	Ms	5.1	75.5	3	215
30	1957:05:23	21:37	60	VII	6.7	Ms	3	76.5		51
35	1961:12:20	8:25	176	VI, VI+	6.5	Ms	4.6	75.6	3	163
36	1962:07:30	15:18	69	VII	6.7	Ms	5.2	76.4	3	194
40	1967:02:09	10:24	36	VII	6.3	Mb	2.95	74.8	4	190
54	1976:05:18	23:07	161		5.8	Mb	4.49	75.8		139
57	1979:11:23	18:40	105	VII	6.3	Mb	4.81	76.2	3	154
58	1979:12:12	2:59	24	VI	6.4	Ms	1.6	69.4	2	371
85	1991:11:19	17:28	33		6.0	Mb	4.8	77.4	2	165
95	1992:10:18	15:11	10		6.6	Mb	7.07	76.9	1	407
108	1994:06:06	15:47	12		5.9	Mb	2.91	76.1	1	85
117	1995:02:08	13:40	70		4.9	Mb	4.07	76.6	3	72
122	1995:08:19	16:43	118		4.7	Mb	4.09	75.7	3	190
148	1997:09:02	07:13	203		6.7	Mb	4.02	75.7	3	185
154	1997:12:11	02:56	170		6.2	Mb	4.02	75.9	3	92
161	1999:05:14	21:02	3		3,7	Mb	3,4	76,6	1	14

Fuentes Sismogénicas	
1	Falla cortical superficial
2	Zona de subudcción (superficie frente al litoral pacífico)
3	Zona de Wadatti Benniof (60 a 200 km, bajo el Valle del Cauca, sur del Chocó y Eje Cafetero)
4	Fallas del borde llanero, Huila aprox. 33 – 60 km

Fuente: Tomado de Rosales (2001).

Los sismos que han afectado a la ciudad de Cali, son de intensidades entre VI y VII. De acuerdo con Campos (1992) se puede esperar con una alta probabilidad, que en un futuro se repitan eventos de intensidades similares. Los efectos sobre las edificaciones que conforman la ciudad dependen en gran medida del número de pisos de la edificación (debido a sus periodos de vibración), La distancia del sitio donde se produce la liberación de energía o hipocentro, la geología de la zona y la topografía sobre el cual se asientan las edificaciones.

¡Error!Argumento de modificador desconocido.

Elaborado a partir de Rosales, 2001

Figura 6. Efectos de daños sísmicos en el sector de fundación de la ciudad de Cali desde 1556 hasta el presente.

Según la NSR-98, *“hasta finales de la década de 1970 existía la creencia errada dentro de los ingenieros nacionales que los edificios de baja altura no requerían diseño resistente”*. Esto significa que las ciudades colombianas tienen un gran inventario de edificaciones vulnerables frente a la acción sísmica. En la misma norma se menciona que los terremotos del 23 de noviembre de 1979, en el antiguo Caldas, del 12 de diciembre de 1979 en Tumaco y del 31 de marzo de 1983, en Popayán demostraron la deficiencia de la práctica constructiva en Colombia.

El comportamiento de las edificaciones afectadas por sismos ocurridos recientemente en el territorio nacional, se destacan daños estructurales graves que se presentaron en muchas de las edificaciones construidas antes de la vigencia del decreto 1400/83 y así mismo, en edificios construidos después de 1984. Un gran número de estos daños corresponden a las fachadas y muros interiores, es decir, en elementos no estructurales de edificaciones construidas antes y después de la vigencia del CCCSR-84. Además, la gran mayoría de víctimas fueron causadas por elementos no estructurales, desprendidos principalmente de las fachadas.

2.3.3 Escalas de magnitud e intensidad.

Las escalas de magnitud e intensidad se utilizan para cuantificar o medir los terremotos. La escala de magnitud está relacionada con la energía liberada como ondas sísmicas a través del suelo y que es registrado por sismógrafos; la intensidad es la apreciación cualitativa del impacto del evento sísmico en la población, las construcciones y la naturaleza (*Bommer, 1994*).

2.3.3.1 Intensidad.

De acuerdo con Bommer (1984) la primera escala de intensidad conocida fue la desarrollada por Paordini, quien presentó la intensidad de un terremoto ocurrido en el sur de Italia el 30 de julio de 1637 con base en cuatro grados; luego en 1828, Egen desarrolló una escala de cinco grados para medir los efectos del terremoto de la región del Rin en Alemania. Desde entonces se han propuesto por diversos investigadores más de cincuenta escalas de intensidad entre ellas las de Rossi & Forel en 1883 con 10 grados (*Beles et. al*, 1975 en *Bommer*, 1994), la escala de Mercalli en 1883 modificada por Cancani en 1904, Neumann en 1931, Richter en 1956 (*Richter*, 1958 en *Bommer*, 1994). Esta escala es la que se conoce hoy en día como Mercalli Modificada (MM), la cual tiene 12 grados.

En mayo de 1963, S. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karniik propusieron una nueva escala que también tiene 12 grados, que son equivalentes a los 12 grados de la escala de MM. Esta escala se le conoce como MKS, ampliamente utilizada en Europa (*Bommer*, 1994) al igual que la nueva escala macrosísmica europea EMS (1992) que corresponde a la Escala MKS Actualizada (tomado de la red mundial: Escala de intensidad macrosísmica europea. Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. En <http://www.ugr.es/~iag/ems92.html>).

La escala más común en América es la Modificada de Mercalli (MM) mostrada en la tabla 4. Va del grado I (detectado sólo con instrumentos) hasta el grado XII (destrucción total), y corresponde a daños leves hasta el grado V. Como la intensidad varía de punto a punto, las evaluaciones en un lugar dado

constituyen generalmente, un promedio; por eso se acostumbra hablar solamente de grados enteros (Espíndola & Jiménez, *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Las escalas de intensidad representan únicamente una medida del poder destructivo de un temblor o de los efectos que éste tuvo sobre seres humanos y edificaciones en un lugar determinado. Para un sismo es claro que la intensidad puede variar notablemente de un sitio a otro, dependiendo de la distancia al epicentro y de las condiciones geológicas locales. Es evidente, por tanto, que la intensidad es una medida relativa que da una idea de la severidad con que manifestaron los sismos en diversos sitios, pero no cuantifica la energía liberada de la fuente; (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Es común relacionar en un mapa los efectos de un sismo mediante curvas, llamadas isosistas, que representan los lugares donde se sintió la misma intensidad. Generalmente se observan las mayores intensidades cerca de la zona epicentral; aunque, a veces, pueden existir factores, como condiciones particulares del terreno, que ocasionan que un sismo cause mayores daños a distancias lejanas del epicentro. Pueden reportarse mayores intensidades en sitios donde, debido a la concentración de población, un terremoto causará más daños (o al menos serán reportados más daños) que en una región comparativa o totalmente deshabitada (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en

<http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

2.3.3.2 Magnitud

La intensidad, si bien es útil para describir los efectos de un terremoto, no es un parámetro apropiado para describir la cuantía o magnitud de un sismo al ocurrir un fracturamiento en el interior de la tierra. Fue hasta 1931 cuando el sismólogo japonés Wadati observó, al comparar los sismogramas de diferentes temblores, que la amplitud máxima de las ondas sísmicas registradas parecía proporcional a la dimensión del sismo. Este concepto fue posteriormente desarrollado en 1935 por Charles Richter quien, estableciendo analogías con la medida de brillantez de las estrellas en astronomía, empleó por primera vez el término magnitud para catalogar los temblores.

La escala original de Richter tomaba las amplitudes máximas de ondas superficiales de sismos ocurridos a distancia cortas para calcular lo que él denominó magnitud local o magnitud M_L (Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

Posteriormente, el uso de la escala original de magnitudes de Richter se extendió para calcular magnitudes a grandes distancias, utilizando las amplitudes máxima de ondas P (m_p) o de ondas superficiales (M_S).

La selección de la escala de magnitud más adecuada depende de la magnitud del sismo y de la distancia a la cual se encuentre las estaciones

sismológicas. Para evitar confusiones, sin embargo, la información de magnitud ofrecida al público se da generalmente sin especificar que tipo de escala se utilizó. Algunas veces se crean situaciones confusas, pues se reportan diversos valores de magnitud para un mismo sismo. Esto resulta porque muchas veces M_L , M_b y M_S no tienen valores idénticos para un mismo sismo (*Espíndola & Jiménez. Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*. Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>).

2.3.3.3 Relación entre Intensidad y Magnitud

Como las intensidades son medidas de daños, y éstos están muy relacionados con las aceleraciones máximas causadas por las ondas sísmicas (ver tabla 4), es posible relacionarlos aproximadamente. Una de tantas relaciones es la propuesta por Richter y se muestra en la siguiente ecuación (Richter, C. 1958, en *Nava*, 1998).

$$\log a \text{ (cm/s}^2\text{)} = I/3 - 1/2$$

Donde I es la intensidad y a es la aceleración del terreno. Esta relación nos dice que una intensidad de XI corresponde a aceleraciones del orden de $1468 \text{ cm/s}^2 = 1.5 \text{ g}$, donde $g = 980 \text{ cm/s}^2$ que corresponde a la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre; una intensidad de IX corresponde a 0.7 g , y una de VII a 0.07 g . Aparentemente la aceleración mínima que percibe el ser humano es del orden de 0.001 g , correspondiente a la intensidad II; las relaciones se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Relación entre Intensidad y Magnitud según Richter (1958).

RELACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y MAGNITUD SEGÚN RICHTER			
Intensidad MM	Magnitud Richter	Característica	Efectos
I	Hasta 2.5	Instrumental	No sentido excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables. Sismo registrado por instrumentos
II	de 2.5 a 3.1	Muy débil	Sentido solo por muy pocas personas en reposo, especialmente en pisos altos de edificaciones. Objetos suspendidos delicadamente pueden oscilar.
III	de 3.1 a 3.7	Ligero	Percibido en áreas densamente pobladas por una parte de la población. Sentido muy sensiblemente por personas dentro de edificaciones, especialmente las ubicadas en los pisos superiores. Muchas personas no se dan cuenta que se trata de un sismo. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como las producidas por el paso de un camión. Duración estimable.
IV	de 3.7 a 4.3	Moderado	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos se despiertan. Platos, ventanas, puertas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	de 4.3 a 4.9	Algo fuerte	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento de algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	de 4.9 a 5.5	Fuerte	Percibido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Caminar inestable, árboles y materiales se agitan por efecto del sismo. Algunos muebles pesados se mueven; algunos casos de caída de revestimientos por lo general en las construcciones de tipo D se agrietan, chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	de 5.5 a 6.1	Muy fuerte	Todo el mundo corre al exterior. Notado por personas que conducen automóviles. Dificultad para mantenerse en pie, objetos colgantes se caen, se pueden producir pequeños derrumbes y deslizamientos. Daño signficante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas edificios de tipo D ; se rompen algunas chimeneas aras del tejado, caída de cielo rasos, ladrillos, piedras, tejas, cornisas, también antepechos y ornamentos arquitectónicos no asegurados. Se presentan algunas grietas en edificios tipo C .
VIII	de 6.1 a 6.7	Destructivo	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de edificaciones tipo C , algunos daños en edificaciones tipo B , ningún daño en edificaciones tipo A , caída del repello y algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fabricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio de flujo o temperatura de posos de agua, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados, colapso parcial de estructuras, daños considerables en edificios ordinarios.
IX	de 6.7 a 7.3	Ruinoso	Pánico general. Construcciones de tipo D destruidas; daño severo en edificaciones y aún colapso de edificaciones tipo C , daño de consideración en edificaciones tipo B . Daños severos en estructuras tipo A . Daño general en cimientos. Armazones arruinadas. Daños serios en embalses. Tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. En áreas de aluvión, eyección de arena y barro; aparecen fuentes y cráteres de arena.
X	de 7.3 a 7.9	Desastroso	Destrucción de la mayoría de las edificaciones, derrumbe de puentes, daños serios en presas y embarcaderos
XI	de 7.9 a 8.4	Muy Desastroso	Pocas estructuras quedan en pie, fisuras en el terreno
XII	de 8.4 a 9	Catastrófico	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, objetos lanzados al aire

Fuente: Elaborado a partir de Bommer (1994); Nava (1998); Espíndola & Jiménez. *Terremoto y ondas sísmicas, una breve introducción*.

Tomado de la red mundial en <http://www.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Cuaderno1/ch3.html>. *Características de las Construcciones de la tabla.

***Construcciones Tipo A**

Estructuras de acero y hormigón armado, bien diseñadas, calculadas para resistir fuerzas laterales. Buena construcción, materiales de primera calidad.

