

# Estudio de los daños en las Estructuras Asociados a los Sismos de 2001

En este capítulo el estudio se concentra en los daños causados por los sismos del 13 de enero y 13 de febrero, esencialmente en los efectos que ambos sismos causaron en la infraestructura de las zonas más afectadas.

El objetivo final de este estudio es extraer lecciones sobre el comportamiento de las diferentes tipologías constructivas existentes en el país, para mejorar las prácticas constructivas en el futuro y evitar los tipos de vivienda más vulnerables; esto ayudará a minimizar los riesgos.

También se pretende proponer recomendaciones que sirvan de guía para futuras campañas orientadas a la disminución de daños y riesgos causados por terremotos; lo cual permitirá optimizar las relaciones existentes entre el movimiento y los daños, a la vez, que mejorará los criterios de diseño sismorresistente.

El análisis de daños se ha realizado con tres niveles de detalle, acordes con la información disponible:

En un primer nivel, se efectúa un análisis global de daños reportados por departamentos, partiendo de información de diversas fuentes, esencialmente de las valoraciones dadas por el Comité de Emergencia Nacional (COEN) después de cada uno de los eventos principales. En este análisis apenas se puede diferenciar los tipos constructivos, dado el carácter general de la información disponible se refiere a daños totales en cada departamento; el

análisis de este primer nivel se presenta en el apartado 4.1.

En un segundo nivel se analizan los daños por municipios, partiendo de la información suministrada por el Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP). Esta información se refiere al número total de viviendas rurales y urbanas que han sufrido daños reparables e irreparables en cada municipio, así como al número total de cada clase de vivienda. Esto permite efectuar ciertos análisis en términos de porcentaje de casas que experimentaron cierto tipo de daño para cada clase; el análisis comprende los tipos de viviendas tanto en las zonas urbanas como en la rural. Sin embargo, la clasificación realizada no permite la asignación de vulnerabilidades acordes con las escalas más actuales y este aspecto no puede ser tratado en detalle.

Por otra parte, no están separados los daños del sismo del 13 de enero y del 13 de febrero. Si bien es de suponer que la mayor parte correspondan al primero, siendo los del segundo restringidos a un área macrosísmica más limitada en torno al epicentro. Este análisis se presenta en el apartado 4.2.

Un tercer análisis más detallado se ha realizado tomando como punto de partida una base de datos de daño, configurada tras los terremotos de enero y febrero, en la que se tiene información de más de cuatro mil 500 estructuras, en tipología y material constructivo, así como al grado de daño sufrido en cada uno de los terremotos.

Esto ha permitido asignar la clase de vulnerabilidad en cada estructura y analizar cualitativamente los comportamientos de las diferentes clases, así como la variabilidad geográfica del daño, para cada una de ellas. No obstante, la muestra de observaciones disponible no es completa ni representativa para efectuar estudios estadísticos en términos de porcentaje, ni para examinar relaciones cuantitativas entre el movimiento y el daño.

Con esta limitante, esta base de datos para aplicaciones destinadas a evaluación del riesgo no es completa; aunque la información que contiene es de gran interés, por las lecciones que pueden extraerse y también por las recomendaciones que de ella se pueden derivar para futuras campañas de daño. El apartado 4.3. contiene el estudio realizado al respecto.

Un último apartado 4.4 recoge las recomendaciones para futuros estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, derivados de los resultados y aspectos críticos puestos de manifiesto en los apartados anteriores.

## **ESTUDIO GENERAL DE DAÑOS POR DEPARTAMENTOS**

Un estudio general de los daños causados por los terremotos del 13 de enero y del 13 de febrero se presenta en este apartado. Se parte de información de distintas fuentes que han sido resumidas en una descripción general de daños para ambos terremotos. Además, se ha efectuado una estadística



descriptiva por departamentos, a partir de la información facilitada por el COEN, que se resume en una serie de histogramas con el desglose de daños, donde se presenta porcentajes, para cada uno de los terremotos.

La figura 4.1 muestra el mapa por departamentos de El Salvador. A continuación se presenta el análisis efectuado para cada uno de los sismos.

## ANÁLISIS DE DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 13 DE ENERO DE 2001

El terremoto del 13 de enero tuvo su epicentro en la zona de subducción frente a las costas de El Salvador, con una profundidad de 60 Km. y una magnitud Mw 7.7.

El terremoto causó daños severos en una amplia área al sur de la zona volcánica de El Salvador, afectando fundamentalmente a las zonas rurales. El departamento de La Libertad reportó el mayor número de muertes causadas por el deslizamiento de Las Colinas.

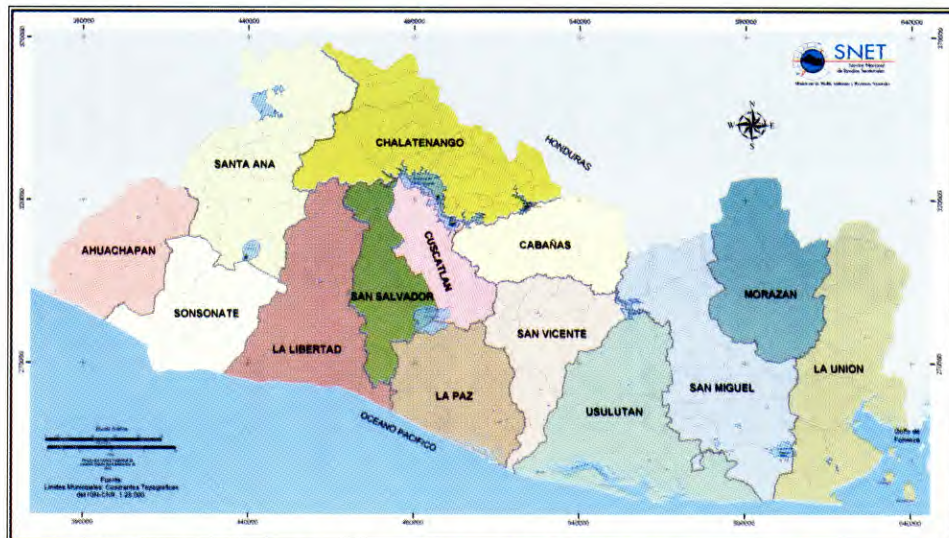


Figura 4.1 Mapa por departamentos de la República de El Salvador.

En el costero departamento de Usulután se reportó el mayor número de viviendas dañadas y destruidas.

Según la valoración del Centro Sismológico de América, las intensidades sentidas de este sismo en la escala Mercalli Modificada fueron:

VII-VIII En El Salvador

VI-VIII Al sur de Guatemala y Suroeste de Honduras.

V En Nicaragua y sur de Chiapas

III-IV En Costa Rica y Centro de Honduras

II-III Isla del Coco y oeste de Panamá

Además de los daños reportados dentro de la geografía salvadoreña, hay que añadir los efectos sobre los países limítrofes. En Guatemala, según información de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), 2 personas resultaron muertas en Jalpatagua y 8 personas heridas. En el mismo departamento 28 viviendas resultaron afectadas. Otras cuatro personas murieron en Totonicapán y 2 resultaron heridas. El mapa de isosistas que define el área macrosísmica de este terremoto se muestra en la figura 4.2

## ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DAÑOS

Los daños desglosados por departamentos, según la valoración del COEN son presentados en la tabla 4.1. En ella se indica el número de personas fallecidas, lesionadas, edificios públicos dañados, viviendas dañadas, viviendas destruidas, derrumbes, iglesias dañadas, muelles dañados y número total de damnificados por departamento.

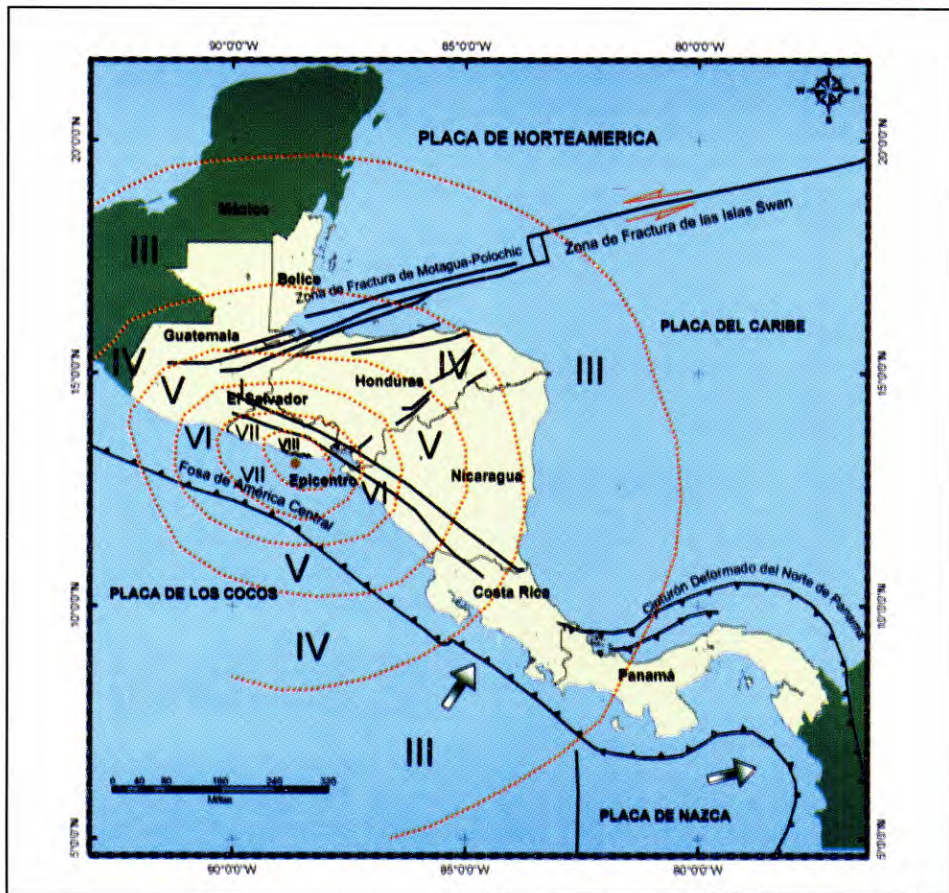


Figura 4.2. Mapa de isosistas del sismo del 13 de enero de 2001



**Tabla 4.1**

**Valoración de daños, por departamentos, producidos por el sismo del 13 de enero de 2001 (Fuente: C.O.E.N. Datos al 28 de febrero de 2001)**

Departamento	Fallecidos	Lesionados	Edif. Públicos Dañados	Viviendas Dañadas	Viviendas Destruídas	Derrumbes	Iglesias Dañadas	Muelles Dañados	Damnificados
La Libertad	685	2183	48	14558	15723	20	45	0	147708
La Paz	44	147	272	25076	17996	75	46	0	232135
Sonsonate	48	1295	38	17773	10501	82	69	0	101487
Santa Ana	47	327	5	13925	4823	27	49	39	112561
Cuscatlán	20	43	47	4762	4282	17	6	0	38119
Usulután	27	786	335	30716	29293	38	90	0	356391
San Salvador	24	391	76	12836	10372	133	19	0	107083
San Miguel	19	43	23	10624	2902	26	38	4	76665
San Vicente	29	81	40	17292	5218	4	12	0	103086
La Unión	1	8	98	2136	268	1	5	0	13094
Ahuchapán	0	247	60	18540	6553	12	14	0	71086
Cabañas	0	7	31	1153	309	4	5	0	2997
Morazán	0	3	35	94	5	1	4	0	498
Chalatenango	0	4	47	307	16	5	3	0	1250
Total	944	5565	1155	169792	108261	445	405	43	1364160

**Tabla 4.2**

**Porcentajes de Daño estimados con base al conjunto total de daños por departamento, para el sismo del 13 de enero de 2001**

Departamento	Fallecidos	Lesionados	Edif. Públicos Dañados	Viviendas Dañadas	Viviendas Destruídas	Derrumbes	Iglesias Dañadas	Muelles Dañados	Damnificados
La Libertad	0.726	0.392	0.042	0.086	0.145	0.045	0.111	0.000	0.108
La Paz	0.047	0.026	0.235	0.148	0.166	0.169	0.114	0.000	0.170
Sonsonate	0.051	0.233	0.033	0.105	0.097	0.184	0.170	0.000	0.074
Santa Ana	0.050	0.059	0.004	0.082	0.045	0.061	0.121	0.097	0.083
Cuscatlán	0.021	0.008	0.041	0.028	0.040	0.038	0.015	0.000	0.028
Usulután	0.029	0.141	0.290	0.181	0.271	0.085	0.222	0.000	0.261
San Salvador	0.025	0.070	0.066	0.076	0.096	0.299	0.047	0.000	0.078
San Miguel	0.020	0.008	0.020	0.063	0.027	0.058	0.094	0.093	0.056
San Vicente	0.031	0.015	0.035	0.102	0.048	0.009	0.030	0.000	0.076
La Unión	0.001	0.001	0.085	0.013	0.002	0.002	0.012	0.000	0.010
Ahuchapán	0.000	0.044	0.052	0.109	0.061	0.027	0.035	0.000	0.052
Cabañas	0.000	0.001	0.027	0.007	0.003	0.009	0.012	0.000	0.002
Morazán	0.000	0.001	0.030	0.001	0.000	0.002	0.010	0.000	0.000
Chalatenango	0.000	0.001	0.041	0.002	0.000	0.011	0.007	0.000	0.001
Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

A partir de esta información se ha realizado una estadística descriptiva de daños, estimando en primer lugar, el porcentaje total de los efectos causados, a razón de cada categoría por departamento. Sería conveniente para efectos de minimizar riesgos que en la realización de este análisis se haga referencia a la información en cada departamento, pero no se dispone de toda la información.

La tabla 4.2 muestra los porcentajes de daño estimados, pudiendo apreciarse las variaciones relativas entre distintos departamentos. Con la información de las tablas 4.1 y 4.2 se han generado un conjunto de histogramas, que facilitan el análisis

gráfico de los daños. Las distribuciones de daños en términos de porcentaje, correspondientes a las distintas categorías desglosadas, se incluyen en las figuras 4.3 a 4.6.

Del estudio general de daños causados por los sismos del 13 de enero se extraen las siguientes conclusiones:

El terremoto causó daños severos en un área amplia al sur de la zona volcánica de El Salvador, afectando fundamentalmente a las zonas rurales, con más de 900 muertos en El Salvador y seis fallecidos más en el sur de Guatemala. El número de heridos fue superior a cinco mil 500 y más de un millón de personas resultaron damnificadas.

Los mayores daños se reportaron en los departamentos de La Paz, Usulután y La Libertad, donde el número de viviendas destruidas fue superior a 63 mil. Chalatenango, Cabañas, La Unión y Morazán no reportaron daños mayores.

Los departamentos con mayor destrucción de viviendas no fueron los que registraron mayor número de muertos y heridos. El mayor número de muertos por departamento se concentró en La Libertad, debido al deslizamiento de Las Colinas. En el departamento de San Salvador se produjeron 130 derrumbes, el mayor registro en todo el territorio nacional.

Los departamentos costeros de La Libertad, Sonsonate y Usulután, fueron los



más afectados en cuanto a número de heridos, las cifras disminuyeron en el interior del país. El departamento costero de La Unión sufrió daños menores, con un número de personas afectadas inferior a 10, lo cual puede explicarse por estar más lejos de la fuente del terremoto.

Aunque muchas viviendas fueron destruidas por el sismo, la mayor parte de víctimas mortales se debió a efectos secundarios, especialmente deslizamientos y derrumbes. El deslizamiento que produjo mayor daño fue el de Las Colinas en la Cordillera El Bálsamo (Santa Tecla, departamento de La Libertad), que causó más de 600 muertos, con un número no cuantificado de desaparecidos.

En general, las estructuras que sufrieron mayor daño fueron las de adobe y bahareque y en menor grado las de sistema mixto; las de concreto resistieron aceptablemente. En la capital, San Salvador, la mayoría de los edificios resistió el terremoto y de los que presentaron daños estructurales ninguno llegó al colapso. Sin embargo, en las poblaciones de Comasagua y San Agustín la gran mayoría de las viviendas quedaron destruidas.

Según la información facilitada por el COEN, La Libertad registró el mayor

porcentaje de fallecidos (73 %) y heridos (39 %) en el ámbito nacional. Si se valoran los efectos del terremoto, el departamento de Usulután presentó los mayores daños en infraestructura y en número de damnificados.

A continuación se detallan los siguientes porcentajes: edificios públicos, 29%; viviendas dañadas, 18 %; viviendas destruidas, 27 %; iglesias dañadas, 22 % damnificados, 26%; la mayor parte de los muelles dañados se produjo en Santa Ana en el lago de Coatepeque, (91 %). Los porcentajes presentados se refieren a los daños en el total de departamentos y no al censo de cada población.

### ANÁLISIS DE DAÑOS CAUSADOS POR EL SISMO DEL 13 DE FEBRERO

El terremoto del 13 de febrero tuvo su epicentro al oriente del Lago de Ilopango. La magnitud de 6.6 MW, Magnitud de Movimiento según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) por sus siglas en inglés; que en comparación con el terremoto del 13 de enero fue de un orden menor. El segundo terremoto causó graves daños en un área restringida de la zona central y paracentral del país.

San Vicente fue el departamento más dañado por el terremoto, con el 83 % de edificios, en la cabecera departamental destruidos y más de 70 personas fallecidas. En el departamento de La Paz al menos 50 personas murieron, concretamente en la localidad en San Juan Tepezontes. Otras 10 municipalidades del departamento fueron afectadas. Y Cojutepeque, cabecera departamental de Cuscatlán fue el área más afectada del departamento, junto con San Pedro Perulapán y Candelaria. En este municipio, una escuela colapsó causando seis víctimas mortales.

### ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DAÑOS

Partiendo de la información facilitada por el COEN, incluida en la tabla 4.3, se ha realizado un análisis similar para el sismo del 13 de febrero, al suscitado un mes antes. Para ello se han estimado en primer lugar, los porcentajes de daños por departamento que se incluyen en la tabla 4.4. El daño de este terremoto se concentra entonces en la parte central del país, en una zona mucho más restringida que el área macrosísmica del sismo del 13 de enero.

