CAPÍTULO 6

TERREMOTO DEL VALLE DE LA ESTRELLA, LIMÓN 22 DE ABRIL DE 1991

1. PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA

Fecha:	22 de abril de 1991
Hora:	21:57 GMT (15:57 hora local)
Latitud:	09° 38.62' Norte
Longitud:	83° 05.92' Oeste
Profundidad:	21.5 km
Magnitud:	7.4 Ms (según USGS)
Lugar:	Valle de La Estrella, Limón.

2. FUENTES DE REGISTROS SÍSMICOS

Los datos se pueden recopilar de varias fuentes institucionales: el Programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (LIS-INII) de la Universidad de Costa Rica (UCR), el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) de la Universidad Nacional (UNA) y la red de acelerógrafos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

2.1 Programa de medición de sismos fuertes, LIS, INII

De esta red se recobraron 15 acelerogramas de 14 estaciones el total de 19 instaladas en el territorio nacional (5). La más cercana fue la de San Isidro de El General (código ISD), a 76 km del epicentro y ubicada en un estrato de suelo firme formado por materiales sedimentarios terciarios, donde se registró una aceleración pico horizontal de 0,20 g. La máxima aceleración pico de todos los acelerogramas recuperados se registró en la estación Cartago (código CTG), a 96 km del epicentro y ubicada en un estrato de suelo blando formado por sedimentos aluviales recientes, y fue de 0,27 g. Sin embargo, este valor está probablemente influenciado por un efecto local de amplificación ya que en la estación Cachí (código CCH), a 83 km del epicentro y ubicada en un estrato rocoso formado por materiales volcánicos terciarios, se registró una aceleración pico horizontal de 0,15 g. En el cuadro 6.1 se resumen los datos obtenidos de todas las estaciones.

Cuadro 6.1 Aceleraciones máximas registradas Programa de medición de sismos fuertes, LIS-INII

Estación	Código	Estructura (*)	Suelo (**)	Distancia epicentral	Aceleración máxima	Orientación de ejes
San Isidro	ISD	B	F	76 km	0,20 g	0°
					0,17 g	Vertical
					0,15 g	270°
Cachí	CCH	C	R	83 km	0,15 g	0°
					0,06 g	Vertical
					0,09 g	270°
Cartago	CTG	C	B	96 km	0,27 g	0°
					0,13 g	Vertical
					0,22 g	270°
San José de Guatuso	GTS	B	F	108 km	0,11 g	0°
					0,04 g	Vertical
					0,06 g	270°
Biblioteca Central UCR	CMA	A	B	111 km	0,16 g	92,5°
					0,12 g	Vertical
					0,20 g	2,5°
Golfito	GLF	B	B	113 km	0,06 g	0°
					0,02 g	Vertical
					0,04 g	270°
Hotel Aurola	AUR	A	F	114 km	0,07 g	0°
					0,04 g	Vertical
					0,06 g	270°
Banco Central	BNC	A	F	115 km	0,08 g	262°
					0,07 g	Vertical
					0,07 g	172°
Hatillo	HTO	B	B	116 km	0,12 g	0°
					0,06 g	Vertical
					0,09 g	270°
ICE Sabana	ICE	A	F	117 km	0,08 g	285°
					0,06 g	Vertical
					0,09 g	195°
Quepos	QPS	B	R	121 km	0,04 g	0°
					0,03 g	Vertical
					0,03 g	270°
Alajuela CIPET	ALJ	B	B	131 km	0,11 g	0°
					0,05 g	Vertical
					0,09 g	270°
Puriscal	PCL	B	B	139 km	0,09 g	0°
					0,07 g	Vertical
					0,07 g	270°
San Ramón	SRM	B	B	162 km	0,09 g	0°
					0,08 g	Vertical
					0,08 g	270°

(*) Tipo de estructura: A = Edificio de 3 o más pisos, B = Edificio de dos o menos pisos, C = Campo abierto
(**) Tipo de suelo: R = Roca, F = Firme, B = Blando. Fuente: Referencia (5).

2.2 Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI)

No se obtuvieron datos de la red de acelerógrafos del OVSICORI.

2.3 Red de acelerógrafos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Se tiene información de una estación en Siquirres que registró una aceleración pico de 0,77 g. Por lo inconsistente del alto valor registrado y los pocos daños observados en la zona se recomendó no tomar en cuenta este dato y revisar la calibración del acelerógrafo.

2.4 Estimación de las aceleraciones y velocidades pico en el sitio según las relaciones de atenuación de Kawashima

Existen una serie de fórmulas empíricas que relacionan diversos parámetros del movimiento del suelo tales como aceleración, velocidad y desplazamiento pico con la distancia a la fuente sísmica y la magnitud del evento registrado. En este caso se indica la relación hecha por O' Rourke y Ballantyne (2) de los diversos valores de aceleraciones pico registrados en las estaciones del Programa de Medición de Sismos Fuertes-LIS-INII-UCR con las relaciones de atenuación desarrolladas por Kawashima. La ventaja del uso de estas relaciones es que fueron desarrolladas para eventos sísmicos con características muy similares al sismo del 22 de abril y permiten correlacionar los valores de las estaciones según el tipo de suelo donde se hizo el registro, obteniéndose valores estimativos de velocidades pico del suelo. La forma general de la relación es la siguiente:

$$Y = a\ 10^{bM}\ (\Delta + 30)^{d}$$

donde:

Y = el parámetro en estudio (aceleración pico, en gals, o velocidad pico, en cm/s).
a,b,d = constantes empíricas que dependen del tipo de suelo.
M = magnitud según la Agencia Meteorológica Japonesa (para el caso de Ms = 7,50 debe utilizarse
M = 7,38).
D = distancia al epicentro, en kilómetros.

A continuación se presenta la descripción de los tres tipos de suelo que utiliza Kawashima para la clasificación, los valores para las constantes empíricas a, b, d según el tipo de suelo y la comparación entre los valores generados por las relaciones de atenuación y los medidos en las estaciones acelerográficas.

Cuadro 6.2 Tipología de suelos para usar con las relaciones de atenuación de Kawashima

Grupo	Descripción	Período natural
1	Rocas terciarias o de mayor edad geológica. Estratos diluviales con espesores menores que 10 metros.	Menor de 0,20 segundos
2	Estratos diluviales con espesores mayores de 10 metros o aluviales menores de 25 metros, incluidos estratos suaves con espesores menores de 5 metros	Entre 0,20 y 0,60 segundos
3	Cualquier otro que no clasifique en los anteriores, especialmente estratos aluviales suaves	Mayor de 0,60 segundos

Fuente: Referencia (2)

Cuadro 6.3 Valores para las constantes empíricas según el tipo de suelo

Y	Grupo	a	b	d
A (gals)	1	987,00	0,216	-1.218
	2	233,00	0,313	-1.218
	3	404,00	0,265	-1.218
V (cms/s)	1	20,80	0,263	-1.222
	2	2,81	0,430	-1.222
	3	5,11	0,404	-1.222

Fuente: Referencia (2)

Figura 6.1 Aceleración en relación a la distancia epicentral (registrada y según Kawashima) para suelos del grupo 1

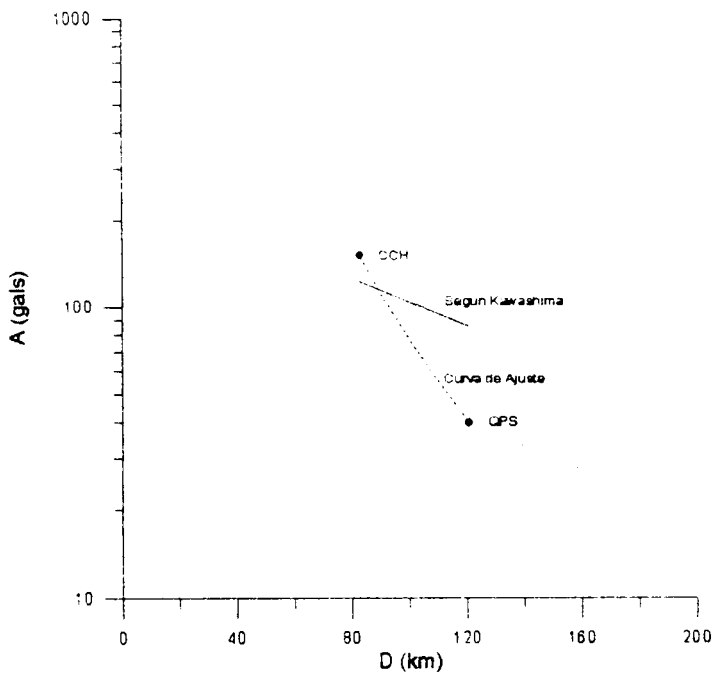


Figura 6.2 Aceleración en relación a la distancia epicentral (registrada y según Kawashima) para suelos del grupo 2