Construcciones Tipo B

Estructura de hormigón armado, no diseñadas en detalle para resistir fuerzas laterales, buena construcción y materiales.

Construcciones Tipo C

Estructuras no tan débiles como para fallar la unión de las esquinas, pero no reforzadas ni diseñadas para resistir fuerzas laterales. Construcciones y materiales corrientes.

Construcciones Tipo D

Construcciones de materiales pobres, tales como adobe; baja calidad de construcción. no resistente a fuerzas horizontales.

Tabla 5. Relación intensidad – aceleración.

Intensidad MM	Magnitud Richter	Aceleración /g
1	Hasta 2,5	0,001
2	de 2,5 a 3,1	0,001
3	de 3,1 a 3,7	0,003
4	de 3,7 a 4,3	0,007
5	de 4,3 a 4,9	0,015
6	de 4,9 a 5,5	0,032
7	de 5,5 a 6,1	0,07
8	de 6,1 a 6,7	0,15
9	de 6,7 a 7,3	0,323
10	de 7,3 a 7,9	0,695
11	de 7,9 a 8,4	1,498
12	de 8,4 a 9	3,227

Fuente: elaborada a partir de Nava, 1998.

2.3.4 Determinación de los efectos locales.

Las amplitudes y formas de las ondas sísmicas generadas en un sismo dependen del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada en la zona de ruptura. El mecanismo focal controla la manera en que las ondas son irradiadas en el espacio y en el tiempo. No obstante, las ondas sísmicas una vez emitidas por la fuente sufren modificaciones en su trayecto que dependen de las propiedades mecánicas de los medios en que se propagan (estratos de suelo) y de las dimensiones de las irregularidades con que se encuentren (*Sánchez, 1989*).

Si los cambios de las propiedades en una interfase son grandes, o si el tamaño de las irregularidades es comparable o mayor que la longitud de onda predominante de las ondas incidentes, se generaran cambios significativos en el movimiento debidos a reflexión, refracción y difracción de las ondas.

Las ondas sísmicas se amplifican o se atenúan de acuerdo al medio por el cual se propagan y el tipo de irregularidades que encuentren en su trayecto desde la fuente hasta la superficie. Generalmente los estratos de suelos blandos amplifican las ondas sísmicas, a diferencian de los estratos de suelo duros o densos. Ultimamente se ha observado la influencia negativa de la topografía en el comportamiento y resistencia sísmica de las construcciones.

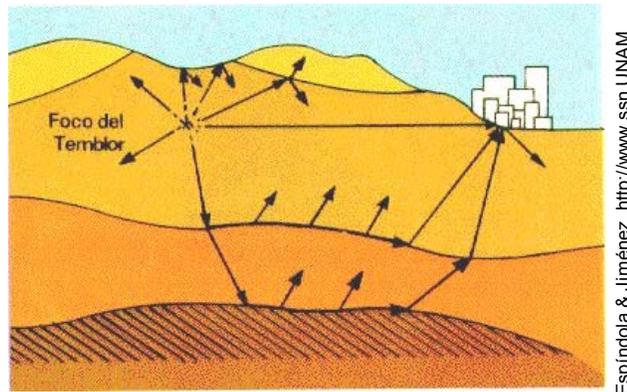


Figura 7. Propagación de las ondas sísmicas

La principal causa de daño sísmico depende de la calidad de las construcciones, pero se ha observado con frecuencia que los daños severos se relacionan con fenómenos de amplificación (Sánchez, 1989). En muchas regiones, las ciudades o poblados están asentados sobre depósitos de suelos blandos y lugares de marcada topografía, que pueden generar efectos locales, aumentando y prolongando el movimiento sísmico del terreno, e intensificando con este fenómeno los efectos sobre las construcciones.

2.3.4.1 Efecto de sitio por la geología.

La experiencia aportada por terremotos pasados, ha demostrado que las condiciones locales del sitio afectan las características del movimiento del terreno, condición que influye significativamente en el daño de las edificaciones. Los estudios sísmicos han mostrado que la intensidad de los efectos sobre las construcciones está directamente relacionada con el tipo de suelo sobre el cual se emplazan. Las edificaciones construidas sobre roca compacta y suelo firme se comportan mejor que aquellas sobre terreno

blandos (*Vidal, 2001*).

El parámetro fundamental del sitio es la geología, porque puede modificar la amplitud y la frecuencia del movimiento. La influencia de depósitos blandos sobre el movimiento fuerte ha sido reconocida durante mucho tiempo: por ejemplo en el terremoto de Calabria, Italia, de febrero de 1783, Sir William Hamilton observó que las casas del llano de aluvión sufrieron mayores daños que las casas construidas encima de roca (*Ambraseys, 1977, en Bommer 1994*).

Otro antecedente de amplificación sísmica ocurrió el 19 de septiembre de 1985, afectando a las edificaciones construidas sobre suelos blandos en Ciudad de México, donde a una distancia del epicentro de 400 km las aceleraciones fueron significativamente más altas, que en zonas cercanas al epicentro (*Bommer, 1994*).

2.3.4.2 Efecto topográfico.

Las lecciones aprendidas de los sismos recientes muestran que la topografía también puede modificar la respuesta sísmica de las construcciones en una región determinada, generando graves efectos. Las edificaciones construidas en lugares abiertos y con topografía suave son generalmente menos afectadas que las construidas sobre zonas accidentadas o colinas inclinadas, o separadas por grandes elevaciones y terreno abrupto (*Vidal, 2001*).

Existen algunos antecedentes mundiales de daños en construcciones por el efecto topográfico ocurrido como en el terremoto de San Fernando, California, de 1971 (Trifunac & Hudson, 1971;Boore, 1973 en Sánchez, 1989), sur de Italia en 1980 (Siro, 1982, en Sánchez, 1989), terremotos de Loma Prieta en 1989, Northidge 1994, Centro de Chile en 1985 (tomado de la red mundial: Análisis of topographic effects on ground motions at the pleasants valley pumping plant, California. Stewart, en <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol40/nc/goo38.htm>), y en Kobe en 1995 (Vidal, 2001).

Un caso más reciente lo constituye el terremoto de Kocaeli, Turquía del 17 de agosto de 1999, donde según Cardona (2000), *"Efectos de sitio, tales como la amplificación por suelo blando y amplificación topográfica, parecen evidentes en lugares como Avellar, cerca a Estambul y Duzce, donde las aceleraciones registradas así lo indican. Sin embargo, el desconocimiento de los tipos de suelos en la mayor parte de la zona afectada y la falta de registros acelerográficos no permiten deducir con certeza que tan generalizada pudo ser la amplificación sísmica. Queda la duda, no obstante, si muchos casos de colapso, un tanto incomprensibles, en muchos casos se pudieran explicar por condiciones de sitio desfavorables que pudieron amplificar notablemente el movimiento"*.

Según el informe de la misión de reconocimiento del terremoto de El Salvador de 2001 (INETER, 2001), en la ciudad de Comasagua el "efecto topográfico" pudo haber influenciado los daños ocurridos, debido a que la ciudad se encuentra en la cima de una colina y en los lados hay profundos

valles de erosión.

El efecto topográfico ha sido un factor reportado como causante de la amplificación de la onda sísmica, en varios eventos alrededor del mundo, pero al parecer en buen número de los casos, ésta deducción parte de las observaciones directas de los efectos de los sismos en las edificaciones. No obstante, existe un alto nivel de incertidumbre en cuanto a la a la real incidencia del efecto topográfico en casos de edificaciones afectadas por sismos, debido principalmente a que no se tienen registros acelerográficos de los lugares afectados, que permitan compararlos con los de zonas de distinta topografía.

Si bien el “*efecto topográfico*” no ha sido tan estudiado, como la amplificación de las ondas sísmicas por la presencia de capas de suelo blando, existen unos pocos trabajos que abarcan el problema de manera numérica. En uno de estos (*Suárez & Arroyo, 2001*) se encontró a raíz del estudio paramétrico de cientos de casos donde se presentaba amplificación por efecto topográfico, que los factores de amplificación fluctuaban entre 1.00 g y 2.35 g. Es decir, que de incorporarlos a los códigos sísmicos, se incrementaría la aceleración de diseño.



Figura 8. Graves daños en edificaciones construidas en pendiente.
terremoto de Iran 1968.

2.3.5 Amenazas colaterales o efectos de segundo orden

“Las amenazas colaterales incluyen fenómenos causados, como consecuencia de las vibraciones producidas por el sismo; algunas de ellas la ruptura superficial de fallas geológicas, deslizamientos y licuación de suelos, incendios, derramamiento o escape de sustancias peligrosas, e inundaciones por rupturas en tanques, represas y diques” (Campos, 1992).

Se ha observado en numerosos eventos sísmicos la ocurrencia de incendios como por ejemplo en el terremoto de Managua, del 23 de diciembre de 1972 (Bommer, 1994) que ocasionó muchos incendios en varias partes de la ciudad, el control del fuego se dificultó por el colapso de algunas estaciones de bomberos y la ruptura de la red de agua potable.

2.4 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES

2.4.1 Definición.

La vulnerabilidad sísmica se puede definir como el grado de susceptibilidad de una o un grupo de edificaciones, a sufrir daños parciales o totales, representados en bienes materiales y en vidas humanas, que pueden ocasionar la pérdida de funcionalidad, por la ocurrencia de movimientos sísmicos de una intensidad y magnitud dadas, en un periodo de tiempo y en un sitio determinado.

2.4.2 Causas de la vulnerabilidad sísmica.

Se pueden identificar dos condiciones que hacen vulnerable a un asentamiento, estas son:

2.4.2.1 Vulnerabilidad por origen.

Se define como el grado de susceptibilidad o predisposición de las estructuras físicas, socioeconómicas y medioambientales, constituidas y construidas sin ningún tipo de control ni planificación, las cuales pueden sufrir daño o pérdida a causa de un fenómeno natural.

El acelerado crecimiento de las ciudades y los procesos asociados al "desarrollo", sumado a la creciente demanda de soluciones habitacionales, ha ocasionado un incremento de la urbanización, trayendo como consecuencia la construcción de asentamientos informales localizados en zonas marginales y en terrenos poco aptos para la construcción de

edificaciones, tales como laderas y llanuras, de inundación, construidas sin ningún tipo de asistencia o normatividad técnica siendo vulnerables desde su origen, este tipo de situación se le puede denominar, **Vulnerabilidad por origen**. (Maskrey & Romero, 1986).

2.4.2.2 Vulnerabilidad progresiva.

Se define como el grado de susceptibilidad o predisposición de las estructuras físicas, socioeconómicas y medioambientales, en gran parte transformadas sin ningún tipo de control ni planificación, que pueden sufrir daño o pérdida a causa de un fenómeno natural.

Existen asentamientos que, siendo emplazados en zonas seguras desde su origen, se han vuelto vulnerables con el tiempo debido, por lo general al deterioro de viejas construcciones en áreas densamente pobladas, tales como tugurios, inquilinatos, vecindades, zonas históricas, zonas de deterioro urbanístico, etc, con deficiente calidad constructiva y deterioradas por la falta de mantenimiento; muchas transformadas mediante ampliaciones, demoliciones ó adiciones. También existen asentamientos en donde se pueden encontrar edificaciones que aunque han sido diseñadas y construidas de acuerdo con códigos sísmicos de una determinada época, pueden estar desactualizadas, a la luz de las normas sísmicas vigentes, a estas situaciones se les denomina: **Vulnerabilidad progresiva** (Maskrey & Romero, 1986).

Según *Maskrey & Romero* (1986), tanto la forma de construcción de nuevos asentamientos como el proceso de deterioro de los antiguos, son parte del proceso de transformación de la vulnerabilidad en su conjunto y por lo tanto, deben entenderse como parte integral de ésta. La vulnerabilidad progresiva en los aspectos físicos está íntimamente relacionada con la vulnerabilidad progresiva en los aspectos sociales, económicos y culturales en constante cambio.

2.4.3 Componentes de la vulnerabilidad sísmica.

La vulnerabilidad sísmica puede ser física o funcional *Cardona* (1990) (figura 9), la primera está relacionada con la capacidad que tiene la edificación para comportarse adecuadamente frente a la acción sísmica durante su vida útil y que puede afectar los elementos estructurales que componen el sistema de soporte del edificio (*vulnerabilidad estructural*), al igual que los elementos no estructurales, tales como los componentes arquitectónicos, divisiones, instalaciones, equipos, etc.

La falla de los elementos no estructurales puede causar la inhabilitación del edificio para su buen funcionamiento o para su ocupación temporal (*Vulnerabilidad no estructural*). La segunda está relacionada con la capacidad de la edificación de seguir prestando el servicio para el que fue diseñada y construida.