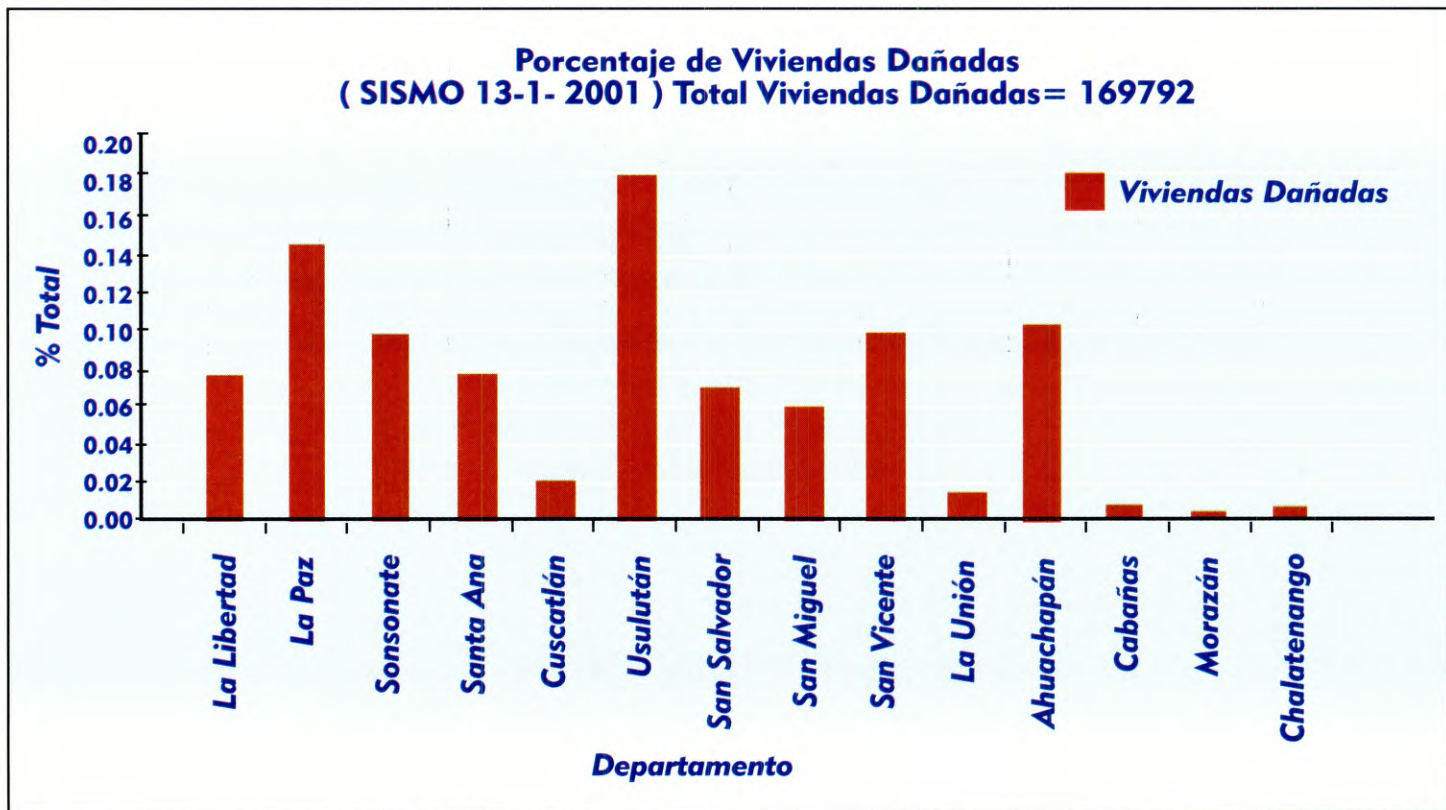


Figura 4.3 Histograma del porcentaje de viviendas dañadas por departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001



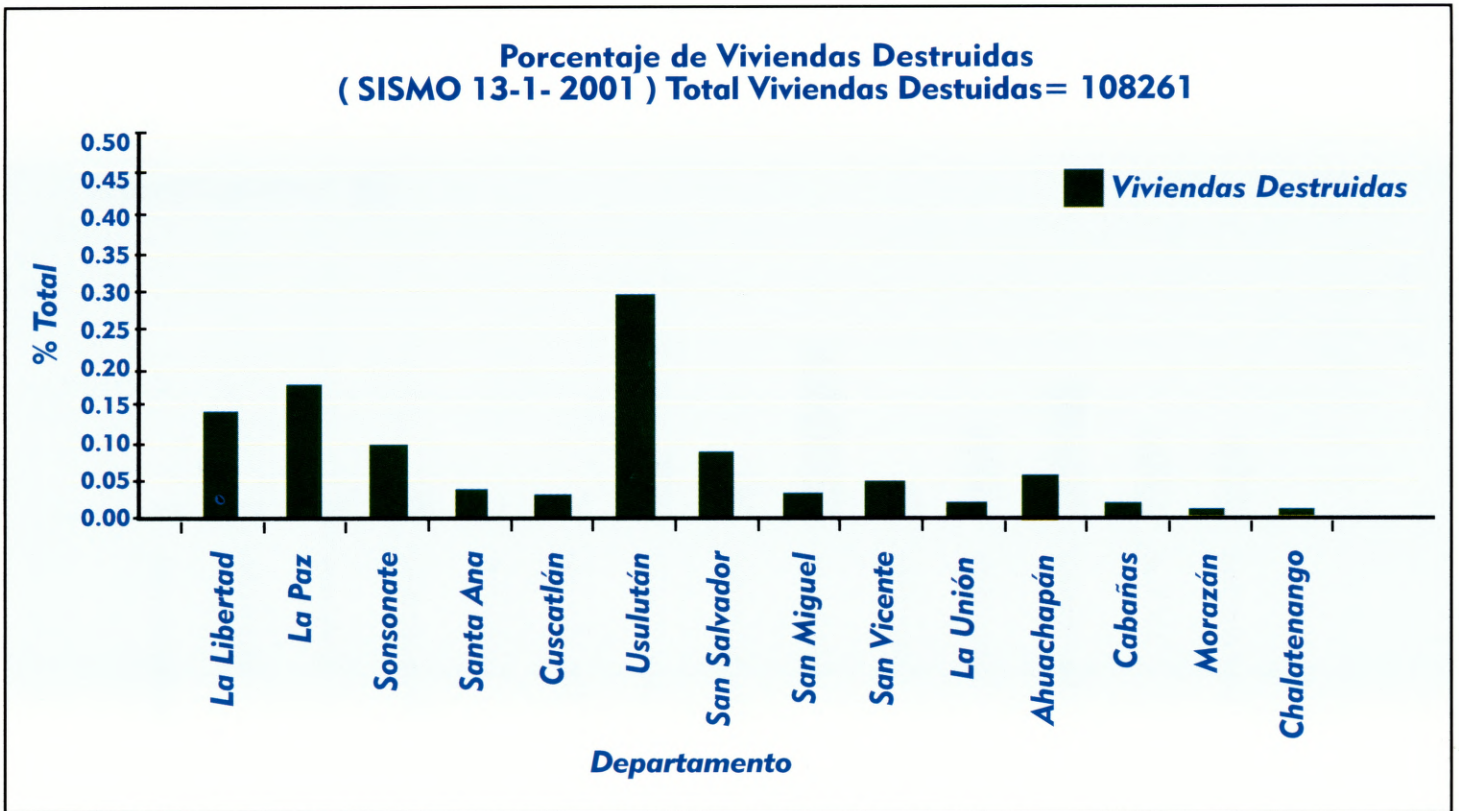


Figura 4.4 Histograma del porcentaje de viviendas destruidas por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001

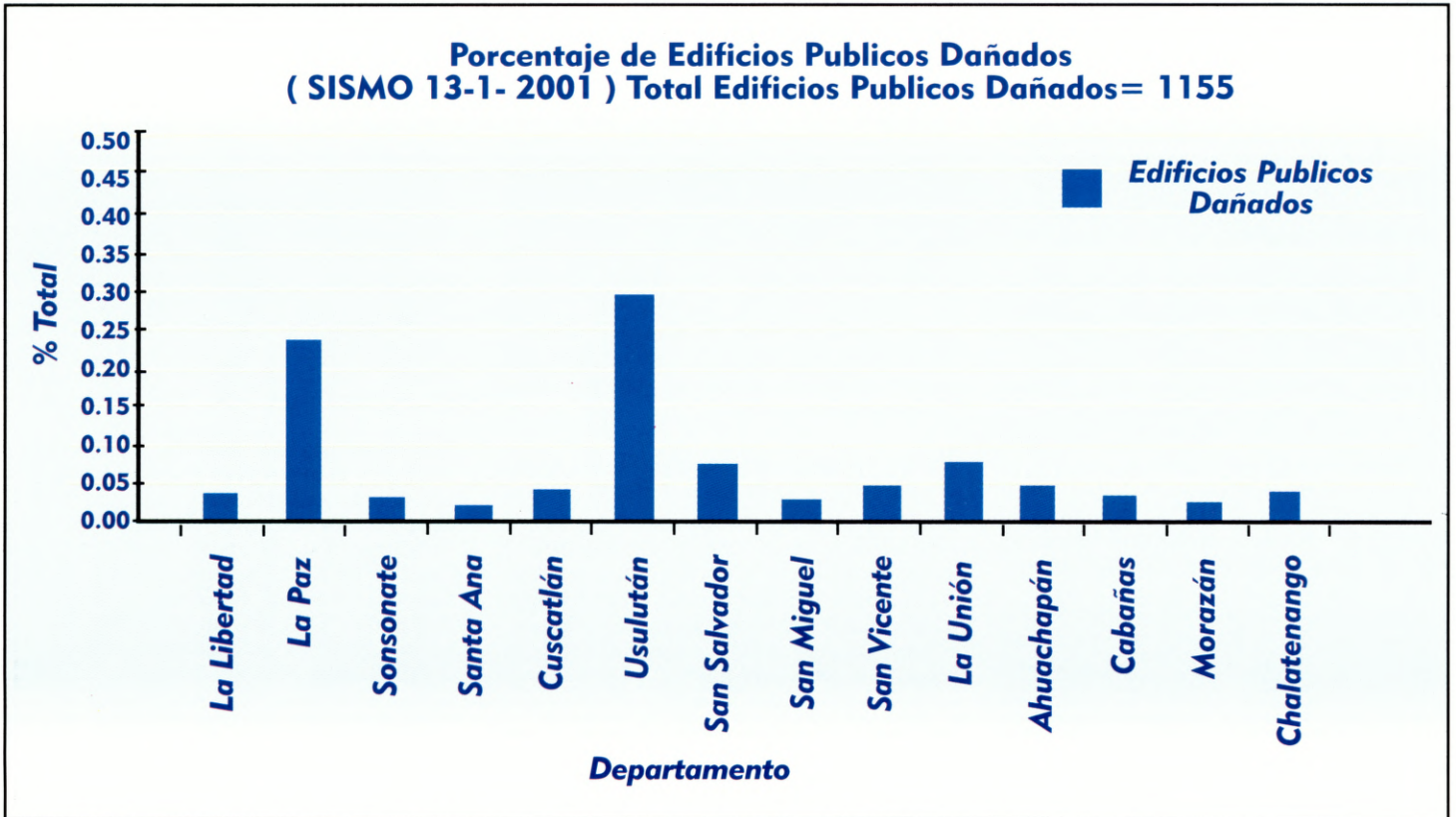


Figura 4.5 Histograma del porcentaje de edificios públicos dañados por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001



**Porcentaje de Iglesias Dañadas  
( SISMO 13-1- 2001 ) Total Iglesias Dañadas= 405**

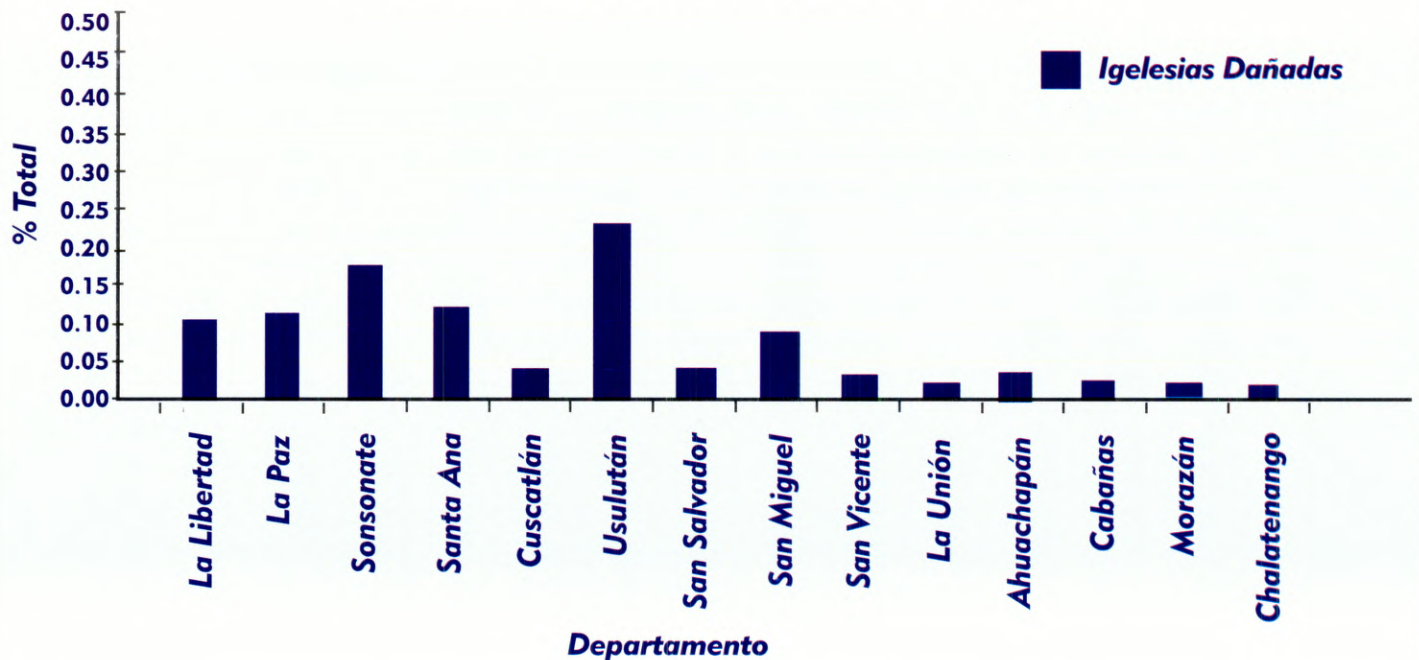


Figura 4.6 Histograma del porcentaje de iglesias dañadas por Departamento. Terremoto del 13 de Enero de 2001

Analizando las gráficas de porcentajes, es de destacar la desproporción en viviendas dañadas de La Paz, muy inferior al de los departamentos de San Vicente y Cuscatlán, que no se corresponde con el de viviendas destruidas, que es considerablemente mayor en La Paz.

De la valoración global de daños se concluye lo siguiente:

El sismo del 13 de febrero causó graves daños en un área más restringida que el del 13 de enero, siendo los departamentos más afectados los de Cuscatlán, La Paz y San Vicente, pertenecientes a la zona central del país. Al igual que el sismo del 13 de enero, este terremoto fue sentido con fuerza en Honduras y Guatemala.

Este sismo, según cifras del COEN causó 315 muertos, tres mil 299 lesionados y el número de viviendas destruidas llegó a 41 mil 302; se cuantificó 71 derrumbes.

Poblaciones enteras como San Pedro Nonualco, San Miguel y San Juan Tepezontes, Santa Cruz Analquito, San Cayetano Istepeque, Santa María Ostuma, entre otras, presentaron graves daños con la mayoría de las casas colapsadas. Muchas de estas poblaciones quedaron incomunicadas por la vía terrestre.

Las ciudades de San Vicente y Cojutepeque (cabeceras de los departamentos de San

Vicente y Cuscatlán respectivamente) sufrieron daños en más del 50 % de su infraestructura. Las cabeceras municipales de Tepetitán, San Cayetano Istepeque, Verapaz, Nueva Guadalupe, Santa Cruz Analquito, Candelaria, Jerusalén, Santa María Ostuma, Mercedes La Ceiba, San Pedro Nonualco, Santiago Nonualco, San Antonio Masahuat, San Miguel Tepezontes, San Juan Tepezontes, San Juan Nonualco, Santa Cruz Michapa, San Ramón y Paraíso de Osorio, de los departamentos de La Paz, San Vicente y Cuscatlán, situadas todas en la comprensión del Volcán Chichontepeque, la destrucción de inmuebles superó el 75% de la infraestructura.

Otras poblaciones como Santa Cruz Analquito, Candelaria y Santa María Ostuma fueron destruidas casi en su totalidad, y en las zonas rurales, por lo general, toda la infraestructura es más vulnerable. En muchos de estos lugares colapsaron los sistemas de servicios básicos como: alcantarillado, red del tendido eléctrico y telefonía fija.

El mayor porcentaje de fallecidos se registra en Cuscatlán y fue de (52%), donde también se reportó el mayor porcentaje de lesionados que llegó a (42 %), de viviendas dañadas con el (58 %), de iglesias dañadas (64%) y

de derrumbes en un (62%) La mayor parte de viviendas destruidas corresponde a La Paz (41 %), donde también se registró el mayor porcentaje de muelles dañados (50 %); en cuanto a damnificados en general el mayor porcentaje corresponde a Cuscatlán con (42 %).

La carretera panamericana, a la altura de Los Chorros en La Libertad y de la Leona en San Vicente, volvió a quedar bloqueada por nuevos deslizamientos de tierra. Además de reportarse nuevos derrumbes en Zacatecoluca, La Paz; en el volcán Chichontepeque en San Vicente; en el volcán de Usulután y en el volcán Quetzalpeque en San Salvador.

Los hospitales nacionales de Cojutepeque, La Paz y San Vicente fueron evacuados totalmente, colapsando su capacidad ante la enorme cantidad de heridos. Los hospitales nacionales de Usulután y San Juan de Dios, en la municipalidad de San Miguel, fueron también seriamente dañados. Dos escuelas situadas en Cojutepeque y en Paraíso de Osorio se desplomaron.