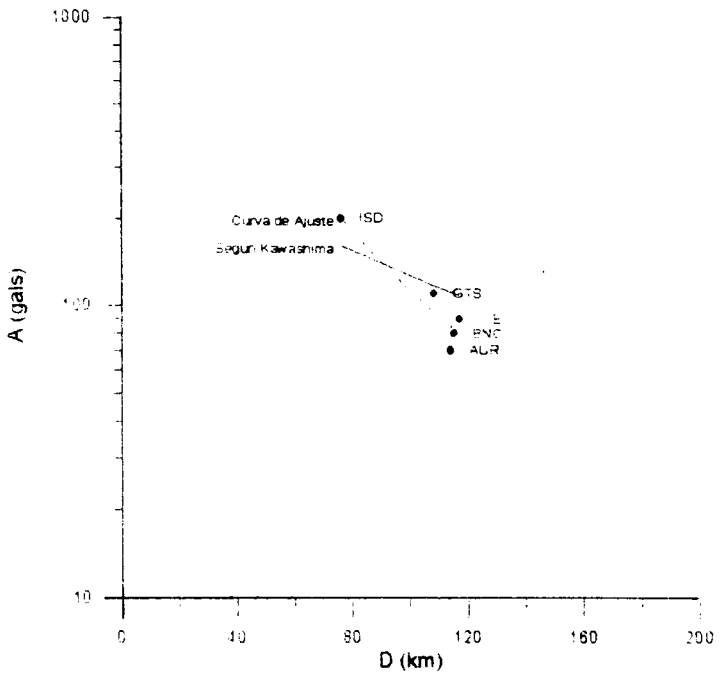


Figura 6.3 Aceleración en relación a la distancia epicentral (registrada y según Kawashima) para suelos del grupo 3

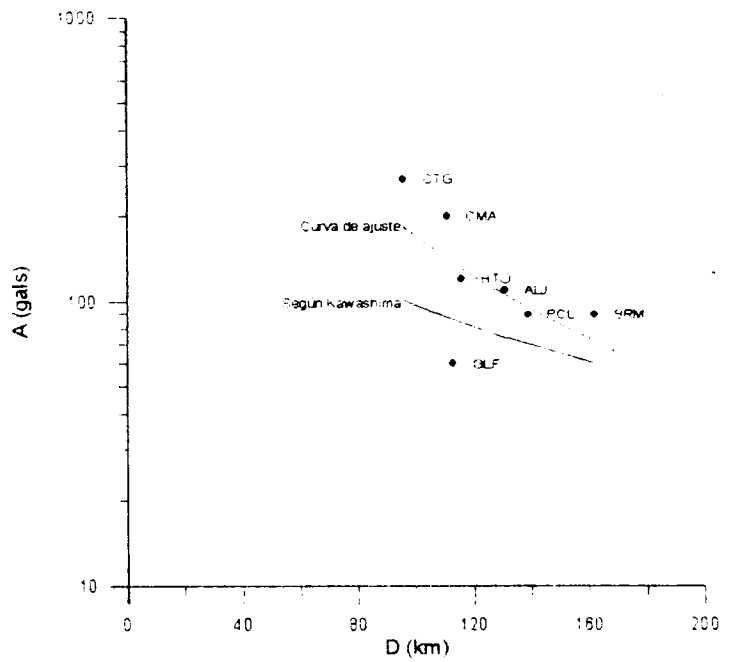


Figura 6.4 Aceleración en relación a la distancia epicentral según relaciones de atenuación de Kawashima

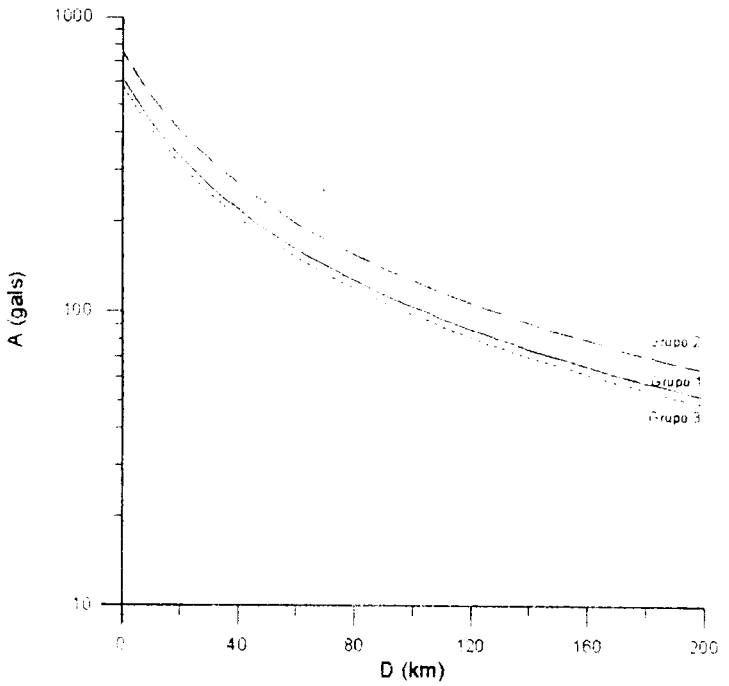
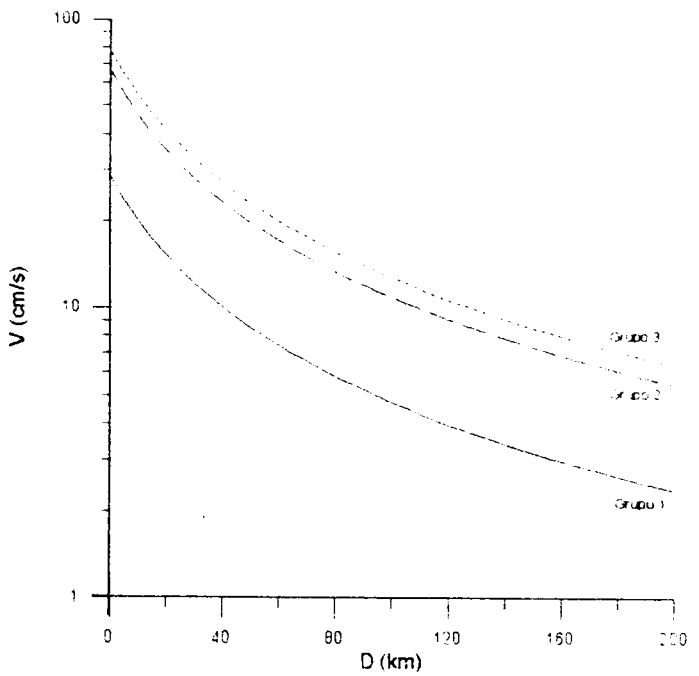


Figura 6.5 Velocidad en relación a la distancia epicentral según relaciones de atenuación de Kawashima



Cuadro 6.4 Resultados de la comparación

Estac.	D (km)	Grupo Suelo	Aceleración (gals)		%error	%error prom.	Factor multip.
			registrada	Kawashima			
CCH	83,00	1	150,00	122,39	22,56		
QPS	121,00	1	40,00	85,98	-53,48	-15,46	0,85
ISD	76,00	2	200,00	162,36	23,18		
GTS	108,00	2	110,00	117,74	-6,57		
AUR	114,00	2	70,00	111,79	-37,38		
BNC	115,00	2	80,00	110,85	-27,83		
ICE	117,00	2	90,00	109,02	-17,45	-13,21	0,87
CTG	96,00	3	270,00	100,89	167,63		
CMA	111,00	3	200,00	87,97	127,35		
GLF	113,00	3	60,00	86,47	-30,61		
HTO	116,00	3	120,00	84,31	42,33		
ALJ	131,00	3	110,00	74,85	46,97		
PCL	139,00	3	90,00	70,55	27,56		
SRM	162,00	3	90,00	60,40	49,01	61,46	1,61

Puede observarse que existe una diferencia entre los valores reales registrados y los calculados según las fórmulas de Kawashima (figuras 6.4 y 6.5), por lo que es necesario afectar estos últimos con un factor multiplicativo según se indica a continuación: para suelos del grupo 1 el factor es 0,85; para suelos del grupo 2 es 0,87 y para suelos del grupo 3 es 1,61. Este factor multiplicativo es extensivo a los valores de velocidad.

Cuadro 6.5 Valores de aceleración y velocidad estimados según Kawashima

		Aceleración (gals)			Velocidad (cm/s)		
Sitio	D (km)	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3
Limón	40	219,31	269,13	206,42	10,10	23,30	27,24
Cuenca R. Banano	25	294,20	361,02	276,90	13,56	31,29	36,58

NOTA: Los valores correspondientes a la planta de tratamiento y toma del río Banano son similares a los de la ciudad de Limón por su cercanía geográfica.