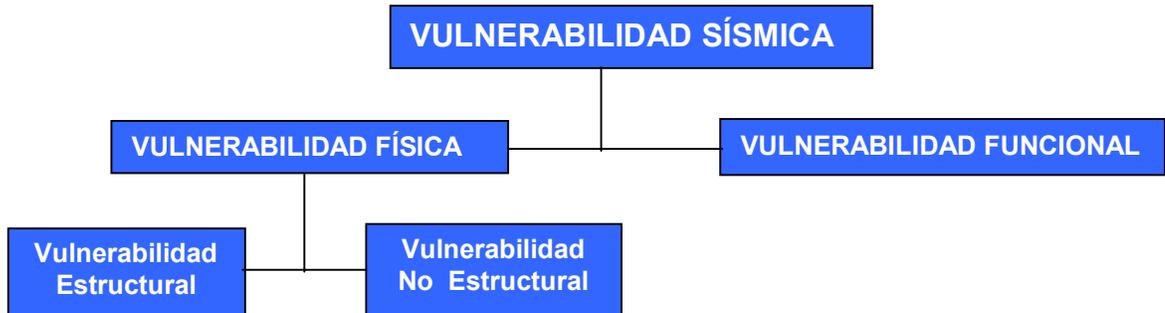


Figura 9. Componentes de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes.

2.4.3.1 Vulnerabilidad física.

La vulnerabilidad física de una edificación o un grupo de ellas, está definida como el grado de susceptibilidad o predisposición de los elementos estructurales y no estructurales a sufrir daño o pérdida, puede ser de tipo estructural o no estructural.

2.4.3.2 Vulnerabilidad estructural.

La vulnerabilidad estructural se define como el grado de susceptibilidad en que pueden afectarse los elementos que componen el sistema de soporte de la edificación (muros de carga, pórticos de concreto o acero, entre otros), los cuales son el resultado de la calidad de la construcción, su estado de conservación, la configuración y forma, así como el tipo de estructura y las características del suelo y la fundación.

- **Calidad de la construcción:** se refiere a la calidad de los materiales utilizados para la construcción, que garantizan una adecuada resistencia y capacidad de la edificación para absorber y disipar la energía sísmica. Materiales frágiles y poco resistentes, con discontinuidades, se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto. Así mismo los muros o paredes de tapia de tierra o adobe, de ladrillo o bloque sin refuerzo, sin vigas y columnas, son muy peligrosos (A/S, 2001).



Figura 10. Vivienda construida en materiales de baja calidad.

- **Estado de conservación de la construcción:** se refiere a las condiciones de deterioro representadas en lesiones físicas (humedad, erosión, etc.), mecánicas (deformaciones, grietas, fisuras, desprendimientos, etc.) y químicas (eflorescencias, oxidaciones, corrosiones y organismos como plantas e insectos) y de acuerdo con el *Colegio Oficial de Arquitectos* (1991), pueden ocasionar la pérdida de las propiedades mecánicas y ,por ende, la disminución de la resistencia de los elementos constructivos.



Figura 11. Edificación de bahareque deteriorada en el barrio San Antonio.

- **Configuración y forma de la edificación:** de acuerdo con Cardona (1989), uno de los aspectos de mayor incidencia en el comportamiento de las edificaciones frente a la amenaza sísmica, es su configuración en planta y en altura. Si una edificación posee una forma regular, simétrica y simple, horizontal y verticalmente, con plantas cuadradas o rectangulares no muy alargadas, su comportamiento será mejor que si su configuración es asimétrica, irregular y complicada, como por ejemplo, plantas en forma de L, T, H, entre otras. En general, la asimetría y la falta de regularidad de la edificación puede causar torsiones que a su vez producen concentraciones de esfuerzos en la estructura, generando fallas o rompimientos locales que pueden llegar a comprometer la estabilidad global de la construcción (Cardona, 1989).



Figura 12. Edificación con irregularidad en altura.

- **Tipo de estructura:** generalmente pueden considerarse tres tipos estructurales (*Cardona, 1989*) los conformados por entramados o pórticos de concreto reforzado, acero estructural o madera. También por muros o paredes portantes, normalmente de bloque, ladrillos o paneles y por la combinación de los anteriores, es decir, estructuras compuestas. Se puede decir que los entramados o pórticos de concreto reforzado con vigas y columnas de apreciables dimensiones, unidas monolíticamente, tienen un buen comportamiento sísmico, lo mismo que los entramados metálicos o de madera que ofrezcan buenos amarres o anclajes en las diferentes uniones de sus elementos.

Estructuras cuyos elementos portantes son muros o paredes de bloque o ladrillo confinados por cintas o vigas y columnas de pocas dimensiones que los enmarcan, pueden ofrecer un comportamiento aceptable si la edificación no supera los dos pisos. También son altamente vulnerables muros o paredes de ladrillo cocido, adobe, piedra pegada o tapias de tierra sin elementos de amarre o uniones fuertes.



Figura 13. Edificación de tipo estructural de muros de carga no confinados.

- **Características del suelo y la cimentación:** A pesar que una estructura ofrezca una apariencia de rigidez y resistencia aceptable, puede ocurrir que la misma no pueda soportar en forma adecuada un movimiento sísmico debido a la inestabilidad del suelo sobre el cual fue cimentada. Las vibraciones pueden ocasionar la pérdida de la capacidad de soporte del suelo y, por lo tanto, la estabilidad de la edificación (*Cardona, 1989*).



OSSO-UNIVALLE, 1999

Figura 14. Edificaciones sobre terrenos inestables, en el Eje Cafetero.

2.4.3.3 Vulnerabilidad no estructural

La vulnerabilidad no estructural se define como el grado de susceptibilidad de los elementos arquitectónicos, tales como cielorrasos, paneles, tabiques, ventanas, puertas cerramientos, áticos, cornisas, adornos, etc., además de equipos e instalaciones eléctricas, mecánicas, hidrosanitarias, entre otros, a sufrir daño o pérdida, ocasionando la inhabilitación temporal o permanente de una edificación para la adecuada prestación de su servicio.

Los elementos no estructurales pueden llegar a convertirse en elementos potencialmente peligrosos cuando no están ligados o amarrados adecuadamente al resto de la edificación, introduciendo cambios en la estructuración y en los mecanismos de transmisión de las cargas, que

pueden propiciar su falla.

2.4.3.4 Vulnerabilidad funcional.

La vulnerabilidad funcional se define como la susceptibilidad de la edificación para seguir prestando el servicio para el que fue construida. Este es un aspecto de máxima importancia en edificaciones cuya función es vital, como es el caso de las edificaciones indispensables (hospitales, clínicas, centros de salud, etc.). Aunque las edificaciones desarrollen un buen desempeño estructural frente a las solicitaciones sísmicas, se puede presentar un "colapso funcional" (*Cardona, 1989*), que puede ser aún más grave que una falla en los elementos de la propia estructura.

2.5 SISMO RESISTENCIA

2.5.1 Definición.

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (A/S, 2001), la sismo resistencia es la propiedad o capacidad que se le provee a una edificación con el fin de proteger la vida y los bienes de las personas que la ocupan. En este sentido, aunque se presenten daños en el caso de un sismo fuerte, una edificación no colapsará y contribuirá a que no se presenten pérdidas de vidas y pérdida total de la propiedad. Una edificación no sismo resistente es vulnerable, es decir susceptible o predispuesta a dañarse en forma grave o a colapsar fácilmente en caso de un terremoto.

2.5.2 Antecedentes históricos.

Según *Barbat* (2001), en las zonas sísmicas del mundo las técnicas de construcción han evolucionado como una respuesta a los desastres producidos de manera repetida por los terremotos. En ese sentido, en muchas de las estructuras antiguas como las construidas por los sumerios, egipcios, griegos y romanos, se reconocen una serie de características comunes que han influido en su comportamiento sísmico, lo que ha contribuido a su permanencia en el tiempo.

Algunas de estas características son su gran peso, parámetro que incrementa considerablemente las fuerzas de inercia y su gran rigidez, con

periodos fundamentales de vibración en el rango de 0,1 s a 0,4 s, lo cual significa que presentan valores similares al de los periodos dominantes de terremotos de campo cercano (*Melli*, 1998, en *Barbat*, 2001).

Según *Kirikov* (1992), en *Barbat* (2001), los principios generales y tradicionales, de diseño sísmico identificados en algunas construcciones y probablemente utilizados por los constructores de la antigüedad fueron:

- Simetría en planta.
- Distribución uniforme del peso y de la rigidez de la estructura.
- Adecuada proporción del dimensionamiento en planta y en altura de las estructuras.
- Buenas conexiones entre los elementos del sistema resistente vertical y horizontal.
- Cimientos rígidos, bien anclados en suelo firme y uniforme. Como alternativa se intentaba reducir los movimientos que se transmitían desde el terreno a la estructura, tratando de desacoplar la base del terreno, dando lugar a sistemas primitivos de aislamiento de base.

Probablemente la alta calidad de los sistemas estructurales antiguos se deba a ensayos experimentales (*Barbat*, 2001), que en la mayoría de los casos, se realizaba sobre estructuras reales, a partir de pruebas de ensayo y error. Hay que tener en cuenta que los constructores de las estructuras antiguas no aplicaban en sus diseños métodos de dimensionamiento con base en la matemática y física, simplemente desechaban las características estructurales que conseguían asociar a los daños sísmicos y aplicaban en

sus construcciones aquellas características que demostraban proporcionar un mejor comportamiento durante terremotos (*Melli*, 1998, en *Barbat*, 2001).

A pesar del actual desarrollo de nuevos materiales y de las técnicas constructivas, los principios utilizados por los antiguos constructores se constituyen en uno de los pilares fundamentales del diseño sismo resistente de nuevas estructuras, al igual que se convierten en la base fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes.

2.5.3 Principios básicos de la sismo resistencia.

Se dice que una edificación es sismo resistente si está diseñada y construida con una adecuada configuración estructural, con componentes de dimensiones apropiadas y con materiales de una proporción y resistencia suficientes para comportarse satisfactoriamente ante sollicitaciones sísmicas durante su vida útil (*A/S*, 2001).

Teniendo presente que la vulnerabilidad sísmica de una edificación depende principalmente de sus aspectos estructurales, arquitectónicos, constructivos y de su estado de conservación, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación o un grupo de ellas debe partir y fundamentarse, primero que todo, en el conocimiento y comprensión de los principios básicos que rigen su comportamiento sísmico.

Para que una edificación se comporte adecuadamente frente a la acción sísmica su estructura debe ser sólida, simétrica, uniforme, continua y bien

conectada.

Cambios bruscos en su rigidez, falta de continuidad, configuración estructural desordenada o voladizos excesivos, facilitan la concentración de esfuerzos nocivos, torsiones y deformaciones que pueden causar graves daños o el colapso de la edificación, por lo tanto los principios fundamentales que deben regir el comportamiento sísmico de las edificaciones, según la *A/S* (2001) son: la configuración geométrica y estructural, bajo peso, mayor rigidez, buena estabilidad, suelo firme y buena cimentación, estructura apropiada, materiales competentes, calidad en la construcción, capacidad de disipar energía, fijación de acabados e instalaciones, estado de conservación de la edificación.

2.5.3.1 Configuración geométrica.

La geometría de la edificación debe ser sencilla en planta y en elevación. Las formas complejas, irregulares o asimétricas causan un mal comportamiento cuando la edificación es sacudida por un sismo.

Una geometría irregular favorece que la estructura sufra torsión o que intente girar en forma desordenada (*A/S*, 2001). Un edificio con forma de caja, tal como un rectángulo en el plano y en elevación, es más fuerte que otro de forma de **L** ó de **U**, tal es el caso de un edificio con anexos o alas (*CISMID*, 1986).

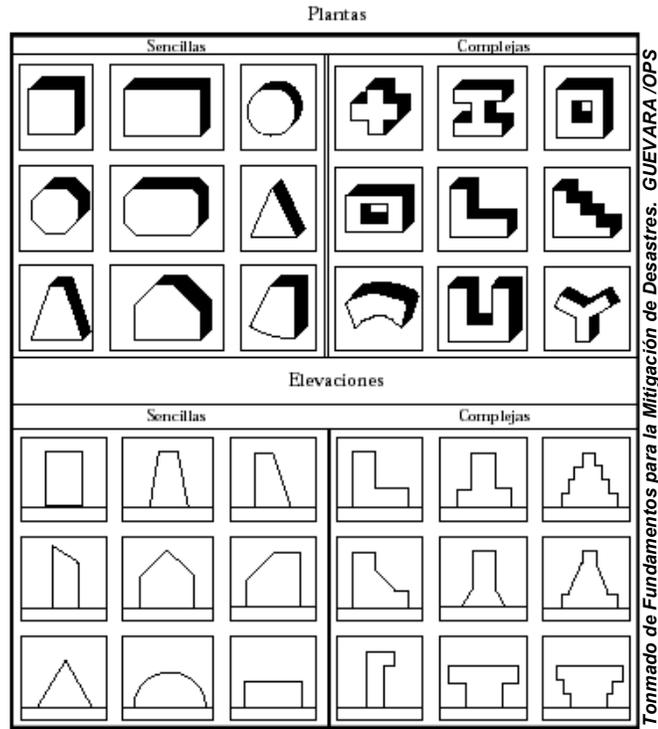


Figura 15. Formas sencillas y complejas en planta y en elevación.