El departamento de Chalatenango, que no había sufrido mayores daños durante el terremoto anterior, fue afectado y se reportaron varias casas destruidas e innumerables deslaves. La comunicación telefónica en esta zona del país fue restablecida varias horas después.



**Tabla 4.3**

**Valoración de daños, por departamentos, producidos por el sismo del 13 de Febrero de 2001 (Fuente: C.O.E.N. Datos al 4 de abril de 2001)**

Departamento	Fallecidos	Lesionados	Edif. Publicos Dañados	Viviendas Dañadas	Viviendas Destruidas	Derrumbes	Iglesias Dañadas	Muelles Dañados	Damnificados
La Paz	58	806	4	2128	17117	21	20	5	75821
Cuscatlán	165	1372	68	9177	15467	44	47	2	106120
San Salvador	4	0	0	0	0	0	0	0	1370
San Vicente	87	1120	4	4108	8425	4	6	0	66443
Morazán	1	0	3	16	0	0	0	3	0
Cabañas	0	0	0	248	254	0	0	0	2638
Usulután	0	1	0	0	20	0	0	0	0
San Miguel	0	0	3	29	19	2	0	0	230
Total	315	3299	82	15706	41302	71	73	10	252622

**Tabla 4.4**

**Porcentajes de daño estimados en base al conjunto total de daños por departamento, para el sismo del 13 de Febrero**

Departamento	Fallecidos	Lesionados	Edif. Publicos Dañados	Viviendas Dañadas	Viviendas Destruidas	Derrumbes	Iglesias Dañadas	Muelles Dañados	Damnificados
La Paz	0.184	0.244	0.049	0.135	0.414	0.296	0.274	0.500	0.300
Cuscatlán	0.524	0.416	0.829	0.584	0.374	0.620	0.644	0.200	0.420
San Salvador	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
San Vicente	0.276	0.339	0.049	0.262	0.204	0.056	0.082	0.000	0.263
Morazán	0.003	0.000	0.037	0.001	0.000	0.000	0.000	0.300	0.000
Cabañas	0.000	0.000	0.000	0.016	0.006	0.000	0.000	0.000	0.010
Usulután	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
San Miguel	0.000	0.000	0.037	0.002	0.000	0.028	0.000	0.000	0.001
Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

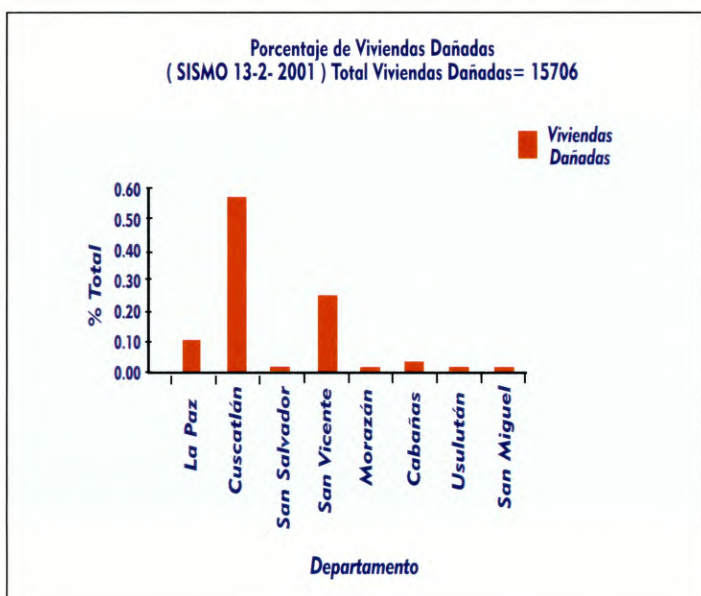


Figura 4.7 Histograma del porcentaje de viviendas dañadas por Departamento. Terremoto del 13 de Febrero de 2001

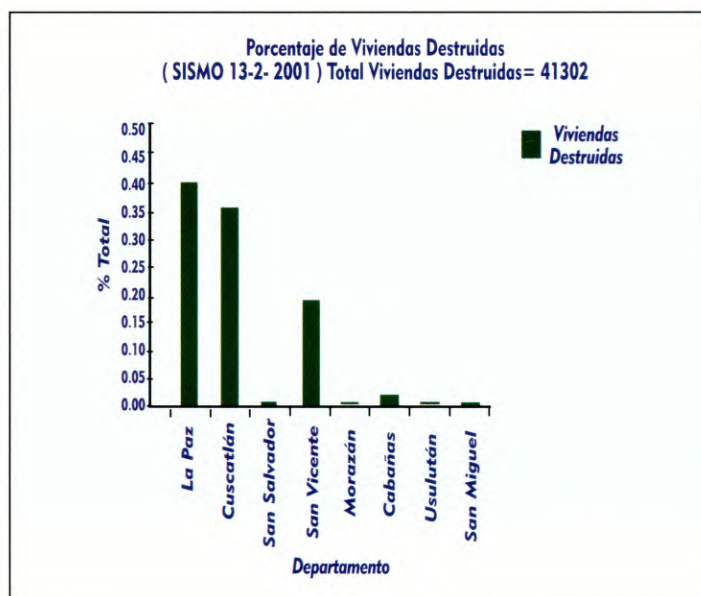


Figura 4.8 Histograma del porcentaje de viviendas destruidas por departamento. Terremoto del 13 de Febrero de 2001



## ANÁLISIS DE DAÑOS POR MUNICIPIOS

Un segundo estudio, con más detalles que el anterior se ha desarrollado con un examen minucioso de los daños en cada municipio. Estos datos fueron obtenidos de los registros realizados por el Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP).

Para cada municipio se dispone del censo total de viviendas, del número de viviendas con daño reparable y del número de ellas con daño irreparable. A su vez, las viviendas aparecen clasificadas en dos categorías: rural y urbana. Estos datos han permitido hacer una evaluación en términos de porcentaje para ambas categorías.

Desafortunadamente no se tiene información para desarrollar el análisis con una separación de las clases de vulnerabilidad (atendiendo al material y sistema constructivo), un aspecto que hubiese contribuido a ampliar el análisis de datos; no obstante, es posible hacer una valoración de la variabilidad geográfica del daño para las dos clases citadas.

El principal valor de este análisis consiste en establecer las bases o pautas de actuación para futuros estudios de este tipo, pero con información desglosada sobre tipologías constructivas, que permita obtener resultados en términos de clases de vulnerabilidad y con más niveles de daño. Con ese objetivo, se incluirán recomendaciones a seguir para estudios de vulnerabilidad dirigidos a evaluaciones de riesgo.

Para estos estudios se requiere elaborar matrices de vulnerabilidad, que recojan los resultados con porcentajes de daño para cada tipología constructiva y cada población. Esas matrices deben contener la información de partida para todo estudio de riesgo, permitiendo establecer el comportamiento de las diferentes clases y analizar sus correlaciones con los parámetros de movimiento.

Con la información disponible en esta fase no es posible elaborar matrices de vulnerabilidad, pero sí separar tres grados de daño y dos clases de edificios, evaluar porcentajes en cada caso y para cada municipio, construyendo lo que en cierto modo se puede interpretar como una matriz de daños.

Se incluye este análisis a manera de ejemplo, con el objetivo de proporcionar pautas concretas para la construcción de matrices de vulnerabilidad, en caso de disponer de información más detallada sobre tipologías constructivas.

Tabla 4.5a

Porcentajes de Daño por Municipios, originados por los dos sismos (13 de enero y 13 de febrero) en las clases rural y urbana.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	URBANO			RURAL		
		D2(%)	D1 (%)	D0 (%)	D2(%)	D1 (%)	D0 (%)
AHUACHAPÁN	AHUACHAPAN	4.11	15.28	80.61	7.44	11.61	80.95
AHUACHAPÁN	APANECA	8.32	14.88	76.80	5.28	11.93	82.80
AHUACHAPÁN	ATIQUIZAYA	0.00	0.00	100.00	6.74	0.12	93.14
AHUACHAPÁN	CONCEPCION DE ATACO	8.13	16.98	74.89	20.94	38.01	41.05
AHUACHAPÁN	EL REFUGIO	19.39	24.73	55.88	17.69	17.59	64.72
AHUACHAPÁN	GUAYMANGO	16.71	19.89	63.40	3.74	4.50	91.76
AHUACHAPÁN	JUJUTLA	9.29	12.17	78.54	4.41	0.36	95.23
AHUACHAPÁN	SAN LORENZO	12.55	24.72	62.73	3.73	2.99	93.28
AHUACHAPÁN	SAN PEDRO PUXTLA	11.81	15.21	72.99	9.50	28.41	62.09
AHUACHAPÁN	TACUBA	72.83	23.15	4.02	21.45	3.41	75.14
AHUACHAPÁN	TURIN	25.69	27.87	46.45	36.18	24.08	39.75
SANTA ANA	SANTA ANA	0.11	0.37	99.52	1.13	0.39	98.48
SANTA ANA	CANDELARIA DE LA FRONTERA	1.79	1.22	97.00	0.00	0.00	100.00
SANTA ANA	COATEPEQUE	28.56	14.65	56.79	8.95	2.57	88.48
SANTA ANA	CHALCHUAPA	1.18	0.55	98.27	6.06	3.93	90.01
SANTA ANA	EL CONGO	45.67	32.38	21.95	16.09	6.69	77.22
SANTA ANA	EL PORVENIR	0.00	0.00	100.00	1.41	0.00	98.59
SANTA ANA	SAN ANTONIO PAJONAL	0.89	0.89	98.22	0.00	0.00	100.00
SANTA ANA	SAN SEBASTIAN SALITRILLO	0.70	1.90	97.40	4.81	8.77	86.41
SANTA ANA	TEXISTEPEQUE	2.68	1.68	95.64	7.85	5.21	86.94
SONSONATE	SONSONATE	2.17	3.99	93.84	10.80	5.83	83.36
SONSONATE	ACAJUTLA	0.48	0.46	99.06	4.04	2.89	93.07
SONSONATE	ARMENIA	39.06	27.76	33.18	44.60	11.06	44.34
SONSONATE	CALUCO	39.21	22.91	37.89	41.21	7.48	51.32
SONSONATE	CUISNAHUAT	7.23	2.41	90.36	0.00	0.00	100.00
SONSONATE	IZALCO	7.70	11.15	81.15	11.90	7.62	80.49
SONSONATE	JUAYUA	8.43	14.02	77.55	4.12	5.19	90.69
SONSONATE	NAHUIZALCO	67.43	32.57	0.00	18.18	6.95	74.86
SONSONATE	NAHULINGO	23.41	25.11	51.48	9.17	5.61	85.22
SONSONATE	SALCOATITÁN	18.54	16.29	65.17	32.04	13.33	54.63
SONSONATE	SAN ANTONIO DEL MONTE	5.55	10.61	83.84	29.96	13.19	56.85
SONSONATE	SAN JULIAN	45.35	41.63	13.02	31.52	8.94	59.54
SONSONATE	SANTA CATARINA MASAHUAT	51.73	10.38	37.89	52.98	9.30	37.73
SONSONATE	SANTA ISABEL ISHUATAN	0.00	0.00	100.00	6.16	2.85	90.99
SONSONATE	SANTO DOMINGO	1.07	0.00	98.93	2.25	0.00	97.75
SONSONATE	SONZACATE	4.12	4.88	90.99	51.90	21.80	26.30
CHALATENANGO	NUEVA CONCEPCION	0.00	0.00	100.00	0.15	0.25	99.60
CHALATENANGO	SAN LUIS DEL CARMEN	11.39	11.39	77.23	2.34	8.03	89.63
LA LIBERTAD	NUEVA SAN SALVADOR	6.46	9.56	83.99	31.98	17.89	50.13
LA LIBERTAD	ANTIGUO CUSCATLAN	0.42	0.07	99.51	38.55	9.04	52.41
LA LIBERTAD	CIUDAD ARCE	24.22	22.77	53.00	36.03	18.46	45.51
LA LIBERTAD	COLON	55.56	44.44	0.00	9.81	3.61	86.58
LA LIBERTAD	COMASAGUA	89.27	10.73	0.00	42.94	19.51	37.55
LA LIBERTAD	CHILTIUPAN	6.84	0.00	93.16	5.50	2.02	92.48
LA LIBERTAD	HUIZUCAR	36.76	20.74	42.50	63.71	16.30	19.99

Con los datos facilitados se ha construido una tabla resumen de daños por municipio (tabla 4.5). En ella aparecen desglosados los daños en tres categorías:

- D0 No daño
- D1 Daño reparable
- D2 Daño irreparable

Como ya se han indicado las viviendas han sido clasificadas únicamente en dos clases:

- C1 Urbana
- C2 Rural

El dato que aparece en cada celda de la tabla 4.5 representa porcentaje de viviendas de una cierta clase (C1 ó C2) que experimenta un cierto grado de daño (D0, D1 ó D2), frente al número total de viviendas de esa clase en el municipio en cuestión.

Si llamamos genéricamente Ci a la clase de vivienda, y Dj al grado de daño, en nuestro caso los subíndices varían:

$$i = 1 \text{ ó } 2, \quad C1 = \text{Urbano y } C2 = \text{Rural}$$

$$j = 0, 1 \text{ ó } 2 \quad D0 = \text{no daño}; D1 = \text{daño reparable}; D2 = \text{Daño irreparable.}$$

Considerando también genéricamente el número de edificios de cada clase y dentro de ésta, el de cada grado de daño, podemos definir:

$$N_i - \text{n}^\circ \text{ total de edificios de cada clase } C_i$$

$$n_j - \text{n}^\circ \text{ de edificios que}$$

experimentan cada grado de daño Dj para cada clase Ci,



**Tabla 4.5b**

**Porcentajes de daño por municipios, originados por los dos sismos (13 de enero y 13 de febrero) en las clases rural y urbana. (Continuación)**

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	URBANO			RURAL		
		D2(%)	D1 (%)	D0 (%)	D2(%)	D1 (%)	D0 (%)
LA LIBERTAD	JAYAQUE	50.26	30.33		54.03	20.40	25.57
LA LIBERTAD	JICALAPA	35.96	20.61	43.42	30.49	18.96	50.55
LA LIBERTAD	LA LIBERTAD	8.96	13.85		23.40	15.56	61.05
LA LIBERTAD	NUEVO CUSCATLAN	10.75	0.00	89.25	0.00	0.00	0.00
LA LIBERTAD	OPICO	4.99	9.11		30.29	14.51	55.20
LA LIBERTAD	QUEZALTEPEQUE	0.62	0.26	99.12	1.49	0.42	98.09
LA LIBERTAD	SACACOYO	49.95	19.90		37.43	27.53	35.04
LA LIBERTAD	SAN JOSE VILLANUEVA	45.46	15.66	38.87	50.43	12.95	36.62
LA LIBERTAD	SAN MATIAS	8.70	13.44		18.88	6.72	74.40
LA LIBERTAD	TALNIQUE	54.79	21.78	23.43	55.08	16.69	28.22
LA LIBERTAD	TAMANIQUE	32.16	18.72		10.75	3.29	85.96
LA LIBERTAD	TEOTEPEQUE	5.59	2.16	92.25	16.81	11.04	72.16
LA LIBERTAD	TEPECOYO	76.02	21.73		52.39	12.62	34.99
LA LIBERTAD	ZARAGOZA	20.58	24.19	55.23	40.90	24.73	34.37
SAN SALVADOR	SAN SALVADOR	0.93	1.99		42.42	57.58	0.00
SAN SALVADOR	APOPA	0.75	2.66	96.59	10.93	3.27	85.80
SAN SALVADOR	AYUTUXTEPEQUE	8.58	9.68		8.40	6.08	85.52
SAN SALVADOR	CUSCATANCINGO	4.81	26.02	69.18	0.19	0.87	98.93
SAN SALVADOR	DELGADO	1.33	2.22		2.42	1.63	95.95
SAN SALVADOR	ILOPANGO	0.03	0.21	99.76	1.36	0.21	98.42
SAN SALVADOR	MEJICANOS	1.10	3.45		7.21	10.73	82.06
SAN SALVADOR	NEJAPA	7.10	20.90	72.00	9.33	11.12	79.55
SAN SALVADOR	PANCHIMALCO	18.03	19.44		28.51	21.73	49.76
SAN SALVADOR	ROSARIO DE MORA	34.13	19.52	46.35	47.38	18.16	34.46
SAN SALVADOR	SAN MARCOS	0.86	0.15		1.96	0.12	97.92
SAN SALVADOR	SAN MARTIN	0.86	0.48	98.66	1.40	0.70	97.90
SAN SALVADOR	SANTIAGO TEXACUANGOS	12.24	10.92		22.26	18.91	58.83
SAN SALVADOR	SANTO TOMAS	10.72	20.87	68.41	13.88	7.00	79.12
SAN SALVADOR	SOYAPANGO	1.33	1.47		0.00	0.00	0.00
SAN SALVADOR	TONACATEPEQUE	5.07	38.90	56.04	4.88	9.46	85.66
CUSCATLAN	COJUTEPEQUE	22.99	17.39		70.51	10.15	19.34
CUSCATLAN	CANDELAERIA	63.68	4.01	32.31	79.78	5.02	15.21
CUSCATLAN	EL CARMEN	67.62	19.52		47.27	12.07	40.66
CUSCATLAN	EL ROSARIO	0.83	1.25	97.92	4.14	2.63	93.23
CUSCATLAN	MONTE SAN JUAN	38.43	8.33		60.88	15.92	23.21
CUSCATLAN	ORATORIO DE CONCEPCION	2.71	4.07	93.21	0.00	0.00	100.00
CUSCATLAN	SAN CRISTOBAL	77.29	15.28		79.22	4.36	16.42
CUSCATLAN	SAN PEDRO PERULAPAN	15.88	18.36	65.76	33.54	18.60	47.86
CUSCATLAN	SAN RAFAEL CEDROS	27.17	20.00		49.42	16.91	33.66
CUSCATLAN	SAN RAMON	87.01	12.99	0.00	80.29	7.94	11.77
CUSCATLAN	SANTA CRUZ ANALQUITO	92.52	7.48		64.10	5.98	29.91
CUSCATLAN	SANTA CRUZ MICHAPA	49.53	14.04	36.44	63.16	15.67	21.18
CUSCATLAN	SUCHITOTO	0.00	0.00		0.18	0.18	99.65
CUSCATLAN	TENANCINGO	26.09	32.97	40.94	32.95	28.32	38.73
LA PAZ	ZACATECOLUCA	20.91	27.03		59.57	18.49	21.93

Entonces el dato incluido en la tabla para cada municipio, que llamamos genéricamente  $P_{ij}$ , es el porcentaje de edificios del grado de daño  $D_j$  para la clase  $C_i$ :

$$P_{ij} = n_j / N_i \quad [4.1.]$$

Por ejemplo, la tercera celda de la tabla correspondiente a la clase 1 (urbana) con daño 2 (irreparable) del municipio de Ahuachapán es  $p_{12} = 4.11$ . En cada municipio, la suma de porcentajes de daño para cada clase debe ser 100. A modo de ejemplo puede comprobarse en Ahuachapán para  $C_1$ :

$$p_{10} (80.61) + p_{11} (15.28) + p_{12} (4.11) = 100 \% \quad [4.2.]$$

En la tabla anterior no figuran los municipios que no han experimentado

ningún tipo de daño en las dos clases diferenciadas; es decir, aquellos cuyo porcentaje de daño grados de reparable e irreparable es 0 %, tanto en la zona rural como en la urbana.