Cuadro 6.6 Valores de aceleración y velocidad corregidos

		Aceleración (gals)			Velocidad (cm/s)		
Sitio	D (km)	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3	Gr. 1	Gr. 2	Gr. 3
Limón	40	186,41	234,14	332,34	8,59	20,27	43,86
Cuenca R. Banano	25	250,07	314,09	445,81	11,78	27,22	58,89

3. IMPACTO REGIONAL

El terremoto de Limón esta catalogado como el evento sísmico más destructivo de Costa Rica en la segunda mitad del siglo XX. Sus efectos se hicieron sentir con severidad prácticamente en todos los aspectos de la vida económica y social de la región atlántica y generó intensidades en la escala Mercalli modificada del orden de VIII y XI en las zonas cercanas al epicentro. Se estima que el área afectada es de unos 12.000 km^2 y abarcó el sureste de Costa Rica y el noreste de Panamá. En la figura 6.6 puede apreciarse la distribución de isosísmicas para este evento.

3.1 Efectos geológicos

3.1.1 *Licuefacción*

Durante el terremoto de Limón ocurrió la licuefacción de grandes áreas constituidas por un subsuelo de depósitos fluviales no consolidados del cuaternario, que produjo volcanes de arena observados principalmente en lugares cercanos a la costa, que eyectaron agua con arena y barro a alturas de 5 metros y dejaron en el suelo cráteres de hasta 2 metros de diámetro. El fenómeno de licuefacción, combinado con la propagación de ondas sísmicas, causó severos fallas en casas de habitación, obras de infraestructura y decenas de kilómetros de carreteras por el efecto de amplificación dinámica en suelos poco cohesivos. También se dieron asentamientos diferenciales y agrietamientos generados por la licuefacción. En la figura 6.7 pueden observarse las grandes áreas afectadas por este fenómeno.

3.1.2 *Asentamientos*

Este fenómeno fue originado por el asentamiento de sedimentos en áreas pantanosas tales como la desembocadura de ríos, donde el subsuelo está constituido por espesos depósitos fluviales y deltaicos pobremente consolidados y saturados.

3.1.3 *Deformación de la corteza terrestre*

Uno de los efectos más dramáticos del terremoto fue el levantamiento cosísmico que abarcó desde Moín hasta Gandoca, haciéndose evidente en la línea costera. El máximo levantamiento ocurrió en las vecindades de la ciudad de Limón, donde varios especialistas midieron valores entre 0,80 y 1,85 metros: 0,80 metros en el Muelle Alemán; 0,80 metros en la Isla Uvita; 1,50 metros en el embarcadero en Moín y 1,85 metros entre Playa Bonita y el Hotel Las Olas. Dos kilómetros al norte de Moín el levantamiento decreció rápidamente hasta llegar a cero. Desde Limón hasta la desembocadura del río La Estrella el levantamiento no superó la diferencia de 1,0 metros y desde el río La Estrella hasta el río Sixaola fue muy uniforme y varió entre 0,3 y 0,5 metros. Al sur del río Sixaola decreció rápidamente (figura 6.8). Según reporte del Instituto Costarricense de Electricidad, este levantamiento no se dio solamente en la costa sino que también fue detectado tierra adentro cuando se hizo la revisión de la líneas de transmisión de energía eléctrica entre Siquirres y Limón y alcanzó diferencias pre y post terremoto de hasta 3,0 metros. Este levantamiento provocó fallas de funcionamiento en

muelles y embarcaderos, exposición de plataformas coralinas, inversión de pendientes en redes de disposición de aguas servidas y pluviales, modificación del perfil longitudinal de algunos ríos y redujo el gradiente en zonas muy planas, lo que provocó severas inundaciones en la época lluviosa siguiente al terremoto. En lugares como Manzanillo este levantamiento tectónico se vio compensado por un asentamiento general debido a la consolidación y compactación del subsuelo, por lo que los niveles pre y post terremoto prácticamente no variaron.

3.1.4 *Deslizamientos*

Como consecuencia directa del evento principal y de la gran cantidad de réplicas de magnitud moderada se produjeron muchos deslizamientos en áreas con pendientes fuertes en las partes altas montañosas de la región, lo que causó un efecto adverso en el ambiente pues con las lluvias que siguieron al terremoto fueron arrastradas grandes cantidades de sedimentos y biomasa a las cuencas de los ríos. Las cuencas más afectadas fueron las de los ríos Estrella, Banano, Bananito, Viscaya, Zent y Chirripó (figura 6.9), con porcentajes de devastación no menores al 30%. Cálculo conservadores indican que solamente en la cuenca del río La Estrella se perdieron más de 1,6 millones de metros cúbicos de biomasa boscosa lo que, para un promedio de 200 metros cúbicos de biomasa por hectárea en este tipo de bosque, arroja un total de 8.000 hectáreas devastadas. El impacto más directo se observó en la cuenca del río Banano que sirve como la principal fuente de abastecimiento del sistema de agua potable de la ciudad de Limón. Debido a los sedimentos y sólidos suspendidos que arrastraba el río se hizo necesario sacar de operación la toma de aguas por bombeo pues la planta de potabilización no estaba en capacidad de eliminar la cantidad de materia sólida que arrastraba el río.

3.1.5 *Desplazamientos laterales*

Como producto de las fuertes sacudidas generadas por el terremoto, grandes masas de suelo sufrieron desplazamientos laterales especialmente en las zonas ribereñas de ríos y canales. Este fenómeno afectó severamente puentes y provocó el colapso de tramos centrales, inclinación de las pilas de soporte, corrimiento de bastiones e inclinaciones y desplazamientos en la superestructura de los mismos.

3.1.6 *Tsunami*

Este efecto del terremoto se reportó en localidades como Gandoca, Punta Uva, Manzanillo y Boca Matina. La altura de la ola principal alcanzó un máximo de 2,5 metros y fue seguida de una serie de olas que duró hasta 60 minutos después del sismo. Las mayores fallas por efecto del tsunami fueron reportados en Panamá; en Costa Rica no se reportaron fallas debido a la presencia de la barra coralina frente a la costa caribeña que minimizó la acción de las olas.

3.2 Efectos en la infraestructura de los asentamientos humanos

3.2.1 *Viviendas*

Según una evaluación efectuada por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) y el Instituto de Vivienda y Urbanismo (INVU) en la provincia de Limón hubo un total de 3.003 viviendas que presentaron colapso total o fallas irreparables, 2.896 viviendas con fallas moderados reparables y 1.952 viviendas con fallas menores. En la provincia de Cartago, concentradas en el cantón de Turrialba, hubo 272 viviendas que presentaron colapso total o fallas irreparables, 376 con fallas moderados a severos pero reparables y 200 viviendas con fallas leves.

3.2.2 *Instalaciones de salud*

Un total de 19 edificaciones pertenecientes al Ministerio de Salud presentaron fallas de diversa magnitud: 8 presentaron colapso parcial y alto deterioro, 6 presentaron fallas importantes en instalaciones y fallas estructurales moderadas y las restantes cinco presentaron fallas leves. El centro médico más importante de la zona, Hospital Dr. Tony Facio de Limón, sufrió severos fallas que obligaron al cierre parcial del mismo. La parte más afectada fue el edificio de hospitalización y salas de cirugía, estructura de cinco niveles con marcos de concreto reforzado que demostró tener un comportamiento muy flexible y sufrió importantes fallas, así como el equipo que albergaba.

3.2.3 *Edificios escolares*

Según un reporte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, un total de 18 escuelas presentó colapso total en algunas de las aulas, 26 presentaron fallas de consideración y un número no definido presentó fallas menores.

3.3 Efectos en las líneas vitales

3.3.1 *Abastecimiento de agua potable y sistemas de alcantarillado*

Debido a las grandes alteraciones que sufrió la cuenca del río Banano por los deslizamientos en las zonas altas se hizo necesario sacar de operación la toma de aguas de dicho río, lo que sumado a las múltiples fracturas, fugas y dislocaciones de las tuberías de conducción, desde la planta de tratamiento hasta los tanques de almacenamiento, afectó seriamente el sistema de abastecimiento de agua potable para la cuidad de Limón. Asimismo, las otras dos fuentes con que cuenta el sistema (el campo de pozos en La Bomba y las fuentes de Moín) se vieron severamente afectadas por fallas en los sitios de toma o en las tuberías de conducción.

Los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial de la ciudad de Limón quedaron inoperantes después del terremoto pues se invirtieron las pendientes debido al fenómeno de levantamiento de la placa continental en la zona costera. Se dieron además gran cantidad de

fracturas y fugas que representaron una serie amenaza de contaminación y expansión de epidemias.

El terremoto también afectó gran cantidad de acueductos rurales en poblados como Puerto Viejo, Sixaola, Wetsfalia, Beverly, Filadelfia, Penhurst, Bonifacio, Cahuita, Batán, 24 Millas, Santa Marta, Zent, Estrada, Matina, 28 Millas y La Suiza de Turrialba. Se reportaron fallas que iban desde fugas en las redes de distribución hasta la caída de tanques de almacenamiento y distribución, colapso total de casetas de bombeo y variaciones en los niveles de agua de pozos.