Figura 16. Edificación irregular en planta y altura.

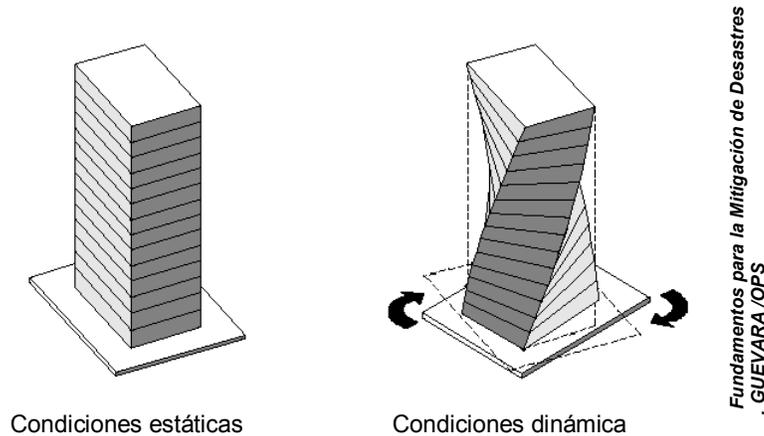


Figura 17. Comportamiento sísmico de edificaciones.

2.5.3.2 Configuración estructural.

Es recomendable que no existan cambios bruscos en las dimensiones de una edificación, ni en distribución de masas, rigideces y resistencia. El principal objetivo de una buena configuración estructural es el de evitar que se produzcan grandes concentraciones de esfuerzos en pisos que son débiles con respecto a otros. Las zonas débiles en altura, por cambio en la rigidez o en la resistencia, pueden producir un efecto de piso blando o flexible.

La capacidad de un elemento estructural vertical para transmitir fuerzas horizontales al terreno, es en gran medida mejorada si la configuración de la edificación es simétrica en planta y en elevación, y si los materiales de construcción y las técnicas de unión son consistentes en todas las partes correspondientes logrando simetría y rigidez torsional (*Hartkopf, 1985*).

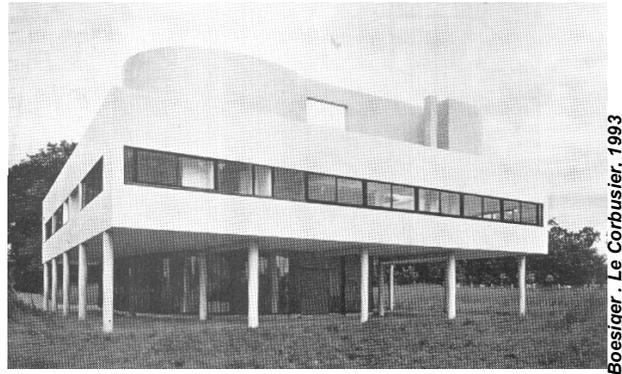


Figura 18. Edificación con piso flexible.

2.5.3.3 Bajo peso.

Entre más liviana sea la edificación menor será la fuerza que tendrá que soportar cuando ocurre un terremoto. Grandes masas o pesos se mueven con mayor severidad al ser sacudidos por un sismo y, por lo tanto, la exigencia de la fuerza actuante será mayor sobre los componentes de la edificación. Cuando la cubierta de una edificación es muy pesada, por ejemplo, ésta se moverá como un péndulo invertido causando esfuerzos y tensiones muy severas en los elementos sobre los cuales está soportada (A/S, 2001).

Reconociendo que las fuerzas de inercia son proporcionales a la masa y, en consecuencia, al peso del edificio, es conveniente que la estructura y los elementos no estructurales tengan el menor peso posible. Es importante observar que en voladizos, o en vigas que tengan luces sumamente grandes, el peso excesivo también puede producir fuerzas de inercia verticales de

magnitud apreciable, que se sumarían a las de la gravedad, las cuales conviene reducir al mínimo (*Bazán, 1985*).



Historia del Arte Colombiano, 1975



Arq. Rubiela Murillo, 2001

Figura 19. Viviendas construidas en materiales livianos.

Las fuerzas de inercia son proporcionales a la masa de la edificación, por consiguiente, cuanto más liviano es el material usado, menor será la fuerza sísmica (*CISMID, 1986*). No son recomendables altas concentraciones de masa en niveles altos de la edificación debido a elementos pesados, tales como equipos, tanques, bodegas, archivos, etc. El problema es mayor en la medida que dicho nivel pesado se ubica a mayor altura, debido a que las aceleraciones sísmicas de respuesta aumentan también hacia arriba, con lo cual se tiene una mayor fuerza sísmica de respuesta y por ende, una mayor posibilidad de volcamiento o falla.

Es necesario aclarar que mientras menor sea el peso de una estructura, menor serán las fuerzas cortantes que produzcan los sismos, además, se debe tener en cuenta que la aceleración a que se ven sujetos los edificios es mayor en los pisos superiores (*Iglesias, 1989*). De lo anterior se deduce que en zonas sísmicas sería ideal construir edificios ligeros y de poca altura.



Figura 20. Vivienda en ladrillo, con cubierta de teja de barro, edificación relativamente pesada barrio Capri en la ciudad Cali.

2.5.3.4 Mayor rigidez.

Es deseable que la estructura se deforme poco cuando se mueva ante la acción de un sismo. Una estructura flexible o poco sólida al deformarse exageradamente favorece que se presenten daños en paredes o divisiones no estructurales, acabados arquitectónicos e instalaciones que usualmente son elementos frágiles que no soportan mayores distorsiones (CISMID, 1986), por lo tanto, debe existir una simetría estructural estática.

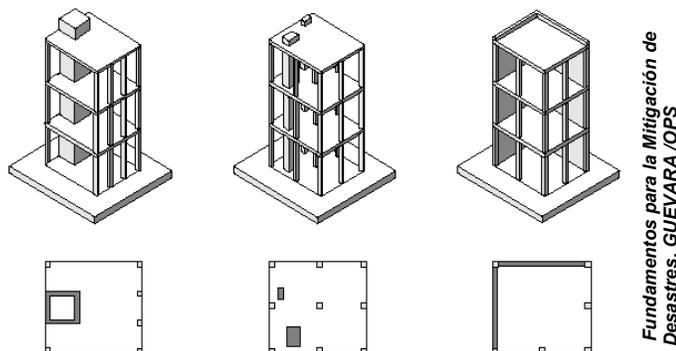
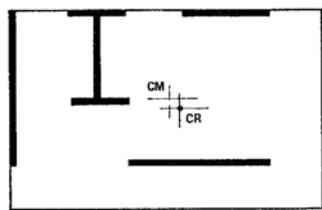


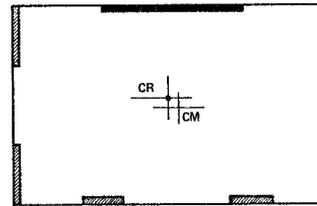
Figura 21. Asimetría estructural.

La asimetría ha sido en muchos casos la causa de fallas mayores en las edificaciones sometidas a sismos, por consiguiente, los elementos que han de soportar la sacudida horizontal no solo deben tener cierta simetría y poseer la resistencia necesaria, sino también deben estar ubicados en un perímetro apropiado y dispuestos unos con relación a otros, para lograr una mayor rigidez (*Hartkopf, 1985*).

En el caso de edificaciones de poca altura, una condición suficiente es que los centros de masa (CM) y centro de rigidez (CR) se hallen lo más cerca posible, para lograr un buen comportamiento sísmico.



Distribución aceptable no simétrica con elementos del mismo material



Distribución aceptable no simétrica con elementos construidos de materiales diferentes

Guidoni & Magni, 1977
en (*Hartkopf, 1985*).

Figura 22. Distribuciones aceptables no simétricas con elementos del mismo material.

La acción sísmica sobre una vivienda se puede presentar en cualquier dirección, por lo tanto, los ejes de los muros deben ser colineales y la mampostería con juntas y pegas continuas. Debe existir aproximadamente la misma longitud de muros en las dos direcciones perpendiculares entre sí.

Una pequeña construcción encerrada por muros apropiadamente unidos funciona como un cajón rígido, su resistencia depende de los muros en una dirección u otra.

Debe existir una continuidad vertical de los elementos de soporte del edificio que cargan todos los pisos que lo componen, desde los cimientos hasta la cubierta. En el caso de las viviendas de dos pisos, es necesario que los muros que cargan la cubierta sean una continuación de los muros del primer piso, de lo contrario se aumentarán las cargas o el peso sobre el primer piso sin contribuir a la resistencia global de la edificación.

Las aberturas que componen los vanos de las viviendas deben estar distribuidas de una forma equilibrada, para evitar concentraciones de esfuerzos indeseables que puedan ocasionar la falla y el daño posterior de la vivienda. En general, las aberturas en muros de una construcción tienden a debilitarlos, y cuantas menos sean, menor será el daño que sufrirá durante un terremoto. (CISMID,1986).

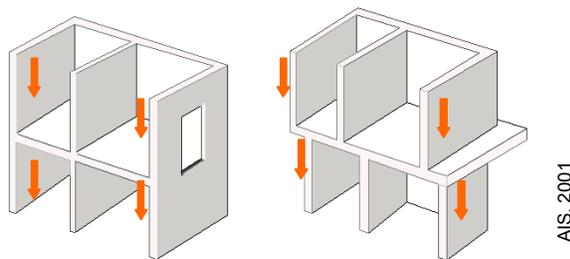


Figura 23. Continuidad y discontinuidad vertical de muros en una edificación.

2.5.3.5 Buena estabilidad.

Las edificaciones deben ser firmes y conservar el equilibrio cuando son sometidas a las vibraciones de un terremoto. Estructuras poco sólidas e inestables se pueden volcar o deslizar en caso de una cimentación deficiente. La falta de estabilidad y rigidez favorece que las edificaciones vecinas se golpeen en forma perjudicial, si no existe una suficiente separación entre ellas.



OSSO-UNIVALLE, 1999

Figura 24. Colapso de una edificación de bahareque por falta de estabilidad.

2.5.3.6 Suelo firme y buena cimentación.

El objetivo esencial de una cimentación durante un terremoto, es el de transmitir al suelo las acciones resultantes de las fuerzas generadas por un sismo en la superestructura y soportar adecuadamente los esfuerzos provenientes del suelo circundante (*Bazán, 1985*).

Es deseable que el material del suelo sea duro y resistente, debido a que los suelos blandos amplifican las ondas sísmicas y facilitan asentamientos

nocivos en la cimentación que pueden afectar a la estructura y facilitar el daño. Las construcciones que son estructuralmente fuertes para soportar los sismos algunas veces fallan debido a un diseño inadecuado de la cimentación. El volteo, fisuramiento y falla de la superestructura puede ser el resultado de la licuefacción de los suelos y el asentamiento diferencial de los cimientos (*CISMID*, 1986).

Cierto tipo de cimientos son más susceptibles al daño que otros, por ejemplo, columnas con zapatas aisladas son más susceptibles de ser sujetas a asentamientos diferenciales, particularmente cuando se trata de suelos blandos o heterogéneos vertical y lateralmente. Tipos mixtos de cimentación dentro de una misma edificación también pueden causar daño debido al asentamiento diferencial (*CISMID*, 1986).



Figura 25. Pérdida de la capacidad portante del suelo por licuación, Nigata (Japón) 1964.

2.5.3.7 Estructura apropiada.

Para que una edificación soporte un terremoto, su estructura debe ser sólida, simétrica, uniforme, continua o bien conectada. Cambios bruscos de dimensiones, de rigidez, falta de continuidad, configuración estructural desordenada o voladizos excesivos, facilitan la concentración de fuerzas nocivas, torsiones y deformaciones que pueden causar graves daños o el colapso de la edificación (A/S, 2001).