Partiendo de los datos de la tabla 4.5 se han representado los mapas correspondientes a la distribución geográfica de los daños reparable e irreparable, para las dos clases: rural y urbana. Estos mapas se muestran en las figuras 4.9 a 4.12, y permiten visualizar de forma rápida la variabilidad geográfica del daño.

Las cuatro figuras corresponden a combinaciones de los dos grados de daño representados y las dos clases de vivienda. (El daño D0, es decir, "no daño" no se representa porque puede inducir a confusión).

En estos mapas, el color asignado a cada municipio corresponde a un cierto rango de

porcentaje de viviendas dañadas, según el grado de daño representado en el mapa. En cada mapa el grado de daño y la clase de vivienda son fijos, varían únicamente los porcentajes.

Puede observarse, por ejemplo, que los mayores porcentajes de viviendas dañadas (del 61% al 100 %) se dan en ciertas zonas, que aparecen en rojo. Y no hay muchas zonas de este tipo con daño reparable, la mayoría han experimentado daño irreparable.

### BASE DE DATOS DE DAÑOS CLASIFICADOS POR SISTEMAS ESTRUCTURALES

A continuación se especifica el proceso de generación de la base de datos de daño configurada tras los terremotos de enero y febrero, indicando particularmente cómo se ha asignado la clase de vulnerabilidad y grado de daño a cada estructura analizada.

Después del terremoto del 13 de enero de 2001, se estableció el Comité de Evaluación de Daños, formado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), la Federación Salvadoreña de Asociaciones de Ingenieros, Arquitectos y Ramas Afines (FESIARA) y la Asociación Salvadoreña de Empresas de Seguros (ASES), quienes convocaron a sus miembros para que de manera "ad-honorem" evaluaran los daños en las estructuras. A partir del terremoto del 13 de febrero de 2001 se aceptaron evaluaciones contratadas particularmente.

La evaluación de las distintas estructuras se hizo con base a cuestionarios prefijados, que experimentaron algunos cambios durante el período de evaluación, hasta obtener un modelo idóneo para la asignación de vulnerabilidad y grado de daño a cada estructura objeto del cuestionario. El modelo final incluía información general (número del informe, fecha y nombre de los evaluadores), identificación del edificio, descripción del edificio, observaciones de la inspección, conclusiones, recomendaciones, y comentarios; así como un dictamen sobre la habitabilidad del edificio y los materiales de construcción. Se evaluaron un total de cuatro mil 541 estructuras en un período de 60 días, y ésta fue la muestra de observaciones con la que se conformó la base de datos objeto de este estudio.

En la propuesta de evaluación se estableció dar prioridad y ponderar de manera urgente a las edificaciones de salud, educación, oficinas públicas e instalaciones deportivas; es decir instalaciones que en su uso normal son frecuentadas por un número significativo de personas. Por ello, la mayor



parte de instalaciones evaluadas está contemplada en los usos II y III, según la clasificación del International Building Code 2000 (ICC, 2000), detallada en la tabla 4.6.

El proceso de evaluación se realizó en cuatro etapas:

1.Recepción y ordenamiento de las solicitudes de evaluación, estableciendo prioridad en los criterios prefijados de evaluación

2.Registro de los profesionales voluntarios, atendiendo a sus capacidades técnicas para establecer Grupos de Evaluación. Estos se conformaron como mínimo por dos colectivos profesionales: arquitectos o ingenieros. Su misión era realizar las evaluaciones y presentarlas al Comité de Evaluación de Daños para su validación

3.Recepción de las evaluaciones e introducción de la información significativa en una base de datos, con la posterior interpretación y preparación de los dictámenes que serían entregados para su validación.

4.Validación de las declaratorias oficiales de daños proporcionadas por parte del Comité de Evaluación de Daños.

A partir del segundo terremoto se aceptaron evaluaciones contratadas particularmente por los propietarios de las edificaciones y se modificó la tercera y cuarta etapa, delegando el registro y validación en un funcionario del Vice-Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (VMVDU).

Los cuestionarios utilizados contenían la siguiente información:

1.Identificación del informe: número correlativo según el orden de evaluación, fecha del evento, fecha de inspección y hora.

2.Identificación del inmueble: nombre del inmueble, uso, dirección, municipio, dueño o responsable, año de construcción y número de teléfono.

3.Descripción: número de módulos, área construida estimada, forma de la estructura en elevación, número de pisos, sistema estructural del techo, material de cubierta, forma de la planta, calidad de la construcción, evidencia de reparaciones, estado del inmueble.

4.Evaluación del exterior: daños totales en el edificio, daños geotécnicos, daños estructurales, daños no estructurales, daños en instalaciones exteriores (daños en postes, drenajes o tapiales, entre otros.)

5.Evaluación del interior: daños estructurales, daños no estructurales, daños en instalaciones interiores (agua potable e instalación eléctrica.)

6.Evaluación de los daños totales: consistía en una ponderación cualitativa del nivel de daño, destacando daño inexistente, pequeño, moderado, grave, severo o total, tanto en el exterior como en el interior de la edificación. Estimación de los costos de reparación o reconstrucción.

7.Juicio final sobre el uso o no del inmueble: se evaluaba a través de una matriz, disponiendo en las filas la evaluación del interior y en las columnas la evaluación del exterior de la edificación. Con este juicio se daba una calificación final de habitabilidad, asignando calificativos como utilizable o habitable, utilizable o habitable con precaución, entrada parcialmente prohibida, o entrada prohibida.

8.Calificación final de la estructura principal: consistía en establecer una bandera cuyo color indicaba el nivel de daño en la estructura principal, pudiendo asignarse bandera verde, amarilla, anaranjada o roja. El orden de colores indicado era consistente con el nivel de daño, variando desde no daño a elementos estructurales, representado por bandera verde, hasta colapso o ruina parcial o total, representado por bandera roja. La asociación de daños detallada para cada bandera se especifica en el siguiente apartado.

## ASIGNACIÓN DE CLASES DE VULNERABILIDAD Y GRADOS DE DAÑO

Para la asignación de la clase de vulnerabilidad se utilizó como base la

Tabla 4.5c

Porcentajes de daño por municipios, originados por los dos sismos (13 de enero y 13 de febrero) en las clases rural y urbana ( Continuación )

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	URBANO			RURAL		
		D2(%)	D1 (%)	D0 (%)	D2(%)	D1 (%)	D0 (%)
LA PAZ	CUYULTITÁN	22.95	21.46	55.60	28.86	12.17	58.97
LA PAZ	EL ROSARIO	35.55	32.14	32.31	32.14	31.13	36.73
LA PAZ	JERUSALÉN	41.14	29.75	29.11	58.31	25.31	16.38
LA PAZ	MERCEDES LA CEIBA	80.00	20.00	0.00	30.77	6.41	62.82
LA PAZ	OLOCUILTA	24.11	15.57	60.32	24.93	13.22	61.85
LA PAZ	PARAISO DE OSORIO	40.23	14.17	45.60	55.48	9.03	35.48
LA PAZ	SAN ANTONIO MASAHUAT	35.08	28.23	36.69	68.33	6.88	24.78
LA PAZ	SAN EMIGDIO	40.87	13.93	45.21	39.55	28.36	32.09
LA PAZ	SAN FRANCISCO CHINAMECA	44.41	29.83	25.76	39.71	22.51	37.78
LA PAZ	SAN JUAN NONUALCO	20.87	39.03	40.10	19.86	49.48	30.66
LA PAZ	SAN JUAN TALPA	44.13	16.96	38.91	41.81	16.89	41.30
LA PAZ	SAN JUAN TEPEZONTES	27.88	25.45	46.67	38.63	36.02	25.36
LA PAZ	SAN LUIS	17.55	20.46	61.99	39.10	23.81	37.09
LA PAZ	SAN LUIS LA HERRADURA	21.06	60.32	18.62	27.20	46.01	26.80
LA PAZ	SAN MIGUEL TEPEZONTES	41.28	22.96	35.76	52.91	24.10	22.99
LA PAZ	SAN PEDRO MASAHUAT	53.97	19.19	26.84	47.90	23.38	28.73
LA PAZ	SAN PEDRO NONUALCO	58.80	16.65	24.55	82.47	5.18	12.35
LA PAZ	SAN RAFAEL OBRAJUELO	34.03	38.67	27.29	52.59	31.53	15.88
LA PAZ	SANTA MARIA OSTUMA	69.50	8.71	21.79	62.58	7.30	30.12
LA PAZ	SANTIAGO NONUALCO	37.75	35.67	26.58	51.33	27.19	21.47
LA PAZ	TAPALHUACA	48.61	26.67	24.72	49.47	19.18	31.35
CABAÑAS	GUACOTECTI	0.00	1.52	98.48	0.00	0.00	100.00
CABAÑAS	ILOBASCO	9.16	30.63	60.20	0.95	0.88	98.17
CABAÑAS	TEJUTEPEQUE	39.70	60.30	0.00	0.14	0.41	99.46
SAN VICENTE	SAN VICENTE	36.04	23.08	40.87	1.02	2.10	96.88
SAN VICENTE	APASTEPEQUE	21.86	28.02	50.12	45.46	33.42	21.12
SAN VICENTE	GUADALUPE	66.01	10.37	23.63	62.89	19.07	18.04
SAN VICENTE	SAN CAYETANO ISTEPEQUE	90.06	9.94	0.00	82.88	8.56	8.56
SAN VICENTE	SAN ESTEBAN CATARINA	53.38	11.37	35.26	21.95	15.53	62.53
SAN VICENTE	SAN ILDEFONSO	7.44	9.30	83.26	31.22	38.05	30.73
SAN VICENTE	SAN LORENZO	63.02	25.65	11.33	58.70	7.02	34.28
SAN VICENTE	SAN SEBASTIAN	38.79	30.36	30.85	39.35	15.30	45.35
SAN VICENTE	SANTA CLARA	12.86	36.19	50.95	24.14	25.74	50.12
SAN VICENTE	SANTO DOMINGO	14.32	8.45	77.23	37.48	1.30	61.22
SAN VICENTE	TECOLUCA	86.77	13.23	0.00	44.27	29.20	26.53
SAN VICENTE	TEPETITÁN	84.64	15.36	0.00	60.88	10.80	28.31
SAN VICENTE	VERAPAZ	85.55	13.96	0.49	88.64	8.84	2.51
USULUTAN	USULUTÁN	17.38	16.82	65.80	33.49	18.07	48.43
USULUTAN	ALEGRIA	15.03	34.31	50.65	53.94	32.11	13.95
USULUTAN	BERLÍN	28.00	32.34	39.66	67.58	18.06	14.37
USULUTAN	CALIFORNIA	50.99	25.27	23.74	58.62	14.78	26.60
USULUTAN	CONCEPCIÓN BATRES	33.47	14.78	51.75	29.24	18.94	51.82
USULUTAN	EL TRIUNFO	34.99	18.54	46.47	31.84	20.65	47.50
USULUTAN	EREGUAYQUÍN	30.43	23.67	45.90	42.03	16.37	41.60
USULUTAN	ESTANZUELAS	14.37	18.47	67.16	45.46	28.68	25.86



**Tabla 4.5d**

**Porcentajes de daño por municipios, originados por los dos sismos (13 de enero y 13 de febrero) en las clases rural y urbana (Continuación)**

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	URBANO			RURAL		
		D2(%)	D1(%)	D0(%)	D2(%)	D1(%)	D0(%)
USULUTAN	JIQUILISCO	35.01	19.06	45.92	44.46	14.39	41.15
USULUTAN	JUCUAPA	26.10	19.29	54.61	72.16	13.12	14.72
USULUTAN	JUCUARÁN	2.70	18.11	79.19	15.35	19.37	65.28
USULUTAN	MERCEDES UMAÑA	51.91	18.43	29.66	59.17	12.48	28.35
USULUTAN	NUEVA GRANADA	26.17	29.31	44.52	47.07	13.47	39.45
USULUTAN	OZATLÁN	63.95	25.31	10.74	74.03	9.86	16.11
USULUTAN	PUERTO EL TRIUNFO	14.34	24.91	60.75	31.73	15.33	52.94
USULUTAN	SAN AGUSTÍN	88.99	5.88	5.12	78.86	15.89	5.25
USULUTAN	SAN BUENAVENTURA	14.48	17.37	68.15	29.62	28.47	41.91
USULUTAN	SAN DIONISIO	4.24	6.73	89.03	10.52	32.49	56.99
USULUTAN	SAN FRANCISCO JAVIER	83.99	13.40	2.61	82.54	15.38	2.07
USULUTAN	SANTA ELENA	52.79	14.59	32.62	66.14	14.64	19.22
USULUTAN	SANTA MARÍA	43.86	15.40	40.73	20.52	18.91	60.57
USULUTAN	SANTIAGO DE MARÍA	36.76	31.21	32.03	55.54	30.05	14.41
USULUTAN	TECAPÁN	50.85	35.04	14.10	55.82	24.82	19.35
SAN MIGUEL	SAN MIGUEL	0.86	5.39	93.75	6.44	8.19	85.36
SAN MIGUEL	CIUDAD BARRIOS	1.22	6.46	92.32	0.87	3.21	95.92
SAN MIGUEL	COMACARÁN	0.00	0.00	100.00	0.00	0.26	99.74
SAN MIGUEL	CHAPELTIQUE	0.00	0.00	100.00	0.06	0.06	99.89
SAN MIGUEL	CHINAMECA	23.58	24.42	51.99	32.25	20.13	47.61
SAN MIGUEL	CHIRILAGUA	41.38	14.92	43.70	27.27	14.38	58.35
SAN MIGUEL	EL TRANSITO	10.35	0.84	88.81	26.07	0.00	73.93
SAN MIGUEL	LOLOTIQUE	15.20	2.24	82.56	0.28	0.04	99.68
SAN MIGUEL	MONCAGUA	0.00	0.00	100.00	0.55	0.21	99.23
SAN MIGUEL	NUEVA GUADALUPE	19.59	14.27	66.15	15.64	25.45	58.91
SAN MIGUEL	NUEVO EDEN DE SAN JUÁN	34.38	45.31	20.31	8.21	1.68	90.11
SAN MIGUEL	SAN JORGE	1.33	0.71	97.96	4.37	1.04	94.59
SAN MIGUEL	SAN RAFAEL	24.94	15.63	59.43	28.81	9.28	61.91
SAN MIGUEL	ULUAZAPA	0.00	0.00	100.00	5.56	1.01	93.43
MORAZAN	EL DIVISADERO	0.00	0.85	99.15	0.00	0.00	100.00
MORAZAN	GUALOCOCTI	0.00	0.00	100.00	2.08	1.66	96.26
MORAZAN	JOATECA	12.12	27.88	60.00	0.00	0.00	100.00
LA UNION	LA UNIÓN	0.00	0.00	100.00	0.32	0.10	99.58
LA UNION	CONCHAGUA	0.00	0.00	100.00	0.23	0.29	99.48
LA UNION	EL CARMEN	5.89	11.98	82.12	14.23	28.49	57.28
LA UNION	SAN ALEJO	2.71	9.54	87.74	6.58	17.41	76.01
LA UNION	YAYANTIQUE	1.23	0.31	98.47	0.32	1.27	98.41

Escala Macrosísmica Europea 1998 (EMS-98), aunque ésta fue adaptada para considerar todos los tipos de sistemas estructurales utilizados en el país. En esta adaptación local se distinguieron subclases de vulnerabilidad, cuya asociación con el sistema estructural, es indicada en la tabla 4. 7

El grado de daño fue asignado a partir de la bandera que representa la calificación final de la estructura. El significado de cada bandera se presenta a continuación, mostrando entre paréntesis el grado de daño equivalente al fijado en la escala EMS-98.

**BANDERA VERDE (GRADO 1)**

Sin daños visibles en elementos estructurales. Posibles fisuras en repellos de paredes, losas y en elementos estructurales. Pocos daños a la construcción. No presenta reducción en su capacidad sismorresistente.

**BANDERA AMARRILLA (GRADO 2)**

Fisuras diagonales y de otro tipo en paredes. Fisuras grandes en elementos estructurales. Disminución de su capacidad sismorresistente. Puede repararse sin necesidad de refuerzo.

**BANDERA ANARANJADA (GRADO 3)**

Grietas grandes con trituración del material de las paredes. Grietas grandes con pequeñas dislocaciones en elementos estructurales. Fracturas. Disminución de resistencias y rigideces de los elementos. Muy disminuida su capacidad sismorresistente. Necesitan ser reparadas y reforzadas.

**BANDERA ROJA (GRADO 4 Y 5)**

Elementos estructurales y uniones muy dañados, dislocados y repetitivos. Colapsos, ruina parcial o total. Posible demolición después de una evaluación más detallada.

**PROCESAMIENTO Y DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Los cuatro mil 541 cuestionarios iniciales se procesaron para conformar una base de datos en la plataforma Access de Microsoft. Además, se elaboró una georeferencia de los lugares donde se hicieron las

evaluaciones; cuando se obtuvo la información completa sobre los mismos; en ella se introdujo el correspondiente campo de coordenadas.