3.3.2 *Carreteras*

La red vial más importante de la zona está compuesta por la ruta nacional 32 que comunica Puerto Limón con el interior del país y la ruta nacional 36 que comunica las zonas del valle de La Estrella y Sixaola con Puerto Limón. Luego del terremoto esta red quedó inutilizada y dejó la zona atlántica sin acceso por tierra. Las fallas más importantes se presentaron en el trayecto Limón-Valle de La Estrella; hubo asentamientos y agrietamientos profundos en las superficies de rodamiento, deslizamiento de terraplenes, derrumbe de taludes y colapso de uno o más tramos en diversos puentes (figura 6.10, a y b). En gran medida todas esas fallas fueron asociadas al fenómeno de licuefacción que se dio en la zona. También resultaron afectadas muchas otras carreteras de importancia secundaria y caminos vecinales que en algunos casos quedaron intransitables.

3.3.3 *Ferrocarriles*

Las vías férreas también fueron severamente afectadas, hubo desplazamientos laterales y hundimientos en terraplenes, deformación transversal de los rieles (figura 6.11, a), fallas en la cimentación y la superestructura de dos puentes (río Matina y canal km 23), fallas en los pilares de soporte de otro (río Bananito) que provocó una inclinación de 20° de la superestructura (figura 6.11, b).

3.3.4 *Puertos*

Debido al levantamiento general de la placa continental en la zona costera se requirió un trabajo de dragado en los puertos de Moín y Limón para restituirlos a sus condiciones de operación antes del terremoto. En el puerto de Limón se presentaron importantes fallas en los patios de contenedores debido a la licuefacción; el edificio de aduanas sufrió fallas irreparables y ocurrieron asentamientos importantes en varios sitios.

3.3.5 *Aeropuertos*

Las fallas en el aeropuerto de Limón se pueden calificar como poco importantes; la superficie de rodamiento de la pista de aterrizaje sufrió leves hundimientos y grietas menores y las instalaciones físicas de torre de control no presentaron fallas apreciables.

3.3.6 *Telecomunicaciones*

Solamente se reportó la caída de algunos equipos y fallas menores en las edificaciones que albergan las centrales telefónicas. Excepto por la congestión inmediata luego del sismo, el sistema siguió operando normalmente.

3.3.7 *Abastecimiento energético*

El suministro de energía eléctrica se vio interrumpido inmediatamente después del terremoto, se reportó la caída de transformadores y desplomes en las líneas de conducción pero se restableció su operación poco tiempo después.

Con respecto a los hidrocarburos, la refinería de RECOPE en Moín sufrió fallas importantes; se reportó la caída de un tanque y fallas por pandeo local en otros 5 tanques de crudo (figura 6.12, a y b). El sismo también provocó fallas en los equipos y tuberías de las áreas de proceso y fallas de consideración en el edificio administrativo. Debido al levantamiento costero quedó fuera de operación el muelle petrolero, por lo que fue necesario una operación de dragado para ponerlo a operar nuevamente.

3.4 Otros sectores afectados

3.4.1 *Sector agropecuario*

La parte más afectada fueron las fincas bananeras, donde se reportaron fallas cuantiosas en las plantaciones, las plantas empacadoras y las fábricas de cajas para empaque, además del daño indirecto de la destrucción de caminos y ferrocarriles que impidió la exportación de la fruta.

3.4.2 *Sector turismo*

El turismo se vio afectado por el colapso de dos hoteles: Hotel Internacional en el centro de Limón y el Hotel Las Olas en la zona costera. En ambos casos se detectaron serias deficiencias de diseño, construcción y mantenimiento de la superestructura de concreto reforzado (figuras 6.13 y 6.14).

4. FALLAS EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE LIMON

4.1 Cuenca del río Banano

En la parte alta de la cuenca del río Banano se detectaron hasta 27 deslizamientos que provocaron un aumento inesperado en los niveles de turbiedad del agua que llegó hasta 100.000 UNT, nivel que iba más allá de la capacidad de la planta de tratamiento (600 UNT). El deterioro fue intenso en 20% de la cuenca (36 km^2) con desprendimiento superficial de suelos,

desplazamiento de grandes masas de suelos, desprendimiento de grandes volúmenes de rocas y levantamiento del fondo del cauce del río. En 60% de la cuenca (100 km^2) se presentó desestabilización generalizada de suelos y múltiples deslizamientos de dimensiones menores. Se estima que el tiempo de recuperación de la cuenca no será menor de 8 años.

4.2 Toma de aguas del río Banano y planta de tratamiento

En la toma de aguas no se registraron fallas, excepto por un desacople en una de las tuberías de impulsión hacia la planta de tratamiento. Las fallas observadas en la planta de tratamiento son de poca importancia estructural pero desde el punto de vista funcional la dejaron fuera de operación: los cilindros de cloro se soltaron, se rompieron los tubos de conexión y se liberó parte del gas que contenían; uno de los dosificadores de sulfato de aluminio también se soltó de sus soportes, se rompieron los tubos de conexión y se dañó el piso, los marcos de madera de apoyo y los paneles de asbesto cemento usados en los floculadores y en los clarificadores se rompieron y un canal de concreto presentó fisuras.

4.3 Fuentes Moín

En las fuentes de Moín prácticamente no hubo daños.

4.4 Sistemas de tuberías de agua potable

En las tuberías de conducción se observaron cuatro tipos de fallas: falla en el cuerpo del tubo, caracterizada por grietas alrededor del mismo en segmentos intermedios; falla en piezas de unión entre dos segmentos de tubería; falla en la unión debido a separación por tensión; y falla en la unión por compresión telescópica (ver cuadro 6.8).

Para el caso de las tuberías de distribución se identificaron seis tipos de fallas: falla en el cuerpo del tubo; falla en una pieza de unión que conectaba dos tubos; falla de una Te; desconexión de una Te; compresión telescópica en la junta; y separación de la junta por tensión (ver cuadro 6.10 y figura 6.15).

4.4.1 *Tuberías de conducción de agua potable*

Se reportó un total de 25 reparaciones en 4,54 km de la tubería de hierro dúctil (HD) que conduce las aguas desde la fuentes Moín; 41 reparaciones en 11,5 km de la tubería de hierro fundido (HF) que viene desde la planta de tratamiento del río Banano; y 120 reparaciones en 15,5 km de tubería de tubo cilíndrico de concreto reforzado (TCCR) que también viene desde la planta de tratamiento (ver cuadro 6.7).

Según O' Rourke y Ballantyne (2) las fallas en las tuberías de hierro dúctil y hierro fundido son más altos que los observados en terremotos pasados de similares características, especialmente en las tuberías de hierro dúctil que vienen desde las fuentes de Moín, hecho que se atribuye al fenómeno del levantamiento cosísmico de la corteza terrestre, que alcanzó su máxima magnitud entre Moín y Limón y fue menos severo entre Limón y río Banano.

Cuadro 6.7 Fallas provocados por el terremoto en las líneas de conducción

Tipo tubo	Diámetro	Longitud	N° de fallas	Fallas/km
HD	300 mm	4,54 km	25	5,5
HF	300 mm	11,50 km	41	3,6
TCCR	500 mm	15,50 km	120	7,7

Fuente: Referencia (2)

Cuadro 6.8 Distribución de fallas en las tuberías de conducción

Tipo tubo	Diámetro	Total fallas	Falla tubo	Falla unión	Falla por tensión
HD	300 mm	25	10 (38%)	-	15 (62%)
HF	300 mm	41	19 (46%)	5 (12%)	17 (42%)

Fuente: Referencia (2)

En la tubería de concreto reforzado las fallas se generaron en las uniones; la mayoría fueron fallas de separación por tensión y en menor porcentaje por compresión telescópica (un tubo incrustado dentro del otro). La entrada a Limón por Pueblo Nuevo cerca del cruce a nivel del ferrocarril donde la tubería corre paralela a la carretera, es un punto de especial interés con respecto a la concentración de fallas de este tipo de tubería, ya que en esta zona se dieron hasta 20 fallas de la tubería en un tramo de 750 metros, lo que arroja un índice local de 26.7 reparaciones por km. Este hecho se debe a las fuertes deformaciones permanentes del suelo generadas por el sismo en ese lugar, incluido un corrimiento horizontal de 40 cm y uno vertical de 20 cm en 15 metros de carretera, y a la propagación de ondas sísmicas en menor escala.

4.4.2 *Redes de distribución de agua potable*

Las redes de agua están compuestas por 95,8 km de tuberías de diversos materiales: cloruro de polivinilo (PVC), hierro fundido (HF), asbesto cemento (AC) y hierro galvanizado (HG), en diámetros que van desde 18 mm (3/4") hasta 350 mm (14").