Figura 26. Colapso de una edificación por deficiencias en su estructuración

2.5.3.7 Materiales competentes.

Los materiales deben ser de buena calidad para garantizar una adecuada resistencia y capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía que el sismo otorga a la edificación cuando se sacude. Materiales frágiles, poco resistentes o con discontinuidades se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto. Muros o paredes de tapia de tierra o adobe, de ladrillo o bloque sin refuerzo, sin vigas y columnas, son muy peligrosas (A/S, 2001).



Figura 27. Colapso de una edificación por falta de confinamiento en el terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.

2.5.3.8 Calidad en la construcción.

Se deben cumplir requisitos de calidad y resistencia de los materiales y acatar las especificaciones de diseño y construcción. La falta de control de calidad en la construcción y la ausencia de supervisión técnica ha sido la causa de daños y colapsos de edificaciones que aparentemente cumplen con otras características o principios de la sismo resistencia (AIS, 2001).

Los sismos descubren los descuidos y errores que se hayan cometido al construir. En muchos lugares las fallas de las construcciones por un terremoto han sido atribuidas a la pobre calidad de la construcción, a materiales de bajo estándar y a mano de obra deficiente (CISMID, 1986).



Ing. Harold Trujillo, 1999

Figura 28. Colapso del hospital del Municipio de Córdoba Quindío, por deficiencias constructivas, terremoto del 25 enero de 1999 en el Eje Cafetero.

2.5.3.9 Capacidad de disipar energía.

La capacidad de disipación de energía de una estructura depende de la estructuración del edificio y del comportamiento de los materiales, elementos y conexiones estructurales (*Bazán*, 1985). Por lo tanto, una estructura debe ser capaz de soportar deformaciones en sus componentes sin que se dañen gravemente o se degrade su resistencia, es decir, que la estructura debe ser dúctil.

La condición opuesta a la ductilidad es la fragilidad, la cual proviene de la utilización de materiales que son inherentemente frágiles ó por el diseño equivocado de las estructuras, donde se usan inadecuadamente materiales dúctiles. Los materiales dúctiles se fisuran debido a las cargas, entre estos se encuentran el adobe, el ladrillo, y el bloque de concreto. Cuando una

estructura no es dúctil, ésta se rompe fácilmente al iniciarse su deformación por la acción sísmica (*CISMID*, 1986).

La mayoría del daño durante los terremotos pasados estuvo en las estructuras de mampostería no reforzada construida de materiales frágiles, pobremente unida, que al degradarse su rigidez y resistencia, pierde su estabilidad y puede colapsar súbitamente (*CISMID*, 1986). La adición de refuerzos de acero puede dar ductilidad a los materiales frágiles.



Figura 29. Edificio moderno de estructura aporticada.

2.5.3.10 Fijación de acabados e instalaciones.

Los componentes no estructurales como tabiques divisorios, acabados arquitectónicos, fachadas, ventanas, e instalaciones deben estar bien adheridos o conectados, no deben interactuar con la estructura. Si no están bien conectados se desprenderán fácilmente en caso de un sismo. También pueden sufrir daños si no están suficientemente separados, es decir, si interactúan con la estructura que se deforma lateralmente ante la acción de un sismo (*A/S*, 1998).



Figura 30. Falla en elementos estructurales mal conectados o diseñados.

2.5.3.11 Estado de conservación de la edificación.

El estado de conservación de una estructura puede comprometer su integridad y estabilidad frente al fenómeno sísmico, si no ha sido objeto de acciones de mantenimiento durante su vida útil. El grado de deterioro de una edificación no solamente depende de las medidas de mantenimiento que se tomen a lo largo del tiempo; también puede tener sus orígenes desde la concepción misma del proyecto constructivo de la edificación

"Las estructuras se comportan tal como se construyen más no como se diseñan...", (Muñoz et, al, 2000). De acuerdo con lo anterior, si desde el inicio de la construcción no se toman las medidas pertinentes para garantizar la "durabilidad" de la estructura en el tiempo, ésta se verá sujeta a deterioro. Tan importante como la capacidad resistente, es que la estructura tenga buen desempeño a lo largo de su vida útil, es decir, que sea durable (CISMID, 1986).



Escuela de Arquitectura-UNIVALLE, 2000

Figura 31. Vivienda en mal estado de conservación en el barrio San Antonio.

2.5.4 Ductilidad, deformabilidad y capacidad de absorber daño.

Las propiedades deseables de una construcción sismo resistente, incluyen la ductilidad, la deformabilidad y la capacidad de absorber daño. La ductilidad y la deformabilidad son conceptos interrelacionados, que significan la capacidad de una estructura para desarrollar grandes deformaciones sin colapsar.

La capacidad de absorber daño de una estructura es aquella que le permite soportar daño sustantivo sin colapsar parcial o totalmente. Esto es deseable ya que significa que las estructuras puedan absorber mas daño, y permiten observar las deformaciones y repararlas, o proceder a la evacuación, antes del colapso. (CISMID, 1986).

2.5.4.1 Ductilidad.

De acuerdo con *Bazan & Meli*, (1985), la ductilidad se define como la relación del desplazamiento último o del colapso sobre el desplazamiento del primer daño o de fluencia. Algunos materiales como el acero, hierro forjado y la madera son intrínsecamente dúctiles. Otros materiales como el hierro fundido, la mampostería simple, el adobe o concreto simple no son dúctiles (frágiles), con frecuencia se rompen repentinamente.

Los materiales frágiles pueden hacerse dúctiles, usualmente mediante la adición de pequeñas cantidades de materiales dúctiles. Tal es el caso de elementos de madera adicionados a construcciones de adobe o refuerzos de acero en construcciones de mampostería y concreto (*Bazan & Meli*, 1985).

2.5.4.2 Deformabilidad

Se define como la capacidad de una estructura para desplazarse o deformarse considerablemente sin colapsar. Además, inherentemente confiando en la ductilidad de los materiales y los componentes, la deformabilidad requiere que las estructuras sean bien proporcionadas, uniformes y bien amarradas, para que las concentraciones de esfuerzos excesivos sean evitadas y las fuerzas sean capaces de ser transmitidas de un componente otro, aún, a través de grandes deformaciones (*Bazan & Meli*, 1985).

Aún cuando los materiales dúctiles estén presentes en suficiente cantidad en los componentes estructurales como las vigas o muros, la deformabilidad

estructural total requiere que la irregularidad geométrica y material sea evitada. Es decir, que estos componentes deben tener apropiadas relaciones en su aspecto y forma, por ejemplo, no ser demasiado altos, y estar adecuadamente conectados. Un muro en mampostería, debe tener suficientes muros de amarre y debe estar amarrado a los pisos, al techo y a los muros de corte. Los apoyos de las vigas deben ser adecuados y firmes, para que pequeñas deformaciones no hagan que se caiga o se salga de su apoyo, de manera que resista grandes deformaciones y movimientos dinámicos sin colapsar (*Bazan & Meli, 1985*).

2.5.4.3 Capacidad de absorber daño.

La capacidad para soportar daño es también una cualidad deseable en una construcción y se refiere a la capacidad de una estructura a sufrir daño importante sin tener colapso parcial o total. La clave para lograr esa cualidad es la redundancia estructural, es decir, la provisión de varios apoyos de los miembros estructurales clave, tales como las vigas, y la supresión de columnas centrales por muros portantes en proporciones excesivamente grandes en una edificación (*Bazan & Meli, 1985*).

2.6 CAUSAS DE DAÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA

Las cargas de diseño sísmico son extremadamente difíciles de determinar, debido a la naturaleza aleatoria de los movimientos sísmicos. Sin embargo, las experiencias de los terremotos fuertes del pasado han demostrado que las prácticas de diseño razonables y prudentes pueden mantener un edificio seguro durante un terremoto.

Elementos estructurales tales como muros, vigas y columnas que soportan cargas verticales, al ser sometidos a la acción de cargas sísmicas deben ser capaces de resistir los esfuerzos de flexión y cortante que se generan. Es aquí donde las propiedades y calidad de los materiales de construcción desempeñan un papel importante dentro de la resistencia sísmica de la edificación, en la medida de que estos sean capaces de disipar energía (*CISMID, 1980*)

2.6.1 Clasificación de las construcciones de mampostería.

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (2001), las viviendas pueden clasificarse en tres tipos dependiendo del sistema constructivo de los muros de soporte principales, del cual dependerá el adecuado comportamiento de las edificaciones de mampostería frente a las sollicitaciones sísmicas y el tipo de daño. Esta clasificación se muestra a continuación.

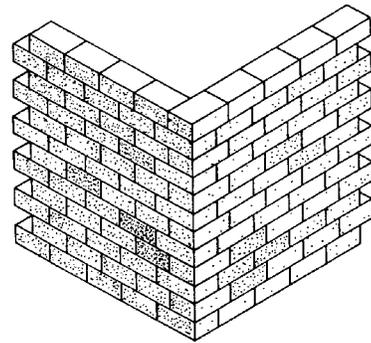
2.6.1.1 Mampostería no reforzada.

Son las construcciones que utilizan unidades de mampostería en la cual no se considera ningún tipo de refuerzo interno o externo de confinamiento.



Sociedad de Mejoras Públicas, 1998

Vivienda de muros sin confinar en del barrio San Antonio



Detalle de un muro de adobe sin confinar

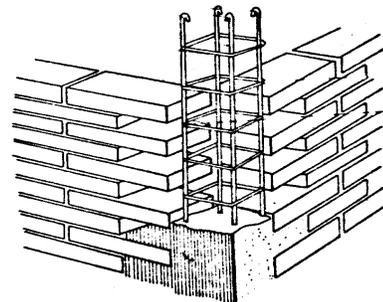
Figura 32. Vivienda en mampostería no confinada.

2.6.1.2 Mampostería confinada.

El método de construcción de mampostería de muros confinados se basa en la colocación de unidades de mampostería conformando un muro que luego se confina con vigas y columnas de concreto reforzado vaciadas en el sitio.



Sociedad de Mejoras Públicas, 1998



Detalle de muro confinado

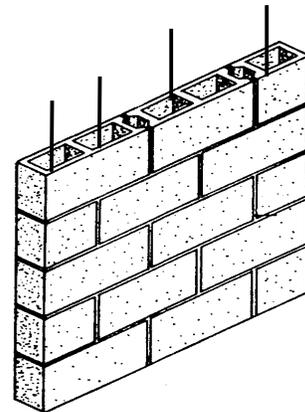
Figura 33. Edificación de mampostería Confinada.

2.6.1.3 Mampostería reforzada.

El sistema de mampostería reforzada se fundamenta en la construcción de muros con piezas de mampostería de perforación vertical (de arcilla o de concreto) unidas por medio de mortero, reforzadas internamente con barras y/o alambres de acero. Este sistema permite la inyección de todas sus celdas con mortero de relleno, o de solo las celdas verticales que llevan refuerzo. El refuerzo se distribuye dependiendo la demanda impuesta al muro en cuanto a cargas externas.



Sociedad de Mejoras Públicas, 1998



Detalle de muro en mampostería reforzada

Figura 34. Vivienda en mampostería reforzada.

2.6.2 Fallas y daños típicos de construcciones de mampostería.

El daño sísmico de una vivienda en mampostería depende de parámetros como la intensidad, la duración, el contenido de frecuencia del movimiento sísmico, la condición geológica y del suelo, la calidad de la construcción, y el estado de conservación, entre las más importantes (CISMID, 1986).

Los elementos constructivos más susceptibles a sufrir daño en viviendas de mampostería son las cubiertas, las losas de entrepiso, los muros portantes y divisorios y los elementos no estructurales tales como áticos, cornisas, antepechos y adornos.

2.6.2.1 Causas de falla sísmica en viviendas de mampostería

Las causas de falla que pueden ocasionar daños sísmicos en este tipo de estructuras son:

1. **Anclaje insuficiente.** Debido a la falta de anclajes efectivos, las paredes, antepechos, áticos y cornisas pueden caerse fácilmente (ATC-21,1988), en *Campos*,1992).
2. **Deflexión excesiva de los diafragmas.** Los diafragmas de madera o de materiales muy livianos y por lo tanto muy flexibles, permiten deflexiones no uniformes en su propio plano y significativas para las paredes perpendiculares a la dirección del sismo. La gran deflexión (deriva) producida al nivel de cubierta, puede causar el colapso del muro de mampostería debido a su propio peso (ATC-21 ,1988, en *Campos* ,1992).
3. **Baja resistencia a cortante.** Con frecuencia el mortero empleado tiene muy poco cemento y por lo tanto baja resistencia a cortante. Los muros portantes construidos con este tipo de mortero, sufren grandes daños y colapsan bajo cargas altas, al igual los muros constituidos por unidades de adobe de baja calidad (ATC-21,1988, en Campos 1992).