Después de configurar la base de datos con todos los cuestionarios procesados, se continuó con la depuración de los mismos; la razón, porque la información no era completa en toda la muestra fue por carecer de algunos datos significativos.

Se procesó un total de cuatro mil 39 expedientes con información completa para realizar el análisis; en todos se asignó el tipo de sistema estructural y se detalló la vulnerabilidad y que bandera se le asignó después de los terremotos.

La asignación del sistema estructural se hizo con base a la descripción del mismo, así como al material de construcción utilizado. Es de destacar que el adobe y el bahareque, más que sistemas estructurales, en la mayor parte de los casos no se disponía de suficiente información para definirlo. Por ejemplo en el caso del adobe, si se trataba de mampostería con refuerzo integral, sin refuerzo o confinada; con esta limitación, en estos casos el propio material es representativo de la tipología estructural

Como se muestra en la tabla 4.8 no fue posible asignar una clase de vulnerabilidad a todos los cuestionarios, debido a que en algunos no se había asignado sistema estructural o bien la clasificación dada no correspondía a ninguno de los tipos especificados, como es el caso de la malla ciclón, malla estructural, madera, concreto y lámina, entre otros. Con esta información se llegó a depurar la base de datos inicial y, se redujo a cuatro mil 115 el número de cuestionarios con vulnerabilidad asignada (90.6% del total).

También se hizo una depuración de la base de datos atendiendo a la especificación del grado de daño, se encontraron cuatro mil 448 cuestionarios que disponían de este dato (98% del total). La información desglosada sobre el número de estructuras para cada grado de daño, reflejado por el correspondiente color de la bandera asociada, se muestra en la tabla 4.9.

La relación del grado de daño de cada sistema estructural con la clase de vulnerabilidad se muestra en la figura 4.14. En la gráfica se presentan los distintos sistemas estructurales ordenados de izquierda a derecha, de menor a mayor vulnerabilidad. Puede observarse que el adobe y bahareque (A1 y A2, respectivamente), muestran un mayor porcentaje de banderas rojas (colapsos, ruina parcial o total), con respecto a la mampostería con refuerzo integral, marcos de concreto reforzado y marcos de acero (D1, D2 y D3).



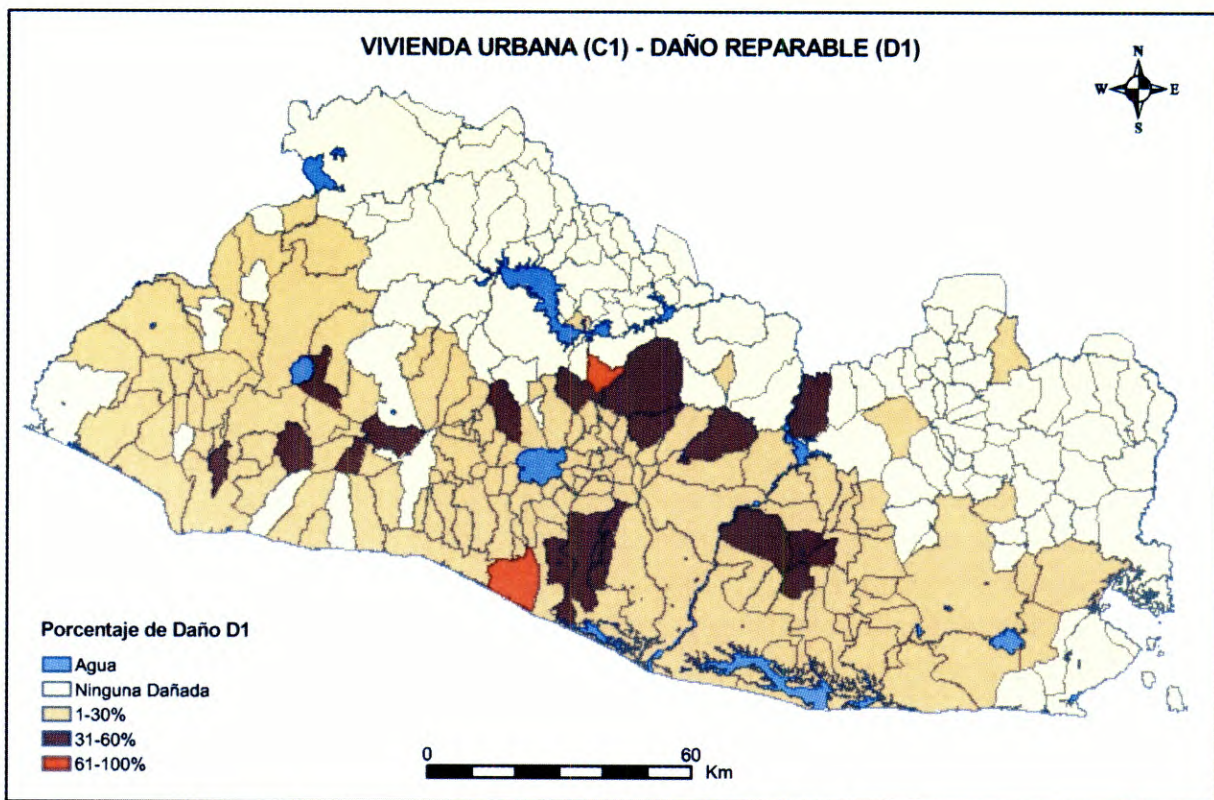


Figura 4.9 Mapa de porcentajes de viviendas urbanas (C1) que experimentan daño reparable (D1)

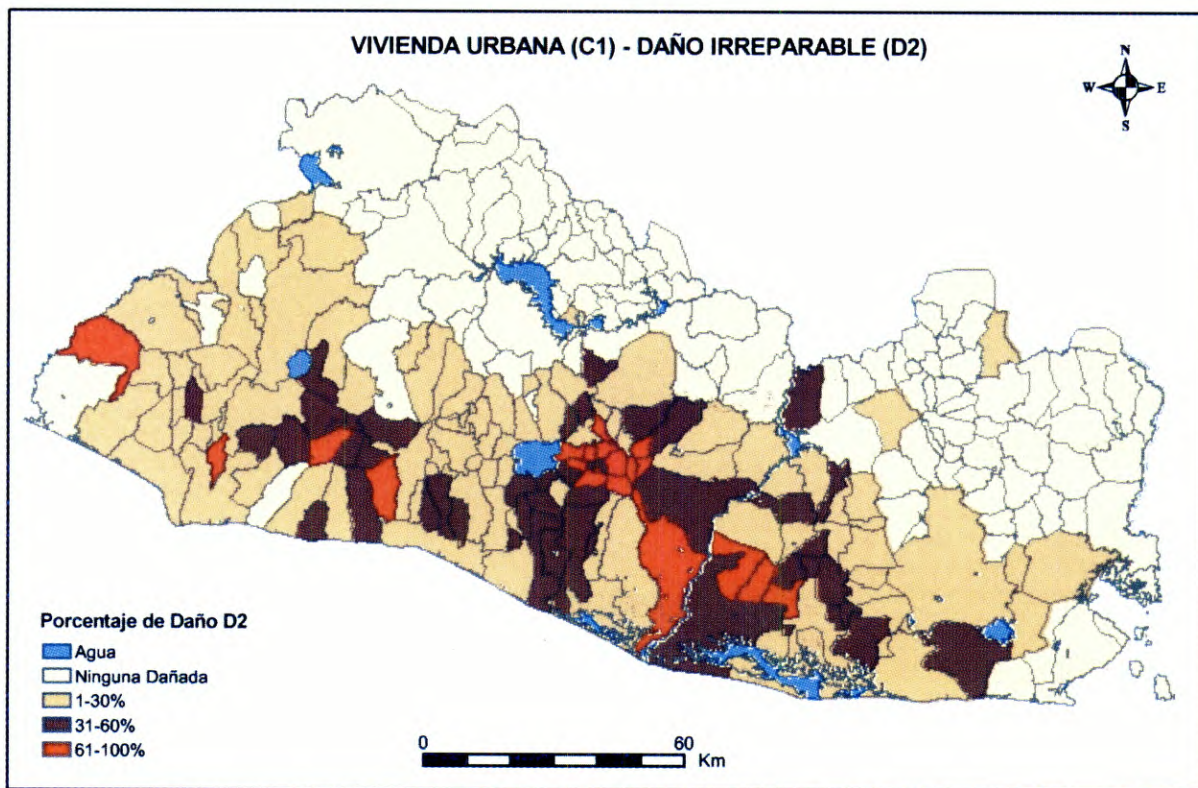


Figura 4.10 Mapa de porcentajes de viviendas urbanas (C1) que experimentan daño irreparable (D2)



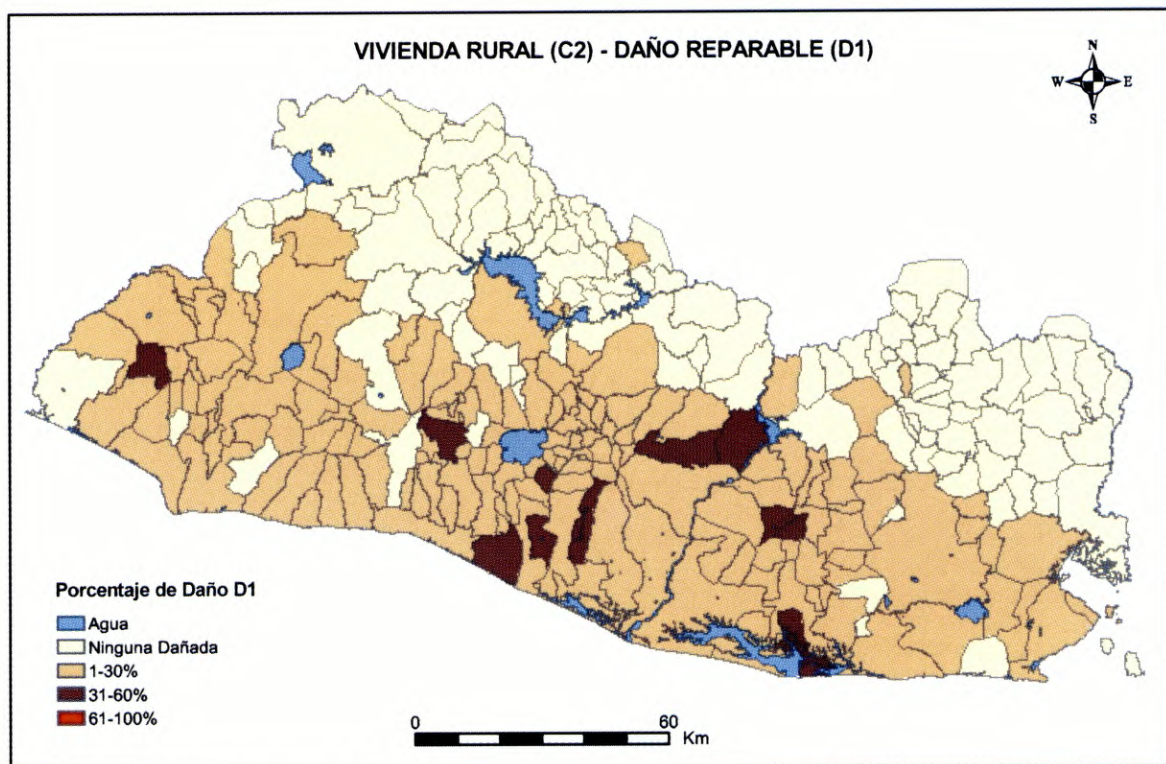


Figura 4.11 Mapa de porcentajes de viviendas rurales (C2) que experimentan daño reparable (D1)

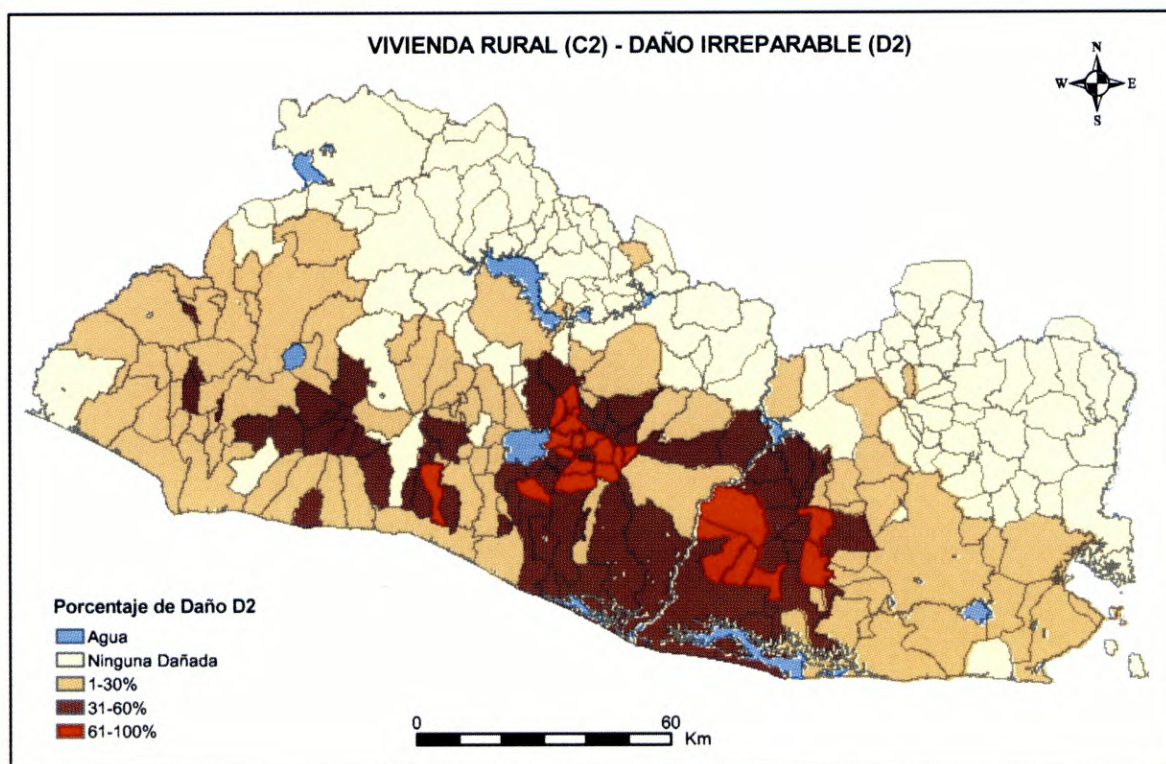


Figura 4. 12. Mapa de porcentajes de viviendas rurales (C2) que experimentan daño irreparable (D2)



**Tabla 4.6**

**Clasificación de las estructuras en función de su uso, destacando el número de evaluaciones realizadas en cada clase**

USO*	DESCRIPCIÓN	TOTAL
I	Edificios y otras estructuras, excepto las listadas en las categorías II, III y IV. Viviendas, comercios, empresas y oficinas pequeñas.	745
II	Edificios y otras estructuras que al presentarse la falla durante el evento representan una amenaza sustancial a la vida humana, pero no limitadas a: Estructuras donde más de 300 personas se reúnan en un área. Escuelas, colegios, universidades. Puestos de salud. Estaciones generadoras de electricidad, tratamiento de agua potable y aguas residuales, no incluidas en la categoría III. Edificios y otras estructuras designadas como instalaciones esenciales, pero no limitadas a: Hospitales y otras instalaciones de salud con facilidades para tratamientos de emergencia o cirugía.	3634
III	Estaciones de policía, bomberos, cuarteles, etc. Estaciones de energía requeridas para la emergencia. Estructuras que contienen materiales altamente tóxicos. Aeropuertos. Plantas de bombeo.	145
IV	Edificios y otras estructuras, que al presentarse la falla durante el evento representan un baja amenaza a la vida humana.	17
	Total	4541

\* Adaptado de ICC ( 2000).