Cuadro 6.9 Fallas provocados por el terremoto en las tuberías de distribución

Tipo tubo	Longitud	# Fallas	Fallas/km
PVC	43,7 km	246	5,6
HF	23,1 km	34	1,5
AC	20,5 km	81	4,0
HG	8,5 km	39	4,6

Fuente: Referencia (2)

Cuadro 6.10 Distribución de fallas por tipo de tubería y diámetro en las tuberías de distribución

Tipo	Diámet. (mm)	Total fallas	Falla tubo	Falla unión	Falla Te	Desc. Te	Comp. telesc.	Extrac. junta
PVC	18-62	121	77 (64%)	5 (4%)	22 (18%)	14 (12%)		3 (2%)
	75-150	125	35 (28%)		6 (5%)	31 (25%)	6 (5%)	47 (37%)
HF	75-150	34	10 (29%)			4 (12%)	2 (6%)	18 (53%)
AC	75-150	54	54 (100%)					
	200-250	26	26 (100%)					
	300-350	1				1 (100%)		
HG	18-62	39	1 (3%)	34 (87%)		4 (10%)		

Fuente: Referencia (2)

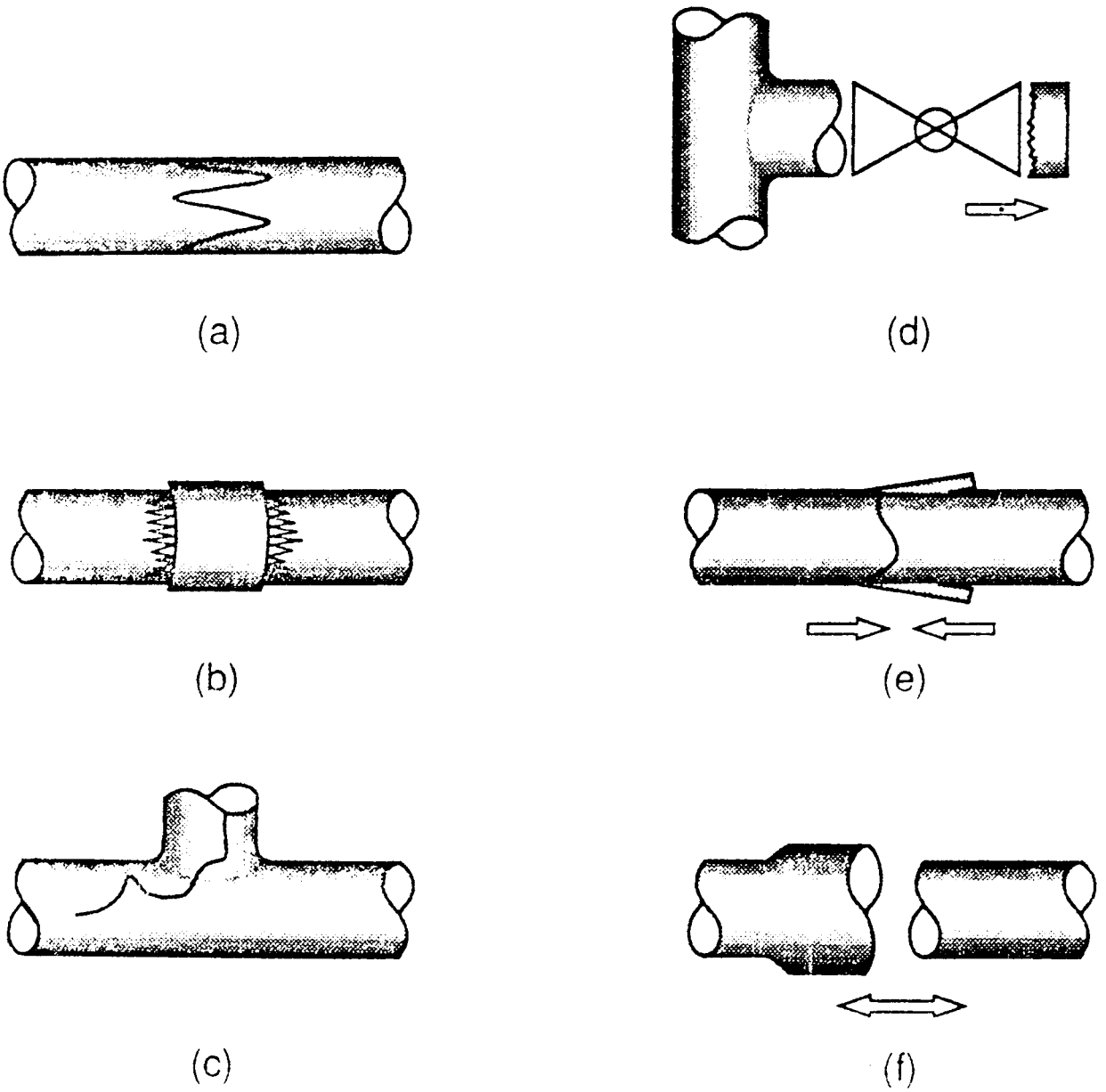
4.4.3 *Tanques de almacenamiento*

El único en sufrir daños fue el tanque Las Pilas, presentando fisuras en la unión de paredes, fondo y techo.

4.5 Alcantarillado sanitario

Donde más daños se presentaron fue en la conexión domiciliaria y la red (entre la caja de registro y el colector) reportándose más de 100 daños. En los colectores el daño más generalizado fue fracturamiento de los tubos de alcarraza y concreto (80 daños). También se dio la inversión de pendientes provocada por el levantamiento cosísmico en veinte tramos identificados, especialmente en el centro de Limón. Igualmente debido al levantamiento cosísmico quedó al descubierto la descarga al mar de aguas crudas, haciendo necesario la adición de mas tubería para volverla a dejar bajo el nivel del mar.

Figura 6.15 Tipos de fallas encontrados en las tuberías



Fuente: Referencia (2)

a) Falla en el cuerpo del tubo; b) Falla en una pieza de unión; c) Falla en una Te; d) Desconexión de una Te; e) Compresión telescópica de la junta; f) Extracción por tensión en la junta

5. COMPARACIÓN ENTRE LAS FALLAS REALES Y ESTIMADOS EMPÍRICOS

Las estimaciones empíricas de las posibles fallas que pueda sufrir una tubería de ciertas características ante la acción de un evento sísmico dependen directamente de factores como las deformaciones permanentes del suelo (DPS) y la propagación de ondas sísmicas (POS). Esta última se relaciona a su vez con la intensidad en la escala Mercalli modificada (IMM) y la velocidad pico (Vmáx) de movimiento del suelo.

En la figura 6.16 se indica la razón de daño (fallas/km) para diversos tipos de tuberías según la intensidad Mercalli modificada esperada en sitio. Puede observarse (cuadro 6.11) que los valores estimados para intensidades Mercalli modificadas de VIII y IX, estimadas para la ciudad de Limón, están por debajo de los índices de daño reales.

En la figura 6.17 se indica el índice de daño esperado según la velocidad pico de movimiento del suelo, independiente del tipo de tubería. Para la ciudad de Limón, con velocidades pico de 45 cm/s en suelos blandos se espera un índice de daños de 0,50 fallas/km, mientras que el valor real observado máximo fue de 7,7 fallas/km para la tubería TCCR.

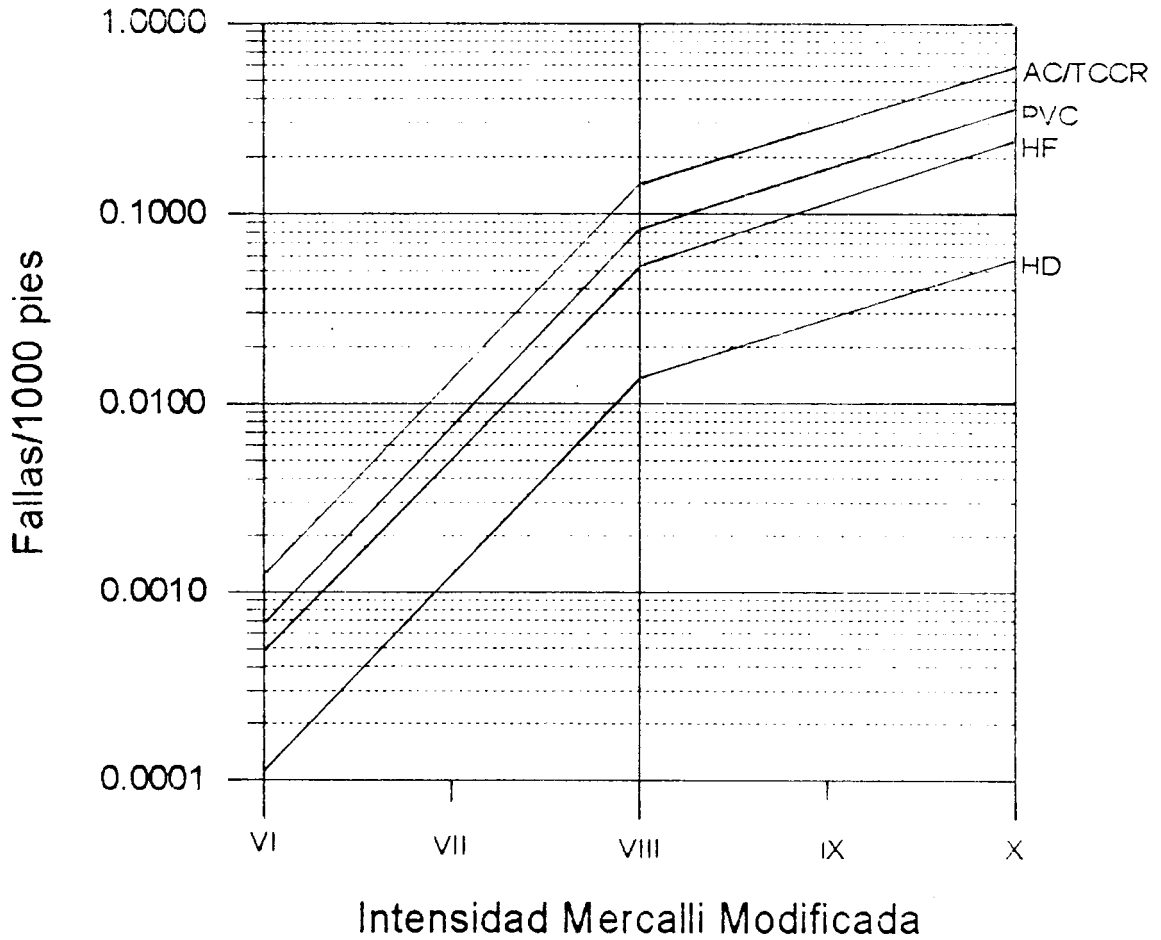
En la figura 6.18 se representa la razón de daño esperado para tuberías de hierro fundido según la intensidad Mercalli modificada esperada en sitio. Puede observarse que, según O' Rourke, para las intensidades Mercalli de VIII y IX que se dieron en los alrededores de Limón se espera un índice de daños de 0,55 y 4,2 fallas/km, respectivamente (cuadro 6.13). El promedio de estos dos valores (2,38 fallas/km) esta muy cercano al índice real de daño observado (2,10 fallas/km).