4. **Esbeltez de los muros.** Cuando las edificaciones tienen muros altos y delgados, especialmente en paredes no portantes, puede ocurrir pandeo fuera de su plano bajo cargas laterales altas. La caída de un muro no portante, en todos los casos, representa una amenaza para la vida. En el caso de que sea portante, su falla puede comprometer parcial o totalmente la estabilidad de la estructura (ATC-21, 1988, en *Campos*, 1992).
5. **Falta de conexiones.** Los muros que se cruzan ortogonalmente no tienen conexiones o son inadecuadas, lo que impide un buen comportamiento estructural (ATC-21, 1988, en *Campos*, 1992).
6. **Peso de la edificación.** Edificaciones pesadas y muy rígidas generan grandes fuerzas sísmicas de inercia (*CISMID*, 1986).
7. **Concentración de esfuerzos.** Principalmente en las esquinas de ventanas y puertas (*CISMID*, 1986).
8. **Rigidez deficiente.** La edificación no cumple con la cantidad de muros portantes en cada una de sus direcciones.
9. **Configuración geométrica en planta.** Edificaciones muy alargadas, o con formas irregulares como U, L, T, ó H.
10. **Configuración geométrica en altura.** Edificaciones con notables irregularidades en altura que pueden generar torsión (concentración de

masas).

11. **Configuración estructural.** Ésta se presenta por la falta de continuidad vertical de los muros portantes desde la cimentación hasta la cubierta (A/S, 2001).
12. **Calidad de la construcción.** Baja calidad de los materiales, juntas deficientes en la mampostería, muros sin plomar (CISMID, 1986).
13. **Estado de conservación.** Principalmente por el deterioro de cubiertas, grietas en muros portantes debido a la existencia de daños acumulados por sismos anteriores, o a problemas de asentamientos del terreno.
14. **Suelo y cimentación.** La edificación está asentada sobre suelos blandos, o sobre pendientes inclinadas.
15. **Falta de confinamiento.** La edificación no cuenta con elementos de amarre como vigas y columnas, que le garanticen un adecuado comportamiento sísmico.
16. **Adiciones.** La edificación presenta muros en otros materiales que comprometen la estabilidad del conjunto, o que se convierten en un peligro para las personas cuando estos no están debidamente amarrados.

De acuerdo con *Campos* (1992), la falla de un muro portante en una construcción de mampostería de uno o dos pisos, constituye un serio riesgo de colapso total, debido a que el muro averiado es fundamental en el sistema portante; comparativamente, en un edificio de concreto reforzado, la avería o destrucción de un muro, difícilmente llega a comprometer la estabilidad global de la construcción.

2.6.3 Daños típicos de construcciones de mampostería.

La generación de esfuerzos de tracción y corte en muros de edificaciones de mampostería es la causa principal de diferentes tipos de daño que sufren dichas edificaciones (*CISMID*, 1986).

2.6.3.1 Daños en elementos no estructurales.

1. Rotura y volcamiento de parapetos, antepechos de mampostería, voladizos, cornisas, balcones y adornos.
2. Caída del enlucido de las paredes, enchapes y cielos falsos.
3. Rotura y volcamiento de muros de división, de rellenos.
4. Rotura de ventanales de vidrio.
5. Desprendimiento de aleros y caída de tejas.

2.6.3.2 Daños en elementos estructurales (muros portantes).

Este tipo de daño se caracteriza por la generación de fisuras diagonales, debido a esfuerzos de compresión o tracción diagonal, que pueden ocurrir siguiendo la unión de bloques o en diagonal, a través de las unidades de

mampostería. Estas fisuras generalmente se inician en las esquinas de las aberturas y algunas veces al centro de segmentos del muro. Esta clase de daño puede ocasionar el colapso parcial o completo de la edificación.

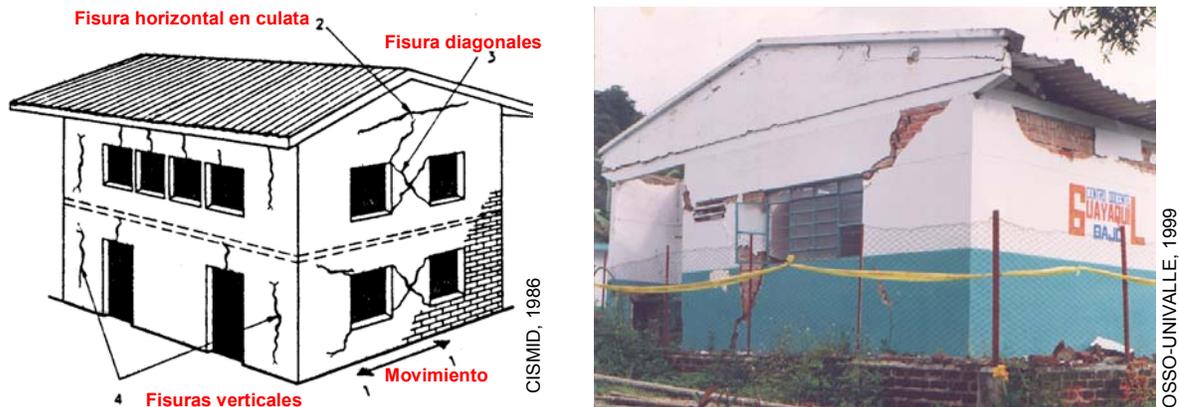


Figura 35. Fisuramiento de muros portantes.

2.6.4 Comportamiento típico de las edificaciones en adobe frente a los sismos

De acuerdo con *CERESIS* (2001), en los terremotos ocurridos en el Perú, las viviendas de adobe han demostrado un comportamiento deficiente, incluso en sismos moderados han colapsado muy rápido. El comportamiento frágil de estas viviendas, se debe a que no tienen un refuerzo que controle el tamaño de las grietas, lo cual produce una súbita pérdida de la rigidez lateral, convirtiéndose la vivienda en un sistema muy flexible y con gran masa, lo cual genera el colapso, ya que las fuerzas sísmicas se incrementan notablemente.

Antes del efecto del sismo en las viviendas de adobe, estas son muy rígidas, pero al agrietarse, se incrementa el periodo natural de vibración, sin llegar a sobrepasar al periodo predominante del sismo, por lo que la respuesta estructural también aumenta (CERESIS, 2001).



Obtenido en la Red Mundial <http://www.costos.peru.com>

Figura 36. Vivienda de adobe destruida por el terremoto de Arequipa de 2001.

2.6.4.1 Tipos de fallas de estructuras en tierra.

Las principales causas de daño en edificaciones construidas en tierra (adobe ó tapia), son debidas a los efectos de configuración estructural, debilidad del terreno de cimentación, debilidad en muros y marcos, carencia de interconexiones adecuadas entre elementos y la calidad de la construcción, entre otras. Algunas causas que propician estas fallas son:

- **Cimientos insuficientes:** la interacción suelo-estructura apenas ha sido comprendida en este siglo. Las construcciones anteriores tienen cimientos dictados por la tradición y el precedente, pero atendiendo más al tamaño de la estructura que a la calidad del suelo. Por otra parte, se sabe de la amplificación que depósitos aluviales blandos producen en las

ondas sísmicas con efectos desastrosos en las edificaciones (*Espinoza, 1985*).

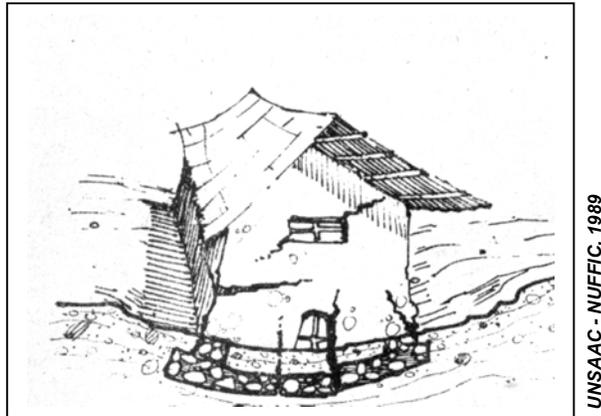


Figura 37. Vivienda en adobe con cimientos insuficientes.

- **Humedad en los muros:** Por efecto de la succión capilar los muros en tierra tienden a absorber humedad del suelo subyacente. En condiciones de humedad la tierra puede regresar a su estado plástico y ocasionar la falla del muro en la misma forma de un talud de suelo (*Espinoza, 1985*).

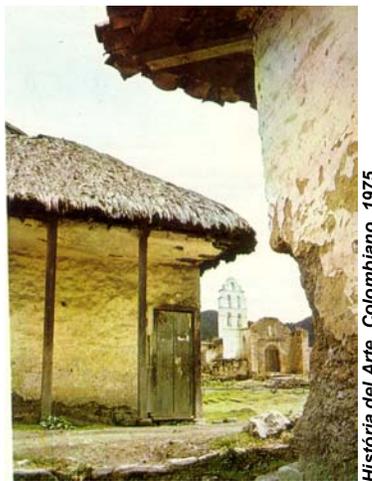


Figura 38. Deterioro de muros de adobe por humedad.

- **Falta de continuidad.** La falta de continuidad en la estructura y, más aún, los cambios de rigidez, producen efectos nocivos porque las masas de diferentes características reaccionan de manera diferente ante el temblor. En Popayán, por ejemplo, se vieron estos resultados en la caída de las torres de San Francisco, Santo Domingo y la avería de la Torre del Reloj (*Espinoza, 1985*).

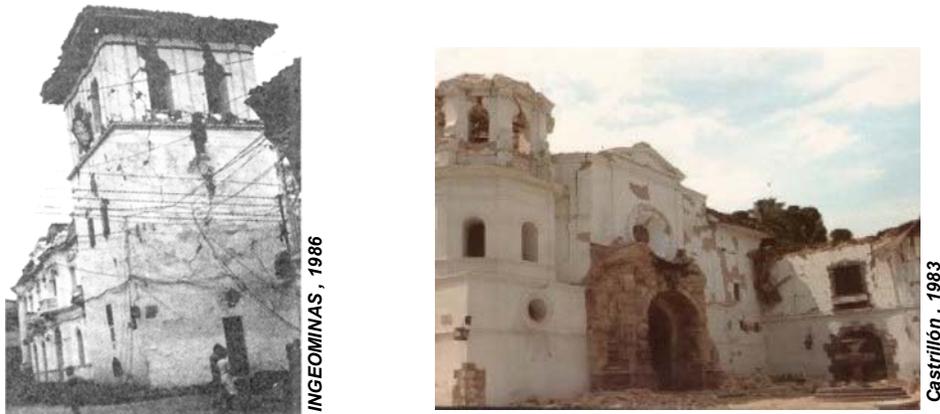


Figura 39. Avería en templos religiosos en Popayán debido al sismo del 31 de marzo de 1983.

- **Aberturas.** Las aberturas de las puertas y ventanas originan el debilitamiento de los muros. Ante la sollicitación de cargas sísmicas en estos puntos se producen concentraciones de cargas superiores a la resistencia del adobe o la tapia pisada. En las casonas de Popayán las aberturas para las puertas o grandes ventanas e, inclusive, para incrustar armarios en las paredes, efectuadas en remodelaciones sucesivas a lo largo de los años, condujeron al agrietamiento severo o a la falla de alguna de ellas (*Espinoza, 1985*).



Figura 40. Edificación con gran cantidad de vanos, afectada por el terremoto de Popayán el 31 de marzo de 1983

- **Juntas de construcción.** En adobe y tapia pisada las juntas de construcción dejadas en las esquinas, o entre jornadas de trabajo, o entre pega y pega, se marcan cuando se contrae el material. Como consecuencia, el muro de cierta antigüedad está conformado por un conjunto de bloque sueltos entre sí y mantenidos en su posición por el peso y el efecto confinante de la estructura de madera de la cubierta. Una estructura conformada de tal manera resiste, más o menos adecuadamente, fuerzas verticales estáticas pero no puede resistir fuerzas horizontales cíclicas como las de un sismo (*Espinoza, 1985*).



Figura 41. Vivienda de adobe, en el Perú, con deficiencias constructivas.

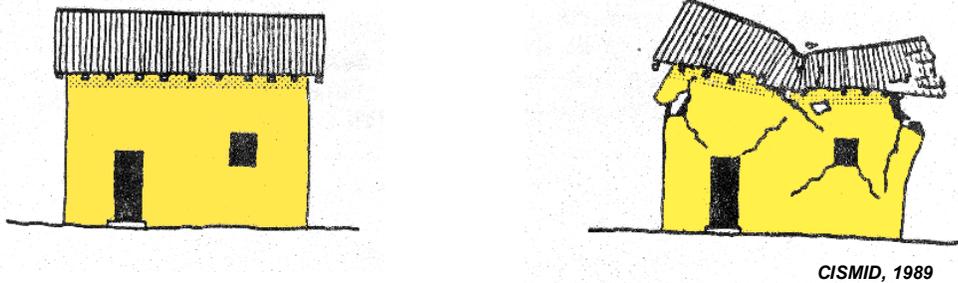


Figura 42. Falla típica de una construcción en adobe.