**Tabla 4.7**

**Definición de clases y sub-clases de vulnerabilidad para la estructura de base de datos descrita, adaptando la escala EMS-98 a los sistemas estructurales existentes en el país**

Sistema estructural	Vulnerabilidad	Sub-clase
Adobe	A	A1
Bahareque		A2
Mampostería s/R, mampostería de piedra, muro de mampostería de bloque, gaviones	B	B1
Mampostería confinada	C	C1
Mampostería c/ref. integral		D1
Marcos de concreto reforzado, muros de concreto y paredes de carga	D	D2
Estructuras de acero		D3



**Tabla 4.8**

**Sumario del número de estructuras disponibles en la base de datos de daños original, para cada clase de vulnerabilidad definida**

TIPO	Sistema estructural asignado por evaluadores	Vulnerabilidad	Nº estructuras
1	Adobe	A1	118
2	Bahareque	A2	77
3	Mampostería s/R, mampostería de piedra, muro de mampostería de bloque y gaviones	B1	101
4	Mampostería confinada	C1	81
5	Mampostería c/ref. integral	D1	781
6	Marcos de concreto reforzado, muros de concreto y paredes de carga	D2	2735
7	Marcos de acero	D3	222
8	Columnas de concreto y vigas de acero o madera, columnas o pilares de acero y vigas de concreto, estructuras combinadas.	No asignada	81
9	Prefabricados	No asignada	11
10	Madera y concreto, madera, lámina, ployé, fibrolit	No asignada	61
11	Marcos y paredes	No asignada	35
12	Tapiales	No asignada	4
13	Malla ciclón y malla estructural	No asignada	3
14	No se indica sistema estructural	No asignada	231
	<b>TOTAL</b>		<b>4541</b>

**Tabla 4.9**

**Sumario de los datos de daño y sistemas estructurales contenidos en la base de datos depurada, a partir de la base original**

TIPO	Sistema estructural asignado por evaluadores	Bandera Roja	Bandera Anaranjada	Bandera Amarilla	Bandera Verde	No Indica Bandera
1	Adobe	34	23	21	38	2
2	Bahareque	17	10	14	35	1
3	Mampostería s/R, mampostería de piedra, muro de mampostería de bloque y gaviones	3	3	17	75	3
4	Mampostería confinada	2	6	13	58	2
5	Mampostería c/ref. integral	33	81	165	485	17
6	Marcos de concreto reforzado, muros de concreto y paredes de carga	89	256	501	1843	46
7	Marcos de acero	3	22	32	160	5
8	Columnas de concreto y vigas de acero o madera, columnas o pilares de acero y vigas de concreto, estructuras combinadas.	6	9	17	46	3
9	Prefabricados	0	0	3	8	0
10	Madera y concreto, madera, lámina, ployé, fibrolit	14	10	10	26	1
11	Marcos y paredes	0	0	7	27	1
12	Tapiales	0	1	2	1	0
13	Malla ciclón y malla estructural	0	0	0	3	0
14	No se indica sistema estructural	20	16	29	154	12
	<b>TOTAL</b>	<b>221</b>	<b>437</b>	<b>831</b>	<b>2959</b>	<b>93</b>



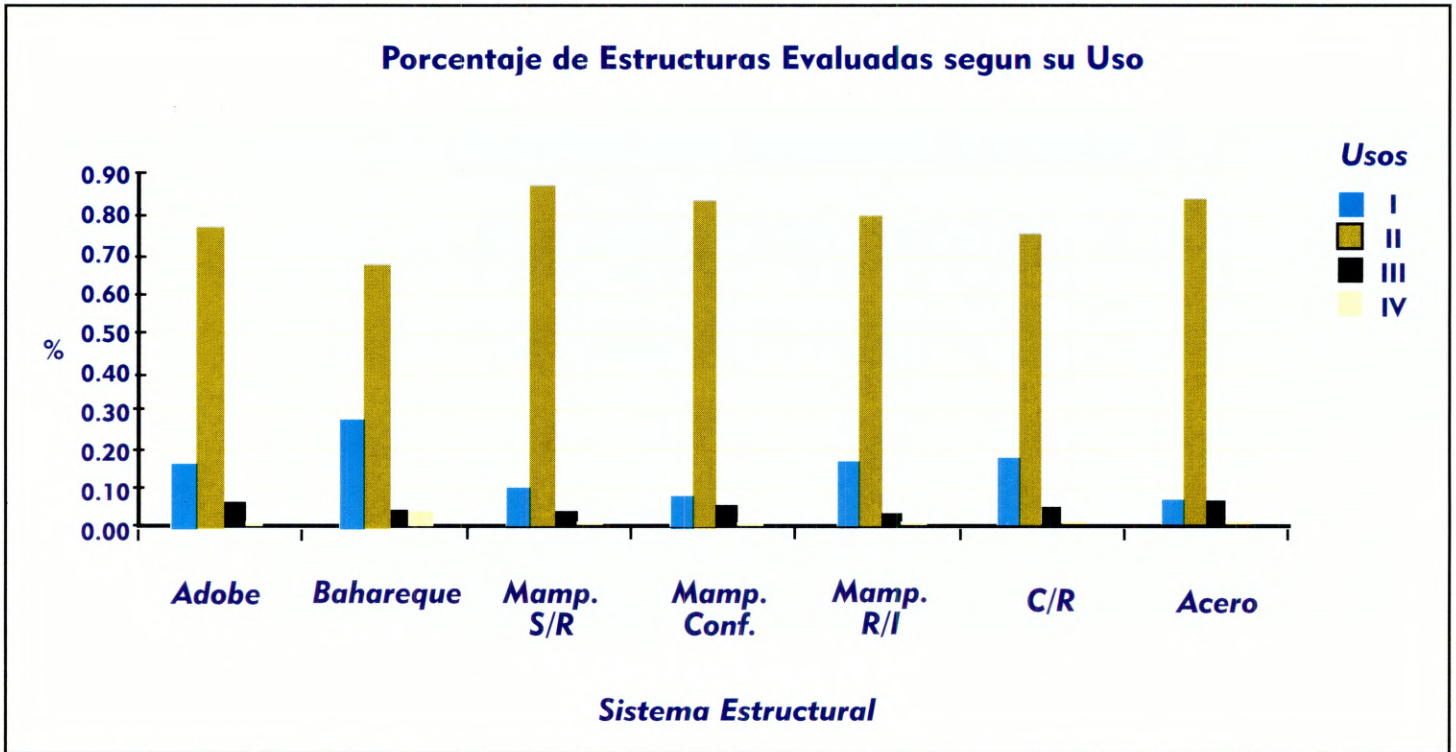


Figura 4.13. Porcentaje de estructuras analizadas para cada sistema estructural, en función de su uso (descrito en la tabla 4.1).

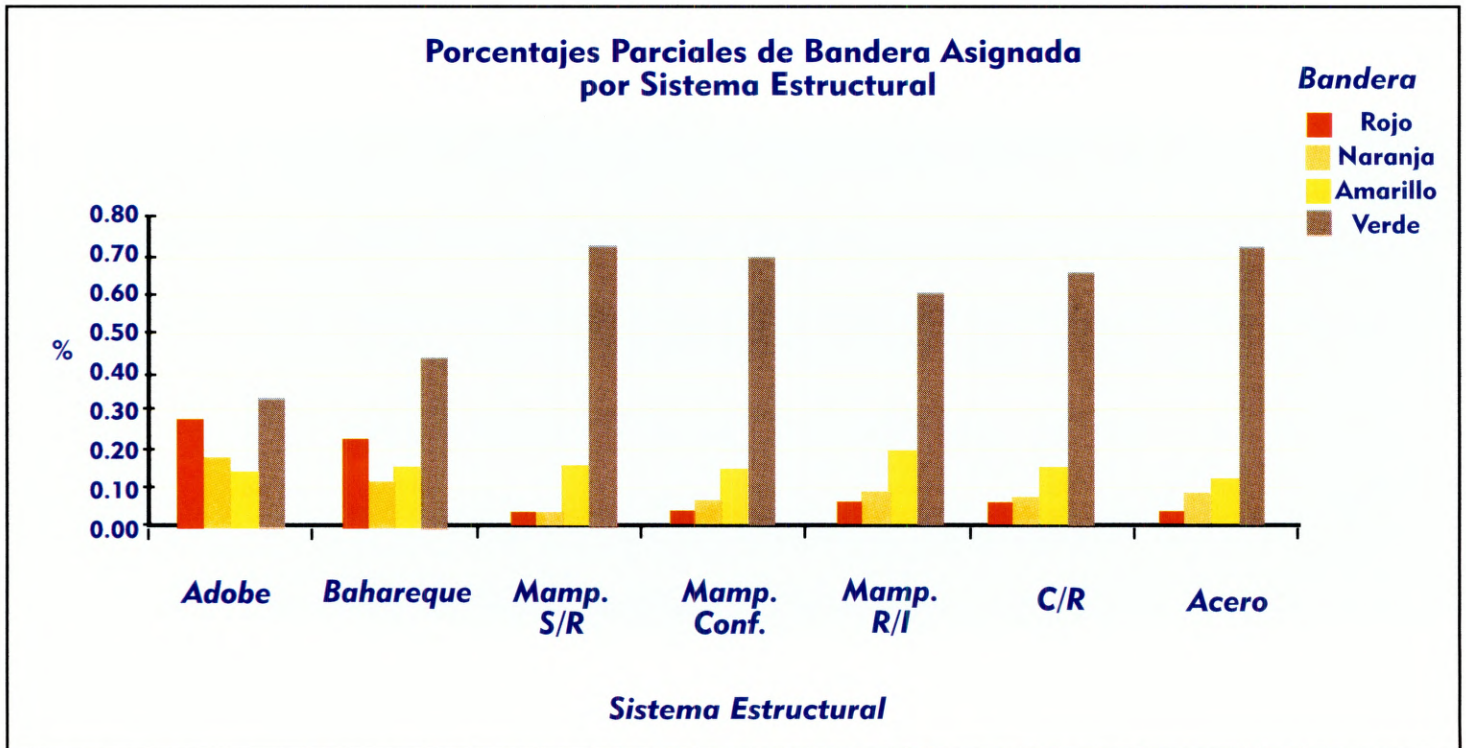


Figura 4.14. Gráfica de porcentajes de daño para cada sistema estructural (Los daños son representados por colores de la bandera)



A continuación se ha analizado el daño acumulado, en términos de porcentaje, para cada sistema estructural. Por una parte, se analiza la relación entre porcentaje de estructuras que no experimentaron daño estructural (bandera verde) con las que sí experimentan este tipo de daños (banderas amarilla, anaranjada y roja), diferenciando cada sistema estructural.

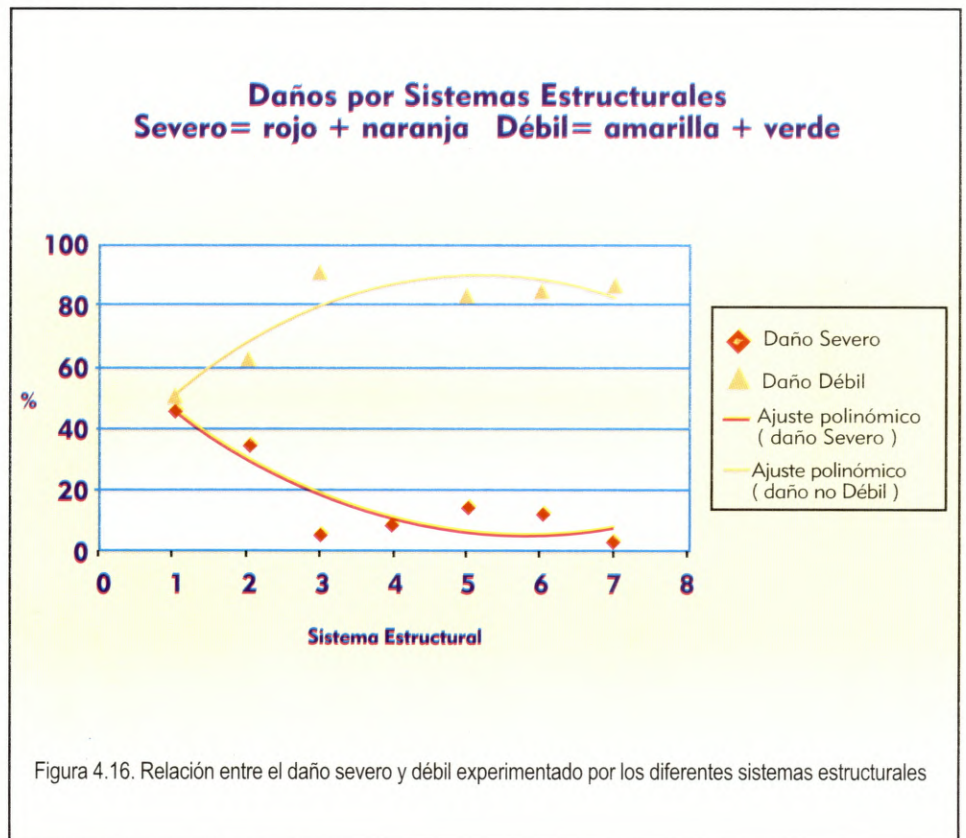
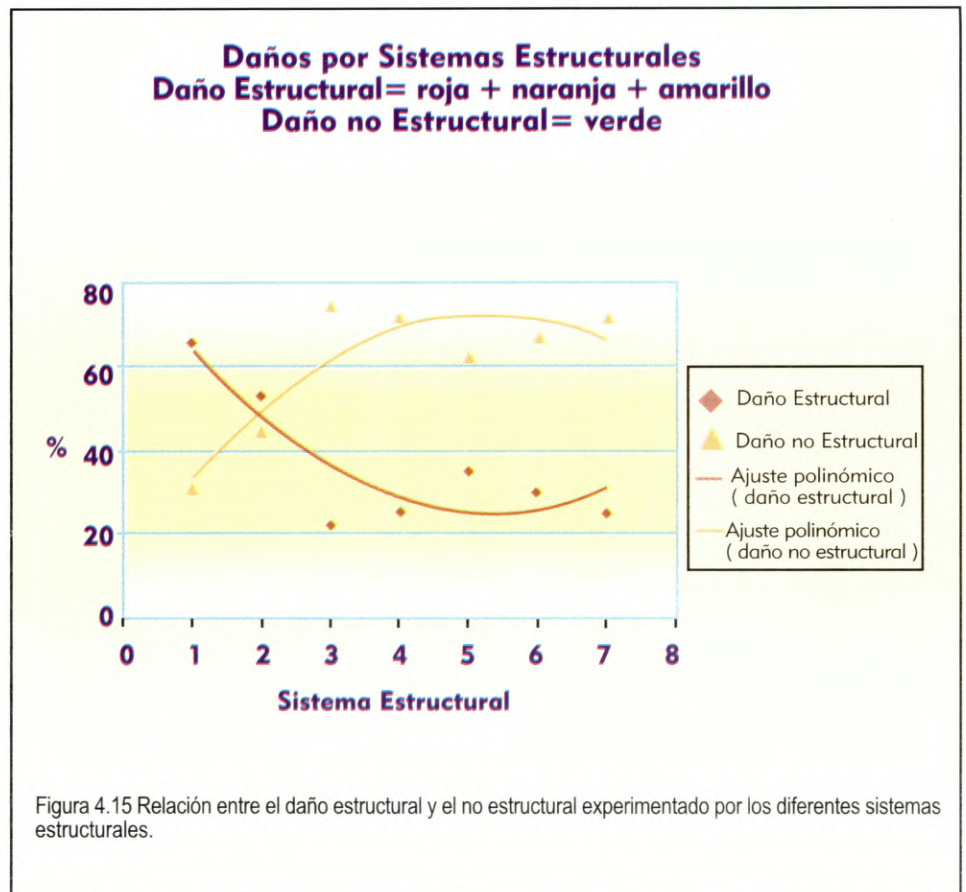
La grafica de la figura 4.15 muestra la tendencia encontrada. En ella se puede observar que el adobe (1) es el sistema con mayor daño estructural y que en los sistemas a los que se asignó vulnerabilidad C y D, el daño estructural es mucho menor.

Otro análisis en la línea del anterior se ha realizado diferenciando daño severo y daño débil, agrupando en el primero las banderas roja y anaranjada, y en el segundo las banderas amarilla y verde. El resultado se muestra en la figura 4.16. Puede observarse que el adobe presenta prácticamente el mismo porcentaje de ambos tipos de daños, mientras que el bahareque tiene mayor porcentaje de daño débil que de daño severo. En los demás sistemas estructurales, que son menos vulnerables, es considerable la diferencia entre daño débil y severo.

Como la información de la base de datos fue georreferenciada, se han generado mapas donde se representa la distribución de daños para cada tipo de vulnerabilidad. Estos mapas deben ser interpretados con cautela, ya que la base de datos de partida no es representativa de la población total de edificaciones en el país. Esto impide inferir conclusiones en cuanto a porcentaje absoluto de daños para cada sistema estructural; sin embargo, es posible hacer un análisis cualitativo, para establecer diferencias de comportamiento en las diferentes clases de vulnerabilidad y en la variabilidad geográfica del daño.

En el mapa de la figura 4.17, se representan las banderas asignadas a los sistemas con vulnerabilidad A, tras el terremoto del 13 de enero. Puede observarse que, a pesar de que el evento fue de subducción, el daño severo (banderas rojas y anaranjadas) se reportó hasta en departamentos alejados de la fuente, como Chalatenango y Santa Ana.

La alta vulnerabilidad de estos sistemas constructivos, que está determinada por la forma artesanal con que se desarrollaba su construcción y el escaso mantenimiento de las estructuras. Por otra parte, puede notarse también, según los datos obtenidos, que el adobe muestra mayor vulnerabilidad que el bahareque, pues en construcciones de este material se presentaron colapso, ruina parcial o total en zonas más alejadas de la fuente; a diferencia del bahareque.





## Terremoto del 13 de enero de 2001. Vulnerabilidad A A1: adobe, A2: bahareque

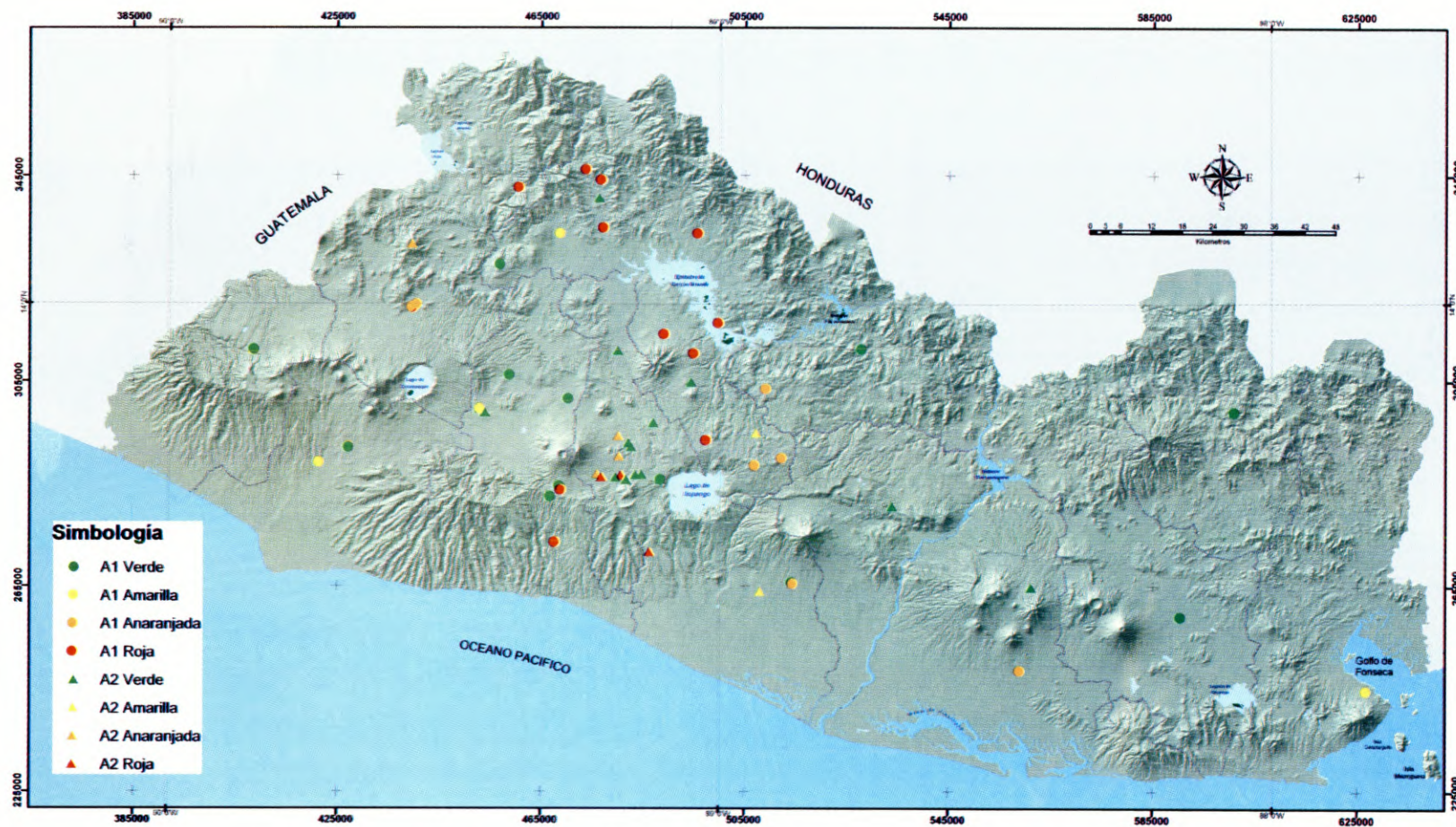


Figura 4.17 Daño asignado a los sistemas estructurales clasificados con vulnerabilidad A, afectados por el terremoto del 13 de enero de 2001.