En la figura 6.19 se representa la razón de daño esperada para tuberías de hierro fundido según el levantamiento cosísmico vertical esperado en sitio. Puede verse que para los valores de 55 centímetros y 150 centímetros de levantamiento generados en los alrededores de Limón, se predicen valores muy altos con respecto a los observados (cuadro 6.13).

5.1 Fallas inducidas por propagación de ondas vs intensidad mercalli modificada

Para relacionar el daño sufrido por las tuberías debido a la propagación de ondas sísmicas con la intensidad en sitio según la escala Mercalli modificada se usan las curvas de Eguchi (figura 6.16).

Figura 6.16 Fallas en tuberías en relación a intensidad Mercalli modificada (según Eguchi)



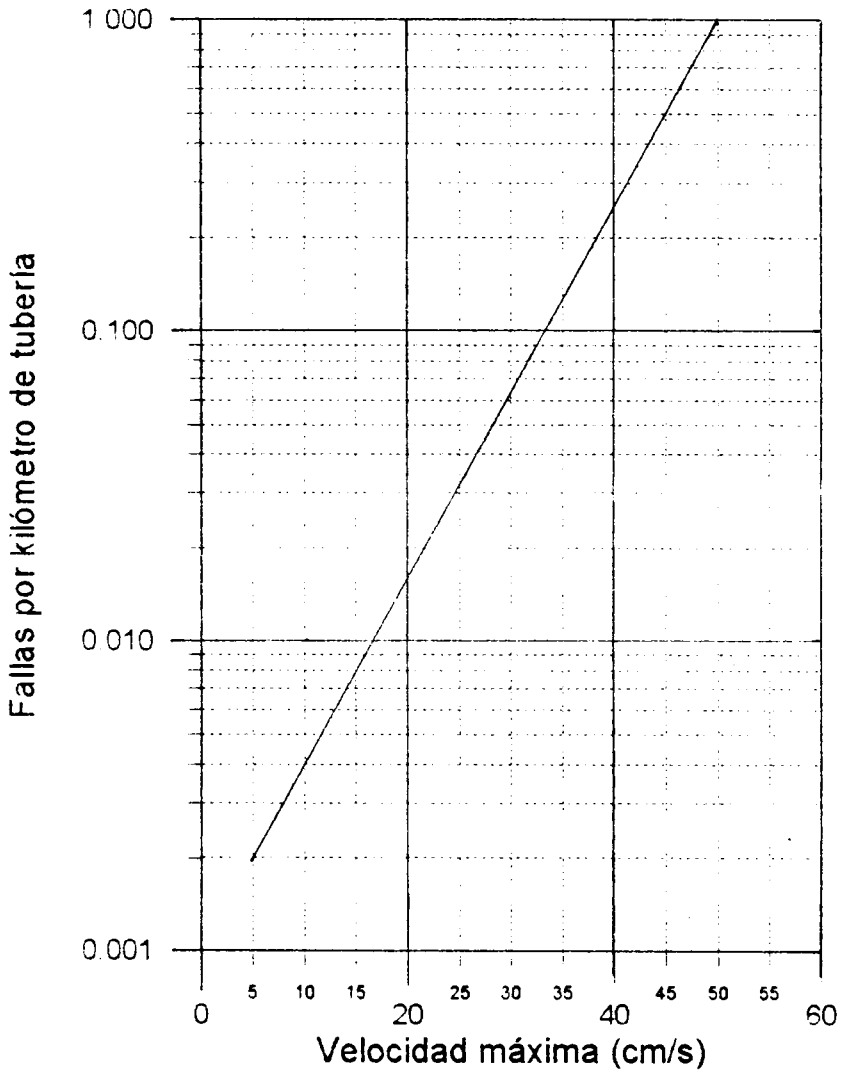
AC = Asbesto cemento; TCCR = Tubo cilíndrico de concreto reforzado; PVC = Cloruro de polivinilo; HF = Hierro fundido; HD = Hierro dúctil

Fuente: Referencia (2)

5.2 Fallas inducidas por propagación de ondas vs velocidad máxima

Otro parámetro que se relacionan con las fallas causadas por la propagación de ondas es la velocidad máxima (pico) de movimiento del suelo. Para este tipo de análisis se utiliza la relación de O'Rourke y Ayala que es independiente del tipo de tubo y de su diámetro (figura 6.17)

Figura 6.17 Fallas en tuberías con relación a la velocidad máxima del suelo según O'Rourke y Ayala

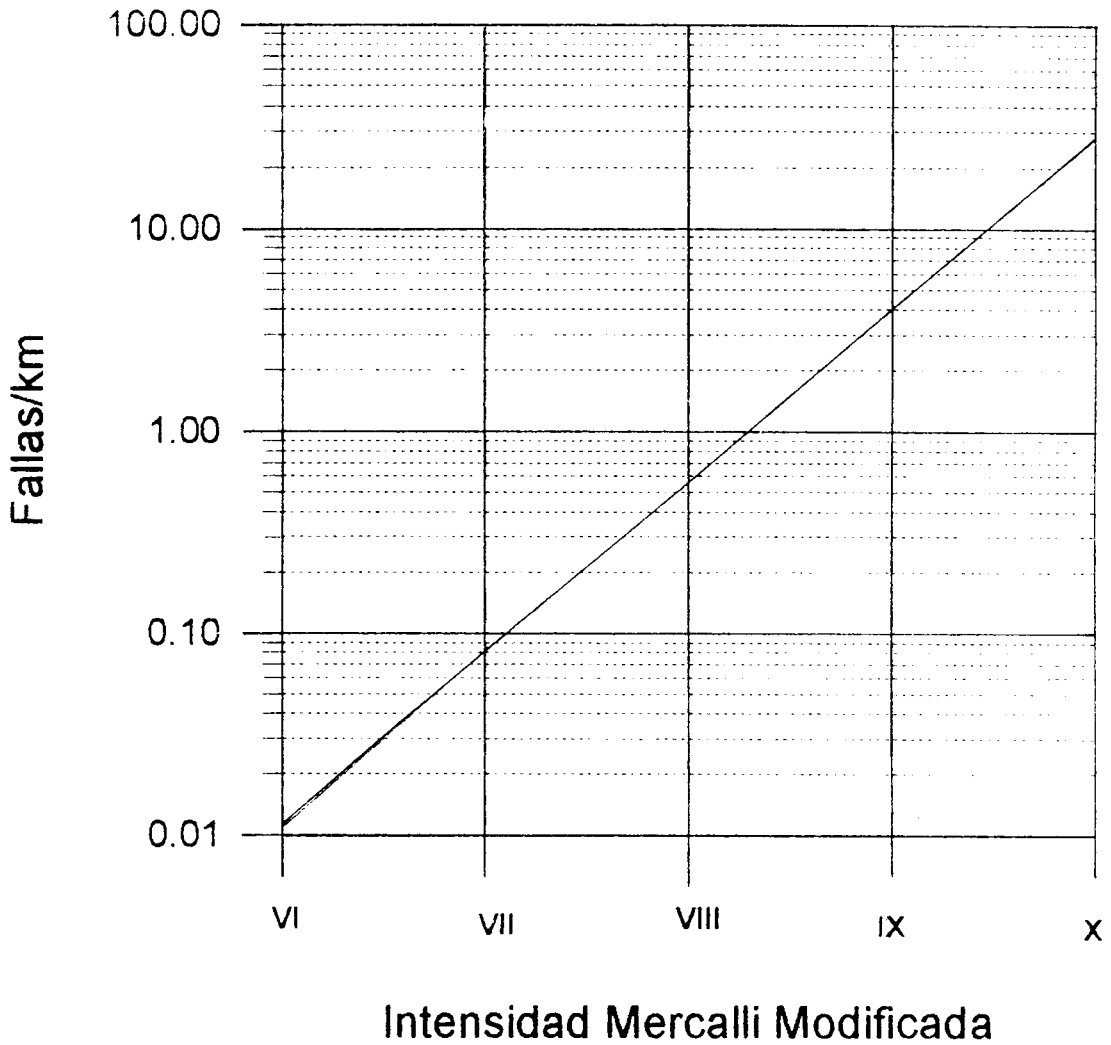


Fuente: Referencia (2)