- **Inserción de entrepisos.** Otra fuente considerable de debilidad resulta de la inserción de entrepisos en los muros. El estrechamiento efectivo del muro producido por los maderos en él embebidos equivale a una rótula preformada (Espinoza, 1985).

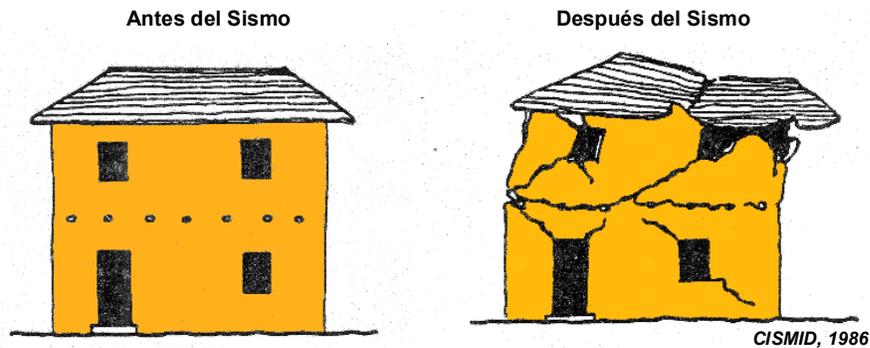


Figura 43. Daño típico de una edificación de adobe dos pisos no reforzada.

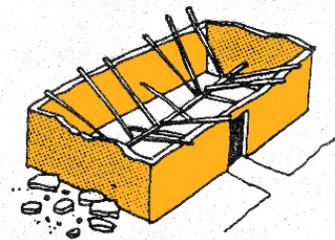
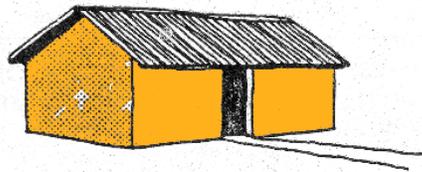
- **Cubiertas deterioradas.** Con base en las experiencias de Popayán y El Eje Cafetero se observó que muchos de los muros de las casas se cayeron hacia fuera, sobre la calle, empujados por la estructura de cubierta. Se comprende que si las cabezas de los tirantes están podridas, como es habitual que ocurra, por las particulares condiciones de

humedad y de la falta de aireación en esta zona de cubierta, un sobreesfuerzo causado por el sismo las rompe, y la estructura se abre y ocasiona la falla de los muros previamente debilitados.



Castrillón, 1983

Figura 44. Colapso de cubiertas pesadas en construcciones de adobe, debido al terremoto de Popayán del 31 de marzo de 1983.



CISMID, 1986

Figura 45. Falla típica de colapso de cubierta en edificaciones de adobe.

- **Modificaciones y mutilaciones.** Las remodelaciones que frecuentemente se hacen en las edificaciones antiguas, sin consultar la configuración estructural ni el balance de la solución, terminan siendo mutilaciones. El mismo valor artístico, arquitectónico y monumental queda comprometido.



Figura 46. Viviendas destruidas por el terremoto de San Juan, Argentina, en 15 de enero de 1944.

En el grafico siguiente, se muestra un resumen de las principales fallas que pueden ocasionar daño sísmico en edificaciones de mampostería de adobe.

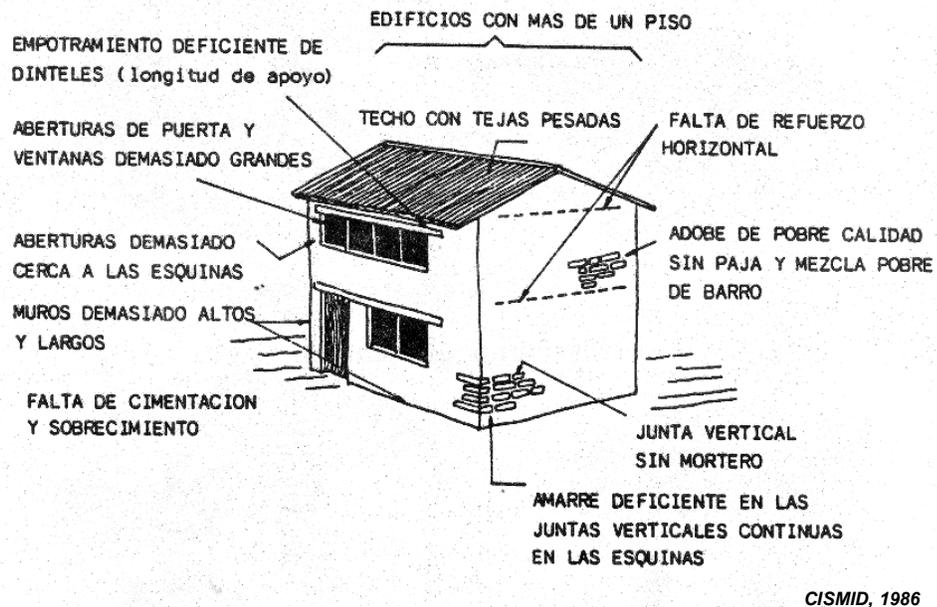


Figura 47. Causas de falla típicas en edificaciones construidas en tierra.

2.7 EFECTOS DE SISMOS EN EDIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL

Los efectos ocasionados por sismos en edificaciones de construcción tradicional en Latinoamérica, han dejado a lo largo de los siglos innumerables perdidas económicas y de vidas materiales, convirtiendo a muchas regiones “en grandes laboratorios de destrucción, a escala real”, reincidiendo en muchas ocasiones, como si no se hubiese aprendido bien la lección.

Las edificaciones que por lo general han salido mal libradas, están conformadas por aquellas cuyas prácticas constructivas responden a técnicas tradicionales, muchas de ellas introducidas a América por los conquistadores.

En la costa Perú por ejemplo, según *Maskrey & Romero* (1986), existían centros urbanos antes de la conquista española, como Pachacamac y Huaycán en la zona de Lima, que fueron construidos en materiales de tierra. A pesar de la vulnerabilidad sísmica intrínseca que tiene este material de construcción, hay estudios que han señalado que tanto la forma de utilizar la tierra como la forma de construir, daban un cierto nivel de seguridad a las construcciones pre-colombinas.

En Colombia, por ejemplo, las técnicas constructivas precolombinas con base a materiales livianos (madera, paja) en general garantizaban una mejor seguridad frente al fenómeno sísmico, pero eran susceptibles a otro tipo de amenazas como los incendios.

Lamentablemente, no se conocen estudios realizados sobre desastres sísmicos en ciudades precolombinas. Sin embargo, de acuerdo con *Maskrey & Romero* (1986), la forma de la construcción española que se introdujo a partir de la conquista del territorio americano, incorporo nuevas técnicas y formas de construir desarrolladas en regiones donde los fenómenos sísmicos no ocurrían con frecuencia o con gran intensidad (España, por ejemplo). Tanto la forma de los adobes como el modelo de construcción, con techos pesados de tejas, otorgaba una vulnerabilidad sísmica muy alta a las nuevas edificaciones.

En los últimos años en Latinoamérica las construcciones tradicionales siguen siendo las mas afectadas debido al fenómeno sísmico, porque generalmente están asentadas sobre suelos susceptibles a fallas, además la construcción se desarrolla sin ningún tipo de diseño, planificación y control y se localiza en sectores históricos, zonas de deterioro urbanístico, zonas de desarrollo progresivo, de consolidación, o invasiones.

Según *CERESIS* (2001) en Sur América cerca de 40 a 50 millones de personas viven en construcciones de adobe en regiones sísmicamente activas y por lo tanto expuestas a terremotos destructivos. En ese sentido, al observar los efectos de los sismos se encuentra que con frecuencia la gran mayoría de muertes se deben al colapso de las edificaciones construidas con materiales y técnicas tradicionales, como el adobe, ladrillo cocido, bahareque y tapia pisada. Situación que se ratifica con la ocurrencia de cada evento sísmico.

La época de construcción, el estado de deterioro, la carencia de mínimas normas constructivas, y terrenos inestables, son algunos de los factores que inciden en la alta vulnerabilidad que han demostrado este tipo de edificaciones. De otro lado, muchas ciudades han visto como lo mejor de su patrimonio arquitectónico ha quedado destruido debido al efecto de los sismos, de manera que se pierden dos valores irrecuperables como son: la vida humana y el patrimonio de un pueblo, es decir los vestigios de su historia.

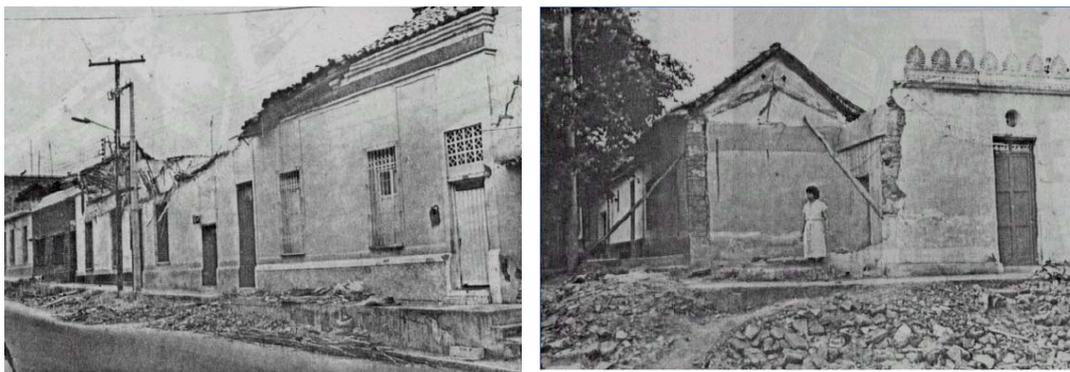
De manera muy sintética se muestran a continuación, algunos de efectos generados por los terremotos de Cúcuta en 1981, Popayán en 1983 y el del Eje Cafetero en 1999, en edificaciones de construcción tradicional en Colombia.

2.7.1 Sismo de Cúcuta 17 de octubre de 1981

Afectó principalmente los barrios ubicados en la zona céntrica de la ciudad ó casco antiguo. La mayoría a edificaciones afectadas obedecían a construcciones en materiales y técnicas provenientes de la tradición colonial, edificadas en de adobe, además de viviendas en bahareque, así como las de ladrillo pegado con mortero de calicanto.

De acuerdo con *Sarria* (1981), los daños presentados en las viviendas de Cúcuta fueron:

- Desplomes totales o parciales de cubiertas debido al mal estado de la madera por la acción de insectos y por el gran peso de las mismas.
- Agrietamientos severos hasta destrucción de muros.
- Caída de áticos ó parapetos y adornos en fachada.
- Caída de fachadas falsas, construidas sobre muros de adobe y daños en la carpintería. *Sarria* (1981) denomina fachadas falsas, a las fachadas, que han sido adicionadas con posterioridad a la edificación original, como producto de la influencia estilística del Republicano. Esta intervención en la mayoría de los casos se realiza sin amarrar adecuadamente la nueva fachada a los muros existentes y eliminando el alero. Es decir, que la nueva fachada, generalmente en otro material, queda suelta y supremamente vulnerable ante movimientos sísmicos.



Tomado de *Sarria*, 1981.

Figura 48. Efectos del terremoto de Cúcuta en edificaciones populares

2.7.2 Sismo de Popayán del 31 de marzo de 1983.

Este terremoto reiteró lo susceptible que pueden ser las edificaciones de construcción tradicional, de tapia, adobe y techo de barro, además de las construcciones modernas (edificaciones de mampostería no reforzada o no confinada, por lo general construidas antes de la vigencia del primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes de 1984). La zona mas afectada en Popayán fue el sector histórico o centro de la ciudad donde se encontraba buena parte su patrimonio arquitectónico, religioso y cultural, constituido por edificaciones construidas en tapia y adobe con teja de barro.

De 1.727 viviendas localizadas en el centro histórico mas de 300 quedaron destruidas, alrededor de 950 semidestruídas y por lo menos unas 440 quedaron averiadas. En total el número de viviendas afectadas en toda la ciudad fue de mas de 13.000, cifra equivalente al 70 % de las existentes (*Ramirez, 1989*).