## Terremoto del 13 de enero de 2001. Vulnerabilidad D

**D1: Mampostería con refuerzo integral, D2: Marcos y paredes estructurales de concreto reforzado, D3: Marcos de acero**

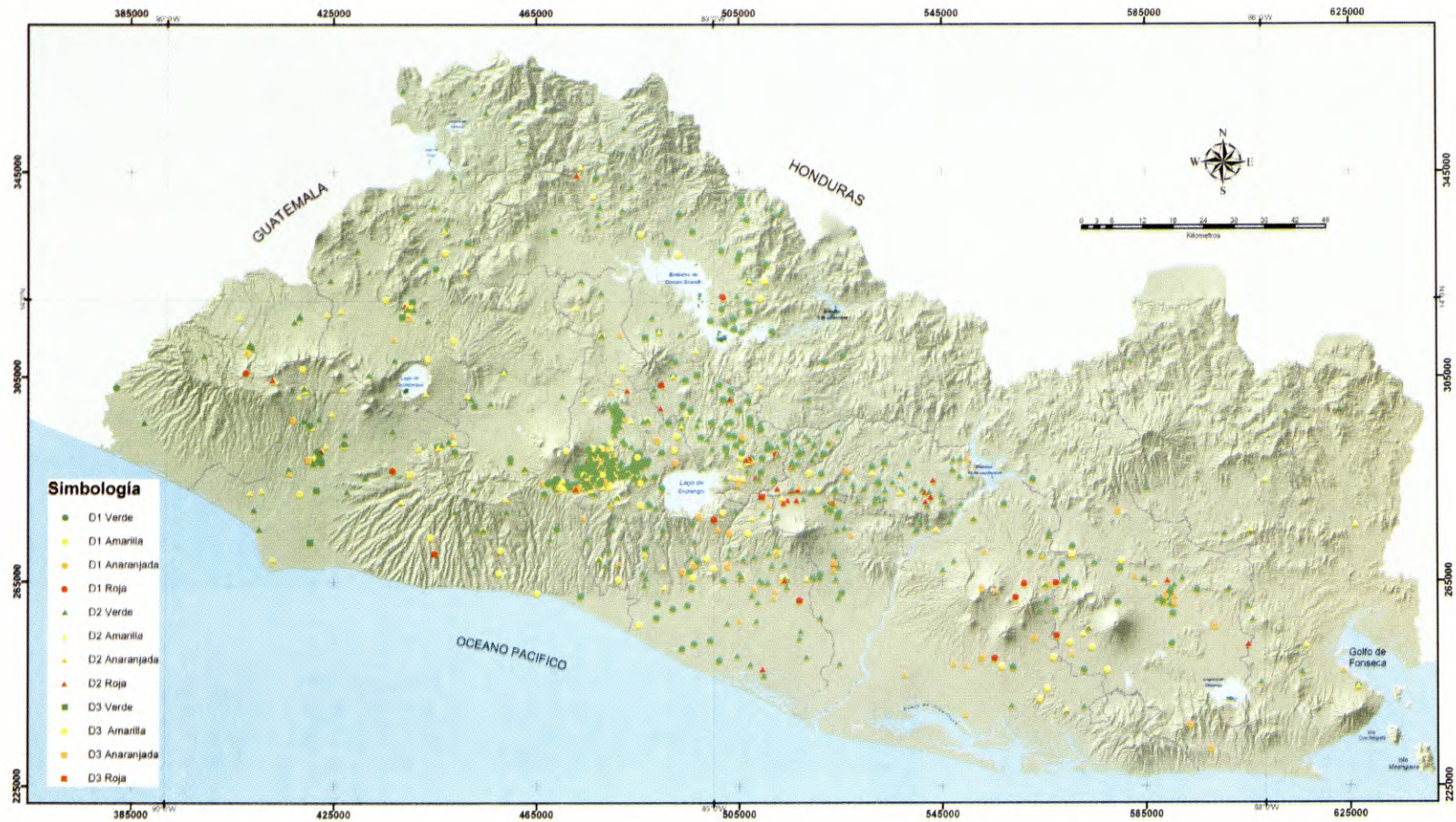


Figura 4.18 Daño asignado a los sistemas estructurales clasificados con vulnerabilidad D, afectados por el terremoto del 13 de enero de 2001



Para el mismo evento anterior, si se analiza la información para los sistemas estructurales con vulnerabilidad D, se observa esencialmente daño severo en la zona central y sur del país.

La Norma de Diseño por Sismo del Reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO), presenta el país dividido en dos zonas sísmicas: zona I con un factor de zonificación de 0.40 y zona II con un factor de 0.30, los que se utilizan directamente en la determinación del coeficiente sísmico.

Si se superponen las figuras 4.18 y 4.19 puede notarse que el mayor porcentaje de daño severo se encuentra efectivamente en la zona I, que ha sido la más afectada a lo largo de la historia, tanto por sismos de la cadena volcánica como por los de subducción. Esto corrobora la idoneidad de la zonificación realizada en 1993, por el RESESCO.

## RECOMENDACIONES PARA FUTURAS CAMPAÑAS DE DAÑO

El trabajo realizado por el Comité Evaluador de Daños, fue de gran utilidad para estudiar el impacto producido por los terremotos de enero y febrero de 2001, principalmente en las edificaciones que en su uso normal son frecuentadas por un número significativo de personas. Las evaluaciones contaban con suficientes elementos para estimar el nivel de daño y la habitabilidad de las edificaciones, pero dada la poca previsión para responder ante este tipo de eventos, no se contó con personal suficiente para abarcar todas las estructuras dañadas.

La información obtenida sobre los daños materiales por sismos no fue en todos los casos clara y precisa. Además, la muestra de observaciones tampoco fue completa, pues no se reportaron daños en todas las edificaciones de cada municipio o población y en la mayoría de casos tampoco fue significativa estadísticamente.

Por otra parte no se incluyó una cuantificación de las viviendas no dañadas, necesaria para evaluaciones en términos de porcentaje, y en muchos casos tampoco se reportó información de edificaciones completamente destruidas, dado que la evaluación se hizo con criterios de habitabilidad.

Con estas limitantes de información no se pudo realizar el análisis estadístico necesario para estudiar la relación del movimiento con los daños; dirigida hacia planes de

mitigación del riesgo sísmico. Un objetivo claro para futuras campañas de daño es superar esta limitación, lo que supone una primera lección aprendida del estudio realizado.

De lo anterior se propone incluir ciertos cambios en la logística de evaluación, en la documentación de una norma de estimación de peligros y daños, en los cuestionarios y otras metodologías, con el objeto de responder de una manera más amplia y eficiente a las necesidades de evaluación post-terremotos.

Asimismo, se plantea recolectar información de campo en zonas específicas dañadas por el sismo, con el objetivo de realizar estudios de vulnerabilidad de las distintas estructuras y poder incluir los resultados en las revisiones de las normativas existentes en el país, de tal forma que se pueda capitalizar la experiencia para responder ante nuevos desastres.

Las recomendaciones que a continuación se proponen están enfocadas a tres sectores: gubernamental, gremial y universitario.

## RECOMENDACIONES PARA EL SECTOR GUBERNAMENTAL:

Revisar la conformación y las atribuciones

de la Comisión Técnica de Seguridad Estructural creada en 1996, con el objetivo de apoyar al sector gubernamental en la evaluación de daños, actualización del Reglamento y Normas Técnicas, entre otros. En este sentido, deben tomarse previsiones para dotar a las instituciones gubernamentales de los medios que permitan desarrollar adecuadamente su trabajo.

Asignar a la Comisión Técnica de Seguridad Estructural la realización de un plan de respuesta ante catástrofes, ésta debe incluir la elaboración de un Plan de Evaluación de Daños ante terremotos, con su respectiva norma para valorar la habitabilidad del inmueble y el nivel de daño.

Esta norma deberá contener la información necesaria y suficiente para realizar la evaluación en dos niveles de actuación: el primero dirigido a facilitar la estimación de la habitabilidad de la estructura, mientras el segundo debe dirigirse a determinar el nivel de daño, con el que se puede realizar los estudios de vulnerabilidad.

El plan deberá considerar la parte legal sobre permisos de acceso, permisos de reparación, obligatoriedad de las demoliciones; así como la estrategia de divulgación y capacitación para usar la norma.

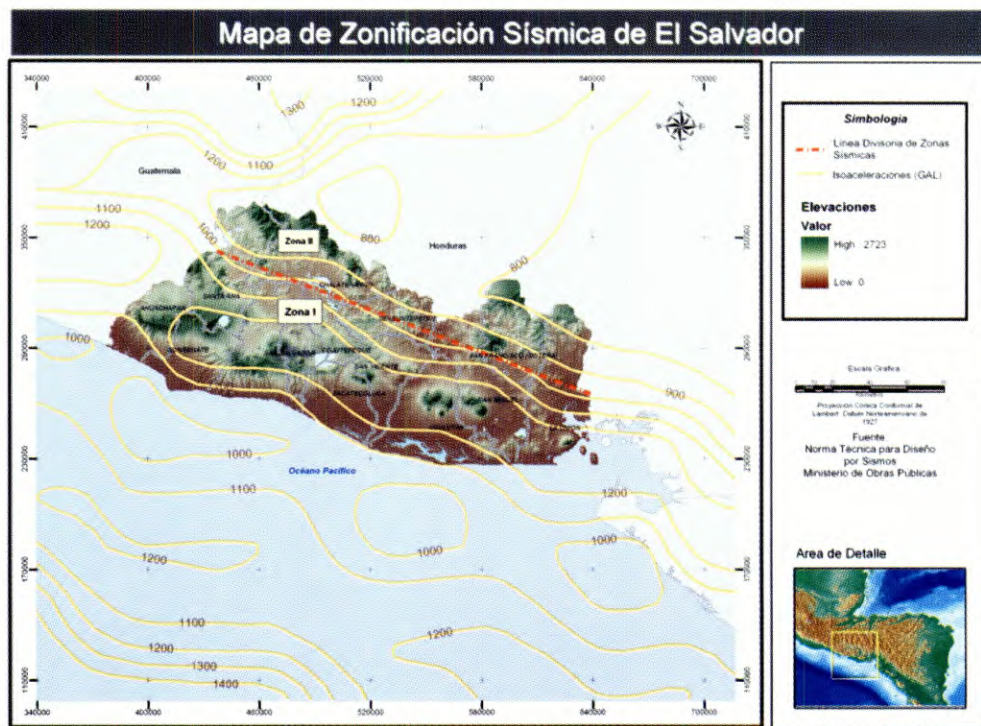


Figura 4.19 Mapa de zonificación sísmica de El Salvador. Norma de Diseño por Sismo del Reglamento para la Seguridad de las Construcciones, p.17.



Dicho plan puede considerar las siguientes partes:

a. Estimación de la habitabilidad del inmueble: valoración del nivel de riesgo a la vida humana por la falla de un sistema estructural, definido en términos de riesgo alto, moderado y bajo. Dicha estimación debería realizarse inmediatamente después de ocurrido el sismo y contar con una inspección del exterior del inmueble, para cualquier tipo de edificación y del interior cuando se evalúen edificaciones públicas o a las que concurren gran número de personas.

b. Evaluación del nivel de daño: Determinación del nivel de daño físico de una estructura o sus elementos estructurales, puede definirse sin daño, con daño leve, medio, grave y problemas de estabilidad y falla.

c. Presentar documentación para solicitar permisos de reparación con la entidad responsable.

d. Aplicación de técnicas de rehabilitación en estructuras dañadas.

e. Obligar a los propietarios o responsables de inmuebles a demoler estructuras con peligro de colapso.

f. Divulgar y capacitar personal para el uso de la norma

## **RECOMENDACIONES AL SECTOR GREMIAL:**

Capacitar a sus agremiados para que efectúen una correcta evaluación de las estructuras, después de que se haya definido un Plan de Evaluación de Daños ante terremotos y que esté preparada la Norma de evaluación de habitabilidad y daños.

## **RECOMENDACIONES AL SECTOR UNIVERSITARIO:**

Capacitar a sus graduados y alumnos para que apoyen las campañas por daños. Realizar trabajos de graduación orientados en el área de vulnerabilidad de estructuras, que aporten nuevos conocimientos y que estos puedan ser retroalimentados en el Plan de Evaluación de Daños y en las actualizaciones del RESESCO y sus Normas Técnicas.

Por otra parte, se recomienda que los próximos cuestionarios de evaluación de daños se complementen con la siguiente información:

1. Nombre del responsable de la evaluación,

con su respectivo número de carné de profesional de la ingeniería civil o la arquitectura.

2. Definición explícita de los sistemas estructurales que se utilizan en el país, con el objeto de que no exista duda o equivocación en la definición de estos. Para ello deberían considerarse los sistemas estructurales contemplados en la Norma de Sismo del RESESCO y otros sistemas utilizados en vivienda.

3. Descripción de la estructura de cimentación (si es posible).

4. Estimación de la cuantía de daño y pérdida de capacidad de los elementos estructurales.

Esquemáticamente de la ubicación de los distintos elementos estructurales y comentarios sobre la condición de daño.

Al final, conviene reiterar la necesidad de realizar las evaluaciones tomando muestras de observaciones completas, o al menos significativas, para cada población y cada tipología estructural. Si la evaluación va dirigida a estudios de riesgo o a recomendaciones de diseño, los análisis deben realizarse en términos de porcentaje de daño frente a no daño y ello requiere disponer del censo total de viviendas en cada población y de una cuantificación de cada grado de daño en cada tipología constructiva.

Hay que tener presente que los estudios de riesgo se basan en información contenida en matrices de daño, donde se incluye el porcentaje de viviendas de cada clase que sufren cada grado de daño y esos porcentajes son relativos al censo total de cada población.

## **RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO**

Los análisis de daños realizados con tres niveles de detalle, descritos en los apartados previos, 4.1, 4.2 y 4.3, han permitido identificar puntos críticos en cada caso y buscar fórmulas para corregir las deficiencias planteadas. Ello permitirá extraer recomendaciones para análisis más completos y útiles en un futuro, dirigidos a evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

En el primero de los análisis llevados a cabo, se dispone de datos de daño en distintos tipos de estructuras desglosados por departamentos. Esos datos no se pueden

reducir a porcentajes de daño en cada departamento, al no disponer del censo total de estructuras en el mismo. Sin embargo, si se ha podido analizar la variabilidad relativa del daño de unos departamentos a otros.

En el segundo caso, se dispone de información de daños por municipios, pero separando solo dos clases de viviendas, rural y urbana, y diferenciando dos grados de daño: reparable e irreparable. Se tiene además información del censo total de cada tipo en cada municipio, lo que permite conocer también el número de viviendas no dañadas. Esto permite, a su vez, elaborar matrices de daño en cada municipio, pero sin llegar al detalle de establecer clases de vulnerabilidad, y diferenciando tan solo dos grados de daño, además del nulo.

En el tercer análisis realizado, se ha elaborado una base de datos, con bastante detalle sobre el grado de daño y la tipología constructiva para cada observación, y se cuenta con más de 4000 observaciones georreferenciadas. La información para este análisis es mucho más detallada que en los casos anteriores, pero en contraposición, la muestra no es completa ni significativa y no pueden realizarse estimaciones en términos de porcentaje en cada población.

Así pues, cada análisis realizado presenta alguna ventaja e inconveniente frente al resto, de tal manera que sería indispensable construir una base de datos completa con la que se pueda realizar un único análisis, en el que se subsanaran las deficiencias parciales encontradas. Los aspectos negativos identificados previamente son también conclusiones, de cara a estudios futuros y vale la pena destacar las lecciones aprendidas de ellos.

Teniendo en cuenta lo anterior, proponemos a continuación una serie de recomendaciones y pautas de actuación, referidas primero a la elaboración de bases de datos de daño y luego a los posibles análisis a realizar, enmarcados en la estimación del riesgo sísmico.

## **ELABORACIÓN DE BASES DE DATOS Y ASIGNACIÓN DE CLASE DE VULNERABILIDAD Y GRADO DE DAÑO**

La primera medida a adoptar en análisis dirigidos a la estimación y mitigación del riesgo, es la recopilación de muestras de daños completas, o al menos representativas de cada tipología constructiva en cada población.

El tratamiento de los daños debe hacerse



porcentualmente. Para una cierta tipología o clase de vulnerabilidad, no es significativo el número de edificios dañados, sino el número frente al total, es decir, el porcentaje. En la estimación de este porcentaje se debe incluir el número de edificios no dañados, de ahí que es importante controlar el Daño nulo, generalmente denotado como D0.

Por ello las campañas de daño deben orientarse hacia ese objetivo, es decir, deben recoger toda la información, tanto sobre detalles estructurales como sobre daños de diferente consideración, incluyendo los grados extremos: colapso y daño nulo. Las recomendaciones para cada daño han sido incluidas en el apartado 4.3.5

Una vez elaborada la base de datos, debe realizarse la asignación del grado de daño y la clase de vulnerabilidad de cada edificio, adoptando una escala adecuada a la muestra de observaciones. Para este fin, una de las escalas más completas empleadas en la actualidad es la escala macrosísmica europea, EMS-98, que puede ser válida para Centroamérica, con alguna adaptación de las clases de vulnerabilidad a las tipologías constructivas locales.