5.3 Fallas inducidas por deformación permanente del suelo y propagación de ondas en relación a la intensidad mercalli modificada

Cuando un sismo causa deformaciones permanentes en el suelo, tales como deslizamientos, asentamientos o desplazamientos laterales en grandes masas de suelo es muy difícil separar los daños a las tuberías provocados por la propagación de ondas de los provocados por estas deformaciones. En estos casos se utilizan las curvas de relación desarrolladas por O' Rourke para tuberías de hierro fundido (figura 6.18).

Figura 6.18 Fallas combinadas en relación con la intensidad Mercalli modificada según O' Rourke

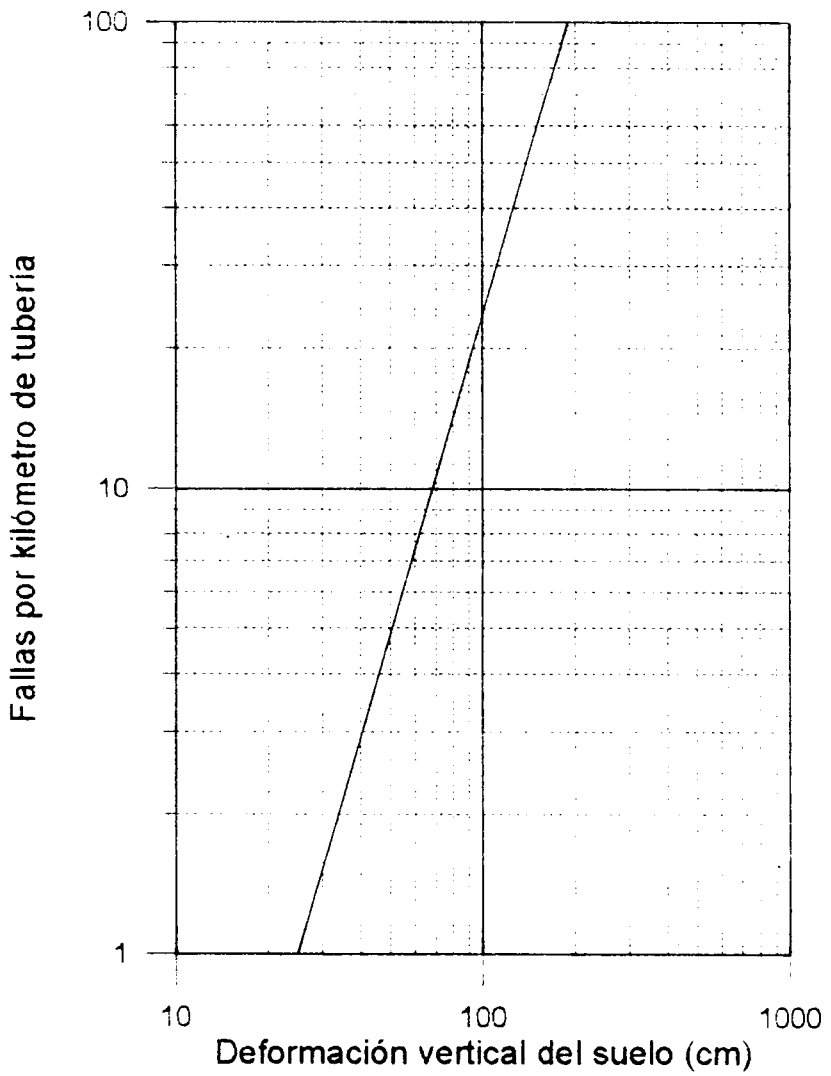


Fuente: Referencia (2)

5.4 Fallas inducidas por deformación permanente del suelo y propagación de ondas en relación a la deformación permanente vertical del suelo

Para predecir los daños esperados en tuberías debido a las deformaciones verticales permanentes del suelo (levantamiento cosísmico) se usa la relación de Barenberg, aplicable a tuberías de hierro fundido con uniones semirígidas o pobremente soldadas (figura 6.19).

Figura 6.19 Fallas combinadas en relación a la deformación permanente vertical del suelo según Barenberg



Fuente: Referencia (2)

Cuadro 6.11 Fallas por km de tubería estimadas por Eguchi en comparación con las reales

Material	Según Eguchi		Reales
	IMM = VIII	IMM = IX	
AC/TCCR	0,37	0,82	7,7
PVC	0,26	0,49	5,6
HF	0,18	0,36	2,1
HD	0,04	0,09	5,5

Fuente: Referencia (2)

Cuadro 6.12 Fallas por km de tubería estimadas por O' Rourke y Ayala en comparación con las reales

Material	Suelo Duro (POS)	Suelo Suave (POS)	Reales (POS+DPS)
AC	0,10	0,50	4,82
HF	0,10	0,50	2,10
TCCR	0,10	0,50	7,70

Fuente: Referencia (2)

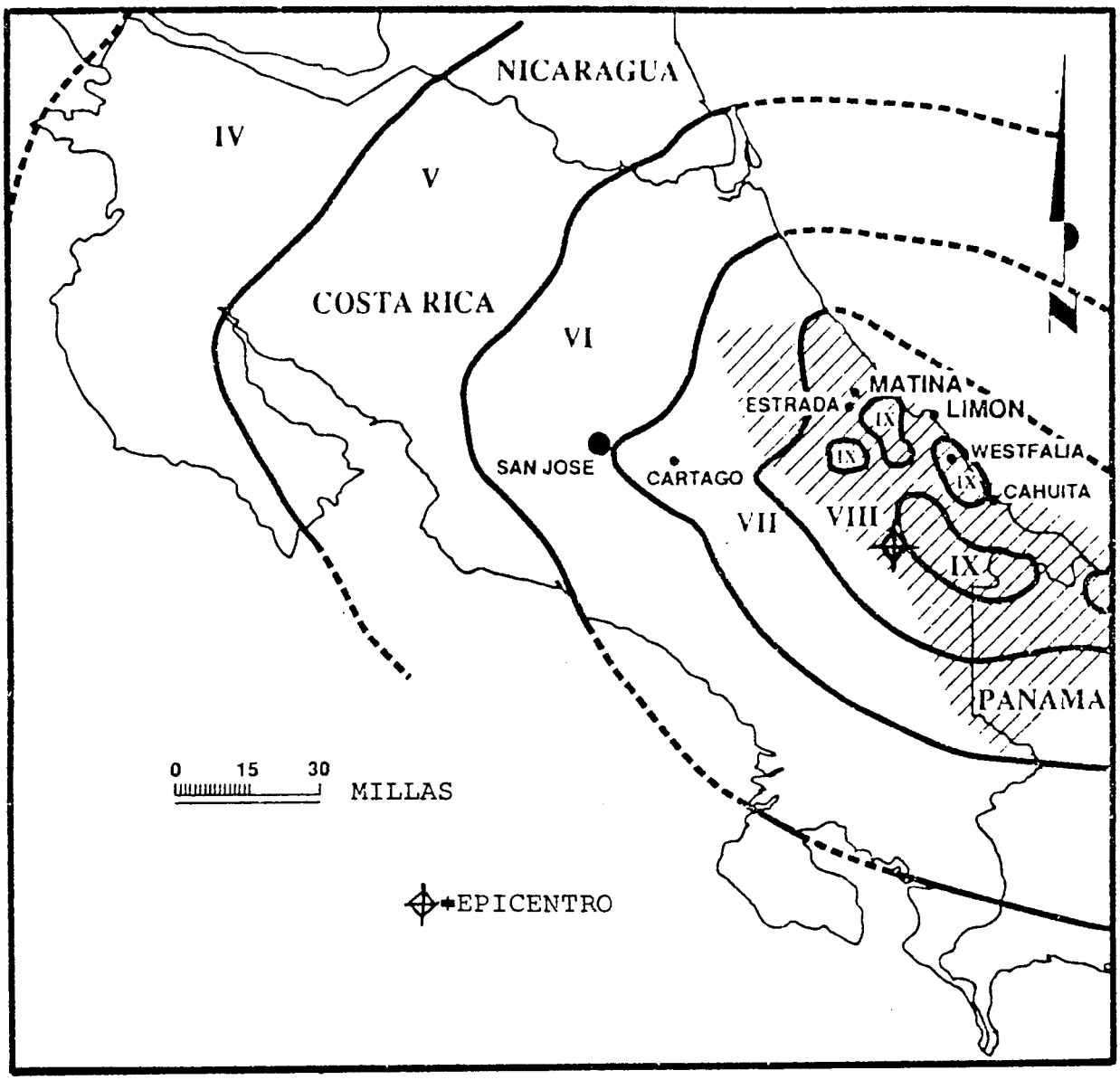
Cuadro 6.13 Fallas por km de tubería estimadas por O' Rourke y Barenberg en comparación con las reales