Según *Espinoza, (1983)* en *INGEOMINAS, (1986)*, las principales causas de falla que ocasionaron graves efectos en las edificaciones de adobe y tapia fueron:

- La falta de continuidad de los muros.
- Adición de muros en otros materiales.
- Cubiertas pesadas, constituidas generalmente por estructuras de madera, con caña brava y teja de barro.
- Falta de arriostramiento entre la cubierta, muros y pilares
- Adiciones de vanos de puertas y ventanas, aumentando el porcentaje de

aberturas originales.

- Mutilación y demolición de muros al interior de la vivienda.
- Mal estado de conservación
- Efectos del comejen sobre los techos y los entrepisos.

El continuo proceso de modificación de las edificaciones, debido a su adecuación para una vivienda mas cómoda y funcional, trajo como consecuencia alteraciones estructurales drásticas. La apertura de puertas, ventanas y huecos para muebles, debilitó los muros. La reparación de la cubierta requirió a veces la adición de nuevas camas de barro para lograr un mejor apoyo de las tejas, así el peso de estas cubiertas también aumentó. Otras modificaciones de cubiertas también alteraron algunos de los amarres que posiblemente colocaron los antiguos constructores para lograr un mejor comportamiento de estas casas (*Ramírez, 1989*).



Castrillón, 1983.

Figura 49. Viviendas de adobe afectadas por el terremoto del 31 de marzo de 1983 en Popayán.

De acuerdo con *INGEOMINAS* (1986), las construcciones de ladrillo cocido sufrieron daños tan graves que la demolición de las mismas fue el paso necesario después del sismo. Este tipo de construcción se desarrolló en forma caótica en Popayán, como en la mayoría de las ciudades del país. Los propietarios de un gran número de pequeños lotes construyeron sus propias viviendas en forma precaria, sin ninguna técnica. Generalmente el único control municipal consistió en la revisión de los planos arquitectónicos, pero nadie se preocupó por exigir algunos requisitos mínimos que permitieran lograr un buen comportamiento sísmico de las viviendas.



Figura 50. Bloques de Pubenza en Popayán.

Prácticamente ninguna casa de ladrillo de Popayán contaba en la época del terremoto con un sistema sismo resistente; no contaban con vigas de amarre, los dinteles a menudo eran casi inexistentes y los capiteles o áticos estaban total o parcialmente sueltos de los muros; las aberturas no tenían refuerzos verticales ni horizontales; frecuentemente los muros eran intrínsecamente débiles y la traba entre ellos no existía, o era deficiente. Además las cubiertas de teja contaban con una estructura defectuosa debido a la falta de arriostamiento entre los elementos resistentes.

2.7.3 Sismo del Eje Cafetero del 25 de enero de 1999.

Tomando como referente los desastres en Colombia, ocasionados por sismos fuertes durante la última década, este es el que ha generado la mayor cantidad de muertes y pérdidas materiales. Sus cifras indican que cerca de 1200 personas perdieron la vida y por lo menos 5000 resultaron heridas. El número de afectados fue del orden de 200 000, los cuales perdieron la vivienda y el espacio de trabajo, causando daños a cerca de 50 000 edificaciones en la zona cafetera, cuyos costos ascienden a US\$ 1800 millones de dólares, generando un impacto total que se estima del orden del 1.5 % del PIB del país (Cardona, 1999).



Figura 51. Colapso de un edificio moderna en Armenia, durante la replica de las 5:40 p.m el 25 de enero de 1999.

Los daños generados por el sismo del Eje Cafetero se concentraron en edificaciones antiguas, en edificios de mampostería no reforzada, faltos de confinamiento y en edificios construidos antes de la expedición del primer código nacional de construcciones sismo resistente (*Cardona, 1999*).



Ing. Harold Trujillo, 1999

Figura 52. Colapso de una edificación moderna de construcción popular, terremoto del 25 de enero de 1999 en el Eje Cafetero.

Las edificaciones de uno y dos pisos fueron las que más daños sufrieron, debido fundamentalmente a las características del sismo. En las construcciones situadas sobre rellenos, el daño se extendió hasta las construcciones de seis pisos (*Aguar 1999*). Muchas de las edificaciones del centro de la ciudad de Armenia y Pereira presentaron daños estructurales severos, debido a la mala calidad de los materiales, al diseño inadecuado y la deficiencia en la construcción (*Cardona, 1999*),

Por otra parte, las edificaciones tradicionales locales construidas en bahareque "estilo temblorero" presentaron un buen comportamiento. Sin embargo algunas de estas edificaciones colapsaron o perdieron su cubierta debido al alto grado de deterioro que presentaban en el momento del sismo,

al igual que también fallaron por que se les había adicionado muros de mampostería no reforzada al interior o en sus fachadas, que al fallar por la falta de estabilidad, amarre y resistencia indujeron el colapso de la edificación. Estas viviendas en bahareque causaron la menor cantidad de lesionados debido a su bajo peso.



Figura 53. Edificaciones de bahareque “Estilo temblorero” en el Eje Cafetero.

2.8 RIESGO SÍSMICO.

2.8.1 Evaluación riesgo sísmico.

La evaluación del riesgo sísmico consta de las siguientes etapas (tomado de estudios de vulnerabilidad y evaluación de riesgo sísmico, planificación física y urbana en áreas propensas, Cardona, 1988):

- Evaluación de la amenaza sísmica a escala global y local.
- Identificación de los elementos expuestos o amenazados.
- Definición de funciones de vulnerabilidad que relacionen las pérdidas específicas con la amenaza sísmica para los elementos expuestos.

- Evaluación de las pérdidas específicas de cada elemento expuesto, determinando su factor de participación en los bienes existentes.
- Evaluación de la totalidad del riesgo sísmico para una región determinada.

2.8.1.1 Evaluación de la amenaza sísmica.

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

De acuerdo con *Cardona*, (1988), la amenaza sísmica se puede expresar en términos de la aceleración pico efectiva, la velocidad, el espectro de respuesta, la duración de excitación, el contenido frecuencial u otros parámetros que pueden afectar las estructuras.

Uno de los parámetros más utilizados es la intensidad, en la Escala Modificada de Mercalli, debido a que con ésta es posible asignar una intensidad a eventos históricos bien documentados e incluirlos en el catálogo de eventos ocurridos. (*Cardona*,1988; *Bommer*, 1986)

2.8.1.2 Identificación de los elementos expuestos.

Una vez conocido el nivel de amenaza sísmica es necesario identificar los elementos expuestos sometidos a riesgo en el área de interés, es decir, la definición de un modelo de pérdidas o efectos para la región en estudio. Las pérdidas pueden ser directas e indirectas. El modelo de pérdidas directas está relacionado con el daño físico, expresado en víctimas, daños en la infraestructura de servicios, en la vivienda, en las empresas, etc.

2.8.1.3 Evaluación del daño y funciones de vulnerabilidad.

Para definir el modelo de pérdidas y efectos sobre una región considerada, es necesario, idealmente, realizar una evaluación del daño causado sobre los elementos expuestos en eventos anteriores. Esta evaluación debe llevarse a cabo utilizando un procedimiento unificado sobre la región, que permita construir una base de datos consistente de los daños, y así realizar una estimación confiable de las pérdidas (*Cardona, 1988*)

Para cada tipo de elemento sometido a riesgo pueden determinarse, conocido el inventario de daños, relaciones entre el parámetro descriptivo de la intensidad y el nivel de daño ocurrido. Estas relaciones conocidas como funciones de vulnerabilidad empírica u observada expresan las pérdidas específicas para un rango de amenaza sísmica considerado (*Cardona, 1988; Caicedo, et. al, 1994*).

Las funciones de vulnerabilidad derivadas a raíz de las evaluaciones de daños, se utilizan para la estimación de las pérdidas específicas de los elementos sometidos a riesgo. Estas funciones pueden emplearse como

información básica para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de las estructuras.

Al parecer todavía en Colombia no existe una base de datos consistente de los daños observados en estructuras afectadas por sismos anteriores, lo que dificultaría la construcción de funciones de vulnerabilidad a partir de un inventario de daños. No obstante, es preciso aclarar que esto no es un impedimento para la evaluación y la estimación de daños de estructuras existentes, si bien, en la actualidad se han elaborado estudios en algunas regiones del país referidas a la estimación del riesgo sísmico, para los cuales se han establecido otro tipo de parámetros, que permiten igualmente la estimación del riesgo sísmico a gran escala.

2.8.1.4 Estimación del riesgo sísmico específico.

El riesgo sísmico específico (*UNDRO*, 1979, en *Cardona*, 1988) se define como el nivel de pérdidas específicas probables para un escenario particular de eventos sísmicos. De tal manera que es esencial considerar para los diferentes tipos de edificaciones en sus respectivas categorías (sismo resistente y no-sismo resistente) en una región determinada, los diferentes niveles esperados de amenaza a que se encuentran sometidos durante su vida útil y una probabilidad de no-excedencia justificada desde el punto de vista de la seguridad y el desarrollo económico de la región. Esta forma de evaluar las pérdidas específicas no estima el total de pérdidas en un periodo de tiempo dado, sino el total de pérdidas para un evento sísmico esperado que pueda ocurrir con un periodo de retorno determinado.

2.8.1.5 Estimación del riesgo sísmico total.

El riesgo sísmico total puede determinarse después de conocer el riesgo sísmico específico de cada elemento considerado, obtenido para diferentes periodos de retorno y una probabilidad definida, conocida una densidad, y la distribución espacial, así como la vida útil económica de cada elemento sobre el área de estudio.

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

A manera de síntesis y de acuerdo con todo lo mencionado anteriormente, se puede decir que es posible, a partir del conocimiento de la vulnerabilidad de elementos expuestos y la amenaza sísmica en una región determinada construir escenarios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

2.8.2 Escenarios de vulnerabilidad sísmica.

Un escenario de vulnerabilidad sísmica se puede definir como el conjunto de condiciones particulares o generales que muestran la susceptibilidad ó predisposición de un grupo de elementos expuestos, a sufrir daño o pérdida debido a un movimiento sísmico, de una intensidad dada, en un periodo tiempo y en un lugar determinado.

De acuerdo con la definición anterior, es posible construir escenarios de vulnerabilidad sísmica, para cada uno de los indicadores de vulnerabilidad, identificando y mostrando las áreas y los elementos más vulnerables de la zona de estudio, permitiendo además de tener una información estadística, conocer una distribución espacial de los elementos susceptibles a daño. Estos escenarios pueden ser representados en mapas, utilizando un sistema de información geográfica - SIG.

2.8.3 Escenarios de daño sísmico.

Un escenario de daño sísmico se puede definir como el conjunto de condiciones particulares o generales que muestran y definen las pérdidas o daños potenciales de los elementos expuestos, que se pueden generar debido a la ocurrencia de un movimiento sísmico, de una intensidad dada, en un periodo de tiempo y en un lugar determinado. El escenario de daño sísmico permite conocer, aparte de una información estadística, una distribución espacial de los daños probables. Estos escenarios pueden ser representados en mapas, utilizando un sistema de información geográfica - SIG.

2.8.4 Construcción de escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico mediante la utilización de un sistema de información geográfico – SIG.

De acuerdo con lo arriba mencionado se puede concluir que un escenario es generalmente una sinopsis o un esquema de lo que podría suceder; así un escenario de daños puede ser considerado como una sinopsis o un esquema de un evento peligroso, y de sus impactos sobre una región o comunidad.

Los mapas son una herramienta valiosa para localizar y conocer los elementos en riesgo dentro una comunidad. Estos pueden proporcionar información, sobre cuales de las áreas requieren mas estudio; cuales requieren medidas de mitigación y cuales necesitan inmediata atención frente a la ocurrencia de un evento peligroso.

Para la mapificación de los escenarios de vulnerabilidad y daño sísmico es necesario tener una base datos consistente de información, sobre los elementos en estudio de acuerdo al nivel de detalle requerido y a la escala en que se esta trabajando. Además de un mapa base y un Sistema de información geográfico **SIG**, que permita combinar o integrar la información para su representación grafica espacial.

Se puede decir que un **SIG** combina utilidades básicas de un sistema gráfico con la potencia y capacidad de una base de datos relacional, compartiendo información de estos dos sistemas de forma transparente para el usuario (*ESRI*, 1990, en *Caicedo et al*, 1994).

De acuerdo con *Caicedo et., al* (1994), la principal diferencia de los **SIG** con otro tipo de software para la representación gráfica de información, consiste básicamente en que estos mantienen una relación espacial de los objetos almacenados en la memoria del computador y permiten la asignación a dichos objetos de cualquier información que sea posible almacenar en una base de datos. Esta información hace posible que los objetos no solo puedan ser relacionados entre sí de forma gráfica sino también mediante operaciones lógicas, matemáticas o complejas.