En principio esta escala distingue 6 tipologías constructivas y 6 grados de daño (incluyendo el nulo). Una vez elegida la escala, la asignación se hace interpretando la información contenida en cada cuestionario, de ahí la importancia de que éste refleje de forma idónea los datos relevantes para la asignación.

Tras la asignación de vulnerabilidad y daño a cada observación de la muestra, los datos se agruparán por zonas (ciudades, municipios y departamentos...) cuya extensión dependerá de la escala de trabajo y del nivel de detalle del estudio. Como ejemplo, al tomar una agrupación por municipios, será necesario evaluar el porcentaje de estructuras que sufren cada grado de daño de cada tipología, en cada municipio. Por eso es necesario disponer del censo total en el mismo

## MATRICES DE VULNERABILIDAD Y DAÑO

Los datos de porcentaje de daño para distintos tipos constructivos en cada municipio deben ser organizados para su tratamiento estadístico y para su representación gráfica. Pues es conveniente confeccionar matrices de vulnerabilidad y daño, para lo cual se procede como a continuación se indica.

Se dispone de datos correspondientes a distintos grados de daño y clases de

vulnerabilidad en diferentes municipios. Para manejarlos debe establecerse una determinada nomenclatura, por ejemplo:

Se denomina  $V_i$  a cada clase de vulnerabilidad (o tipología constructiva, p.e. A,B,C,...) y se consideran  $m$  clases.

Se denomina  $D_j$  a cada grado de daño (D0 no dañado, D1 ligero, .....D5 colapso) y se consideran  $n$  grados de daño, además del nulo.

En cada municipio se evalúa:

$N_i$ : n° total de edificios de cada clase de vulnerabilidad  $V_i$

$n_j$ : n° de edificios que experimentan cada grado de daño  $D_j$  para cada clase  $V_i$

$P_{ij} = n_j / N_i$  Porcentaje de edificios de cada grado de daño  $D_j$  para cada clase de vulnerabilidad  $V_i$

Una vez evaluados los porcentajes, se construye la matriz de vulnerabilidad, que resume todos los daños del municipio y es una función  $f(V_i, D_j)$ . Estas matrices expresan el porcentaje de edificios dañados, para cada clase de vulnerabilidad y cada grado de daño. Se suelen construir de la siguiente forma:

Filas: clases de vulnerabilidad  $V_i$   
( $i=1 \dots m$ )

Columnas: Grados de daño  $D_j$   
( $j=0 \dots n$ )

Dato de cada casilla:  
Porcentaje de daño  $p_{ij}$

Ejemplo de matriz de vulnerabilidad

	V1	V2	$V_i$	$V_m$
D0	$P_{i0}$			
D2				
$D_j$			$P_{ij}$	
$D_n$				$P_{mn}$

## DAÑO MEDIO Y VARIABILIDAD GEOGRÁFICA DEL DAÑO

Las matrices anteriores pueden constar de un importante número de datos, con la consiguiente dificultad de interpretación.

Si se quieren identificar zonas de mayor o menor daño para cada tipología, hay que acudir a ciertas simplificaciones. En este sentido, es habitual la estimación de un Daño Medio en cada municipio, para cada tipología estructural, o clase de vulnerabilidad. Se define como sigue:

Daño medio para cada clase de vulnerabilidad  $V_i$  ( $D_{mi}$ )

$$D_{mi} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \frac{D_j \times n_j}{N_i}$$

Donde:  $n$  es el número de grados de daño considerados (p.e. en la escala EMS-98  $n=6$ )

$N_i$  es el n° de edificios de la clase de vulnerabilidad  $V_i$

$n_j$  es el n° de edificios de clase  $V_i$  que experimentan grado de daño  $D_j$

De esta forma, el daño medio para una cierta clase de vulnerabilidad se estima promediando los porcentajes de daño para los distintos grados reportados para esa clase.

Puede ser conveniente también reagrupar porcentajes de daño para cada clase  $V_i$ , diferenciando por ejemplo:

$$\text{Daño ligero } DL = (D_0 + D_1 + D_2)$$

$$\text{Daño moderado } DM = (D_3)$$

$$\text{Daño fuerte } DF = (D_4 + D_5)$$

En esta misma línea, la probabilidad de cada grado de daño se puede aproximar por las funciones de porcentaje calculadas, para la clase de vulnerabilidad  $V_i$ :

$$P(DL) \sim p_{iL} = p_{i0} + p_{i1} + p_{i2}$$

$$P(DM) \sim p_{im} = p_{i3}$$

$$P(DF) \sim p_{iF} = p_{i4} + p_{i5}$$

Para facilitar el análisis de la variabilidad geográfica del daño, los resultados deducidos analíticamente, se pueden representar gráficamente sobre un mapa, con múltiples opciones:

- Mapa de daño medio  $D_{mi}$ , para cada clase de vulnerabilidad  $V_i$
- Porcentajes para cada grado de daño y vulnerabilidad,  $p_{ij}$
- Porcentajes de daño acumulado...  $p_{iL}$ ,  $p_{im}$ ,  $p_{iF}$  para cada clase  $V_i$ .

Estos mapas se pueden trazar para toda la zona afectada por cada terremoto, a nivel regional, y permitirán hacer una primera valoración de distribuciones de daño. Si se



representan para una determinada población, a escala local (p.e. 1:10.000), pueden superponerse con información del tipo de suelo y la geología y resultarán mapas de microzonificación.

## RELACIÓN MOVIMIENTO-DAÑOS

Teniendo en cuenta la definición de riesgo sísmico aceptada por la UNESCO (1980):

$$R = H * V * C$$

Donde: H es la peligrosidad sísmica o probabilidad de superación de un cierto nivel de movimiento del suelo

V vulnerabilidad  
C valor de costo de reparación de daños

Si se desea dirigir los análisis de vulnerabilidad y daños a futuras estimaciones de riesgo, es necesario establecer relaciones entre el grado de daño y el movimiento fuerte registrado y/o estimado.

Para ello un primer paso debe ser la selección y estimación de los parámetros de movimiento que expliquen mejor el daño, y puedan ser indicadores del daño potencial. En la literatura especializada se han propuesto muchos de estos parámetros, por ejemplo

- PGA Aceleración pico
- PGV Velocidad pico
- IA Intensidad de Arias
- CAV Velocidad absoluta acumulativa
- PSA (T) Aceleración espectral para el periodo T
- PD Destructividad potencial

Para representar el movimiento estimado o registrado en una cierta zona, conviene trazar mapas de isolíneas de estos parámetros, que después se correlacionarán con el daño. Al igual que en el apartado anterior, estos mapas se pueden trazar a escala regional, para toda la zona afectada ó a escala local, para las principales poblaciones.

Una vez procesados los datos de daños y de movimiento se puede proceder a examinar correlaciones entre ambos parámetros, particulares para cada tipología constructiva. También pueden calcularse valores umbrales de parámetros de movimiento susceptibles de causar daño. A continuación se exponen algunas opciones para estos análisis:

1) Trazado de curvas de fragilidad, donde se expresa el porcentaje de daños frente al parámetro del movimiento, para las

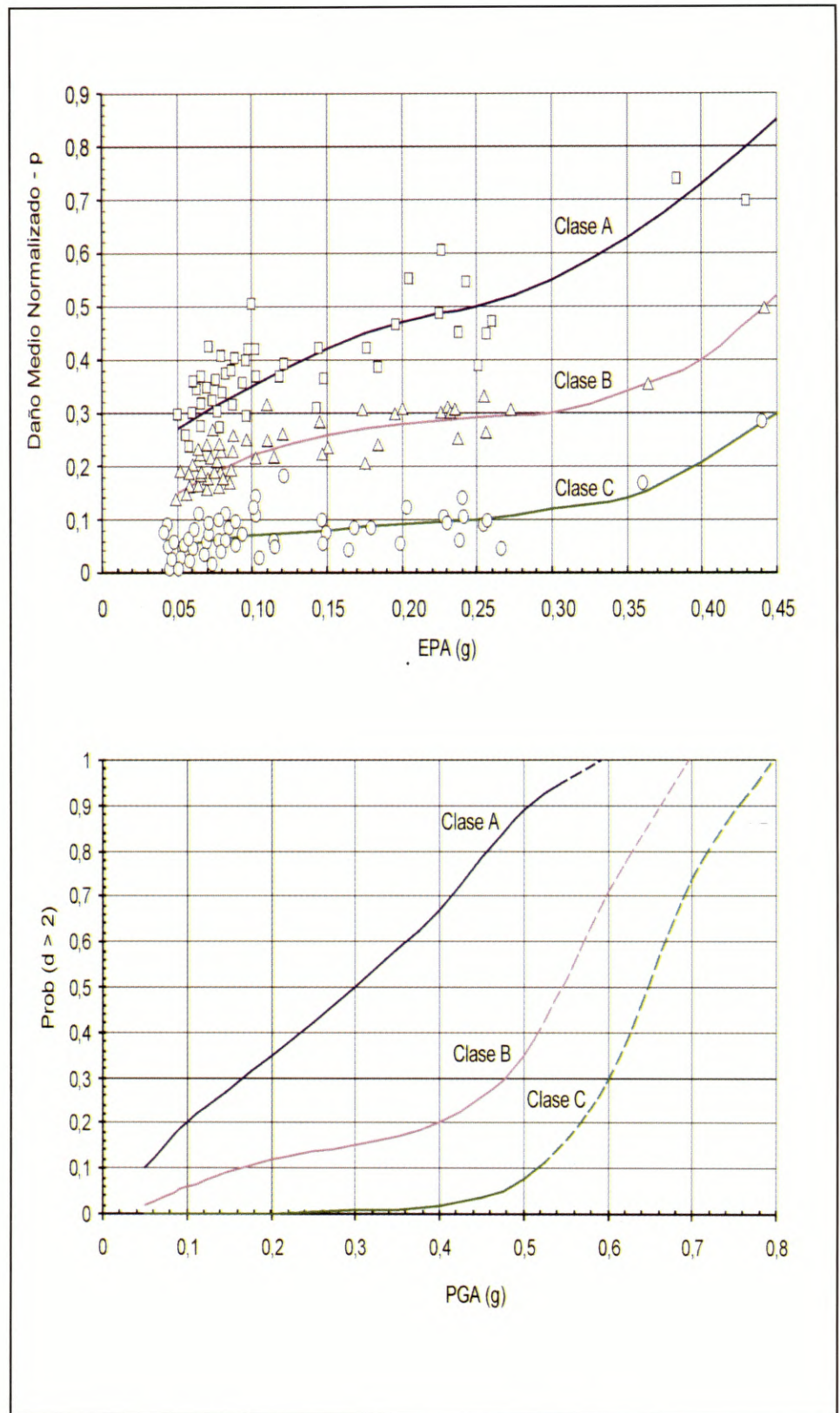


Figura 4.20. Ejemplo de curvas de fragilidad para clases de vulnerabilidad A, B y C.  
a. Daño medio normalizado en función de aceleración pico efectiva (EPA)  
b. Probabilidad de daño  $D > 2$ , en función de la aceleración pico (PGA)



diferentes clases de vulnerabilidad. A su vez, éstos pueden trazarse representando:

-Daño medio  $D_{mi}$  frente a parámetro del movimiento, separando clases  $V_i$  (ejemplo figura 4.20a)

-Porcentajes  $p_{ij}$  frente a parámetro de movimiento, para cierto grado de daño  $D_j$ , separando clases  $V_i$

-Porcentajes de daño acumulado (DL, DM, DF), frente a parámetro de movimiento, separando clases  $V_i$  (ejemplo en figura 4.20 b)

2) Deducción de funciones de correlación entre el grado de daño y uno o varios parámetros de movimiento. Para ello se ensayarán ajustes lineales o polinomiales, tomando el grado de daño como variable dependiente y los distintos parámetros de movimiento evaluados como variables independientes. Se pueden probar distintas combinaciones, a fin de determinar qué parámetros del movimiento o qué combinaciones correlacionan mejor con el daño.

3) Determinación de los mejores estimadores de daño potencial. Interpretando los resultados de la fase anterior, se pueden identificar los parámetros de movimiento

que mejor correlacionan con el daño para cada tipología estructural. Estos serán indicadores del daño potencial.

4) Aplicación de un método sencillo basado en *Teoría de la Decisión*, para establecer valores umbrales de parámetros, a partir de los cuales se tiene daño moderado o fuerte, para cada clase de vulnerabilidad. Esencialmente consiste en:

a) Evaluar probabilidad de daño ligero (P1) para cada clase de vulnerabilidad  $V_i$ :

$$P1 = p_{iL} = p_{i1} + p_{i2}$$

b) Evaluar probabilidad de daño moderado o fuerte (P2) para la misma clase de vulnerabilidad,

$$P2 = p_{im} + p_{if} = p_{i3} + p_{i4} + p_{i5}$$

c) Representar ambas funciones, P1 y P2, frente a valores del parámetro de movimiento elegido. En el punto de cruce de ambas, la probabilidad de daño moderado o fuerte pasará a ser mayor que la de daño ligero. El valor del parámetro de movimiento en este punto puede establecerse como el valor umbral buscado (ejemplo en figura 4.21).

Cualquiera de las opciones seguidas en este

apartado, permitirá ahondar en el conocimiento de la respuesta de estructuras ante una determinada acción sísmica, y extraer resultados, tanto cualitativos como cuantitativos, aplicables a la definición de criterios de diseño sísmico y a la adopción de medidas de reducción de vulnerabilidad y riesgo.

Se pone así de manifiesto la importancia de organizar, de manera estructurada, todo lo relacionado con análisis de daños y movimiento- desde las campañas de inspección de daños, elaboración de bases de datos, asignación de vulnerabilidad y daños, evaluación de la variabilidad geográfica del daño, relación con los parámetros de movimiento, etc., para obtener la máxima información de terremotos pasados y extraer lecciones útiles para aminorar el riesgo asociado a terremotos futuros.

En este capítulo se ha pretendido dar una orientación sobre este tipo de análisis, destacando los resultados obtenidos -tanto positivos como negativos- en los análisis hechos y dando las pautas para los que previsiblemente se pueden hacer con una información más completa, de modo que la experiencia adquirida permita optimizar estos estudios en el futuro.

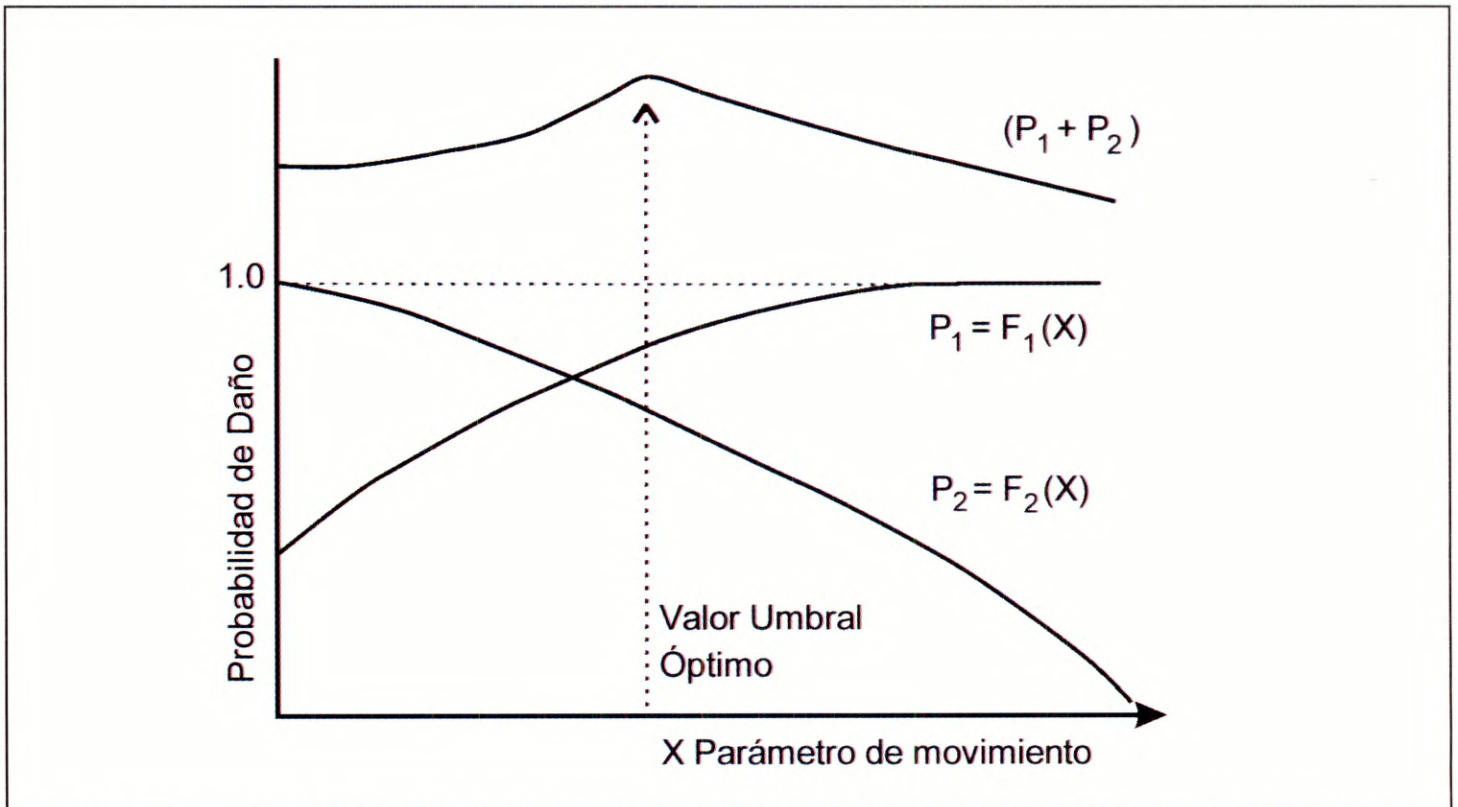


Figura 4.21. Ejemplo de aplicación de la teoría de la decisión. Representación conjunta de funciones de probabilidad de daño ligero (P1) y probabilidad de daño moderado + fuerte (P2), para la definición del valor umbral en el parámetro de movimiento.