Material	Según O' Rourke 1 (POS+DPS)				
	IMM = VIII	IMM = IX	h=55cm	h=150cm	
HF	0,55	4,20	6,0	60,0	2,1

Fuente: Referencia (2)

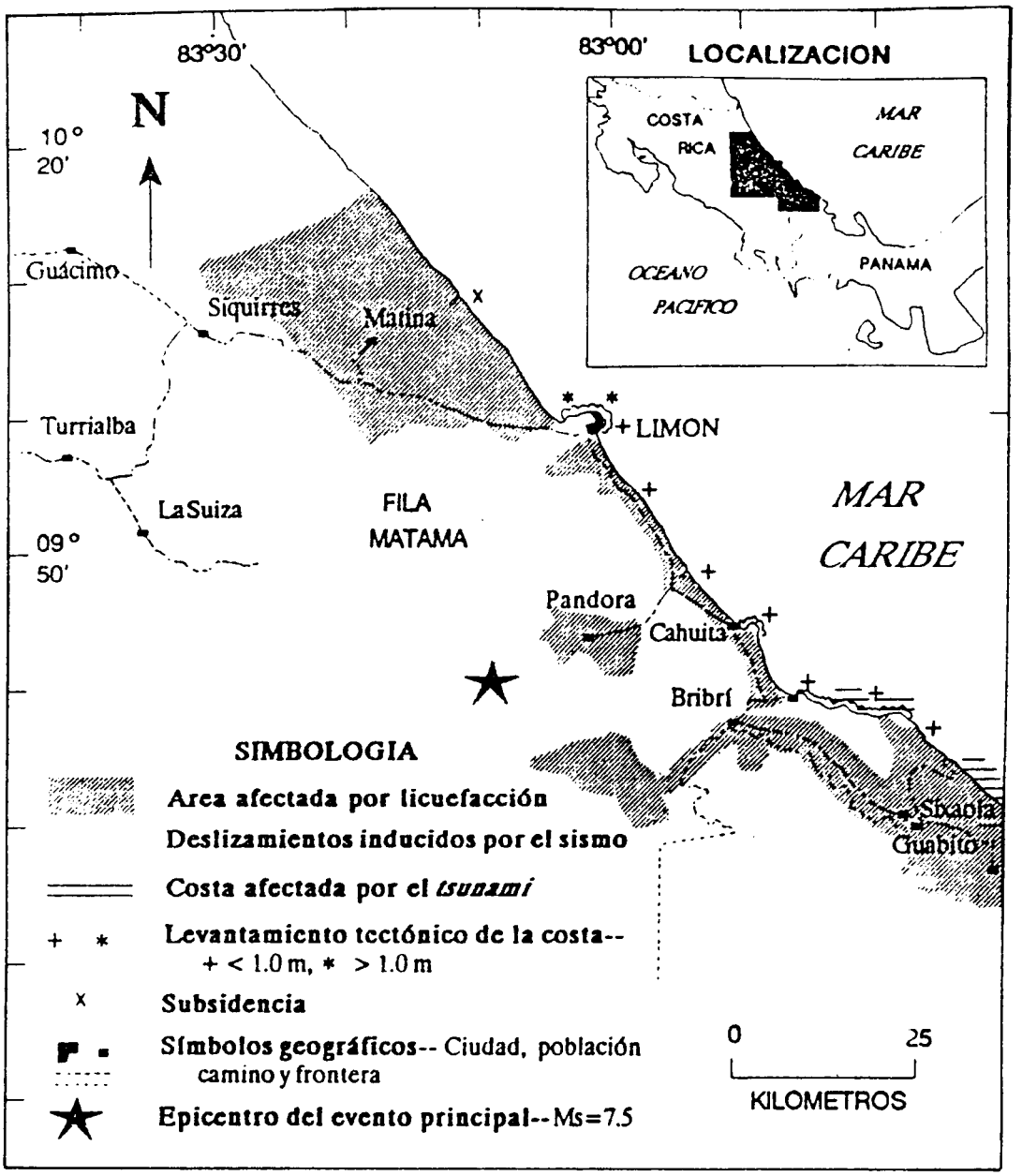
NOTA: AC = Asbesto cemento; HF = Hierro fundido; HD = Hierro dúctil; TCCR = Concreto reforzado; IMM = Intensidad Mercalli modificada; POS = Propagación de ondas sísmicas, DPS = Deformación permanente del suelo

Figura 6.6 Isosísmicas para el terremoto del 22/4/1991



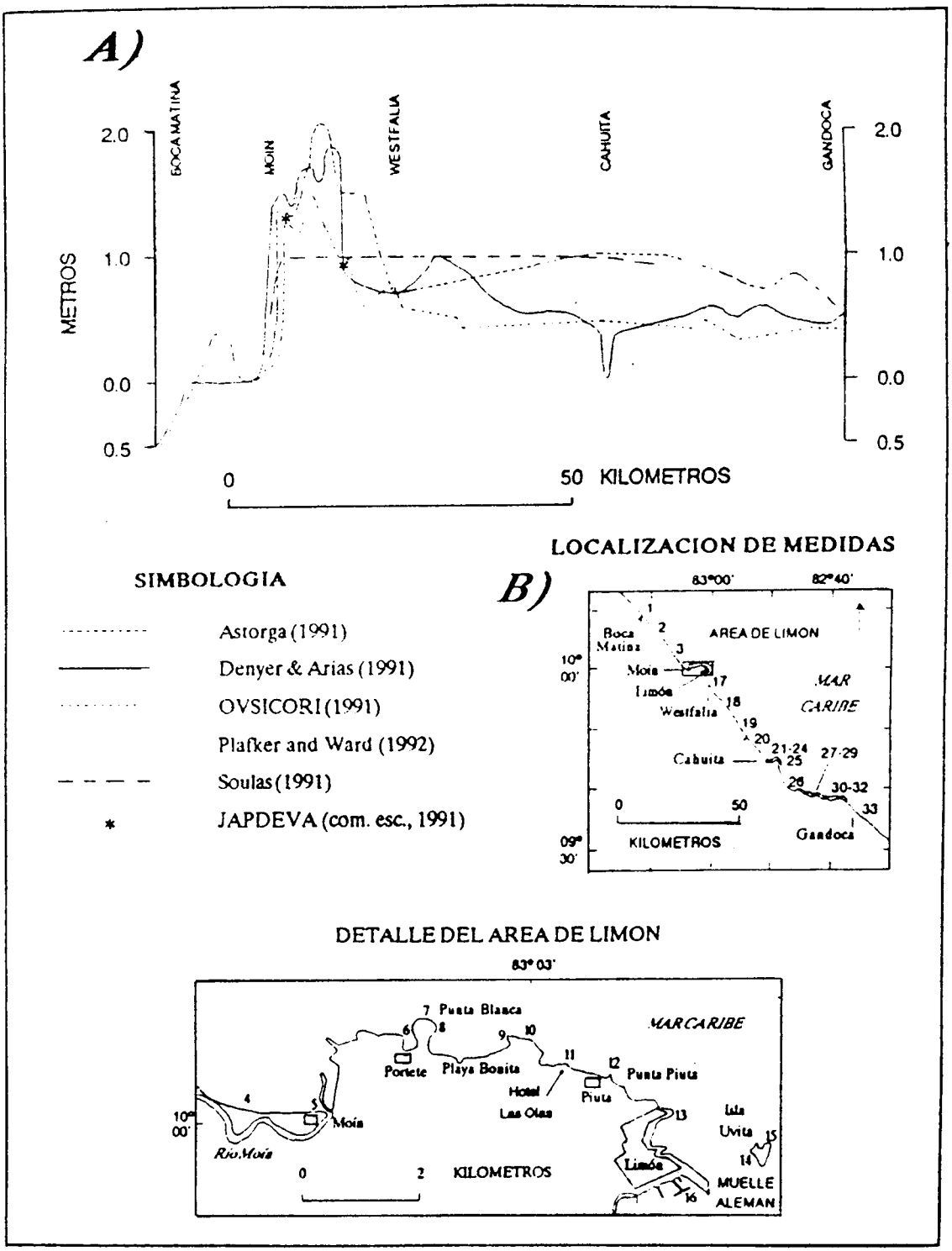
Fuente: Referencia (2)

Figura 6.7 Licuefacción generada por el terremoto del 22/4/1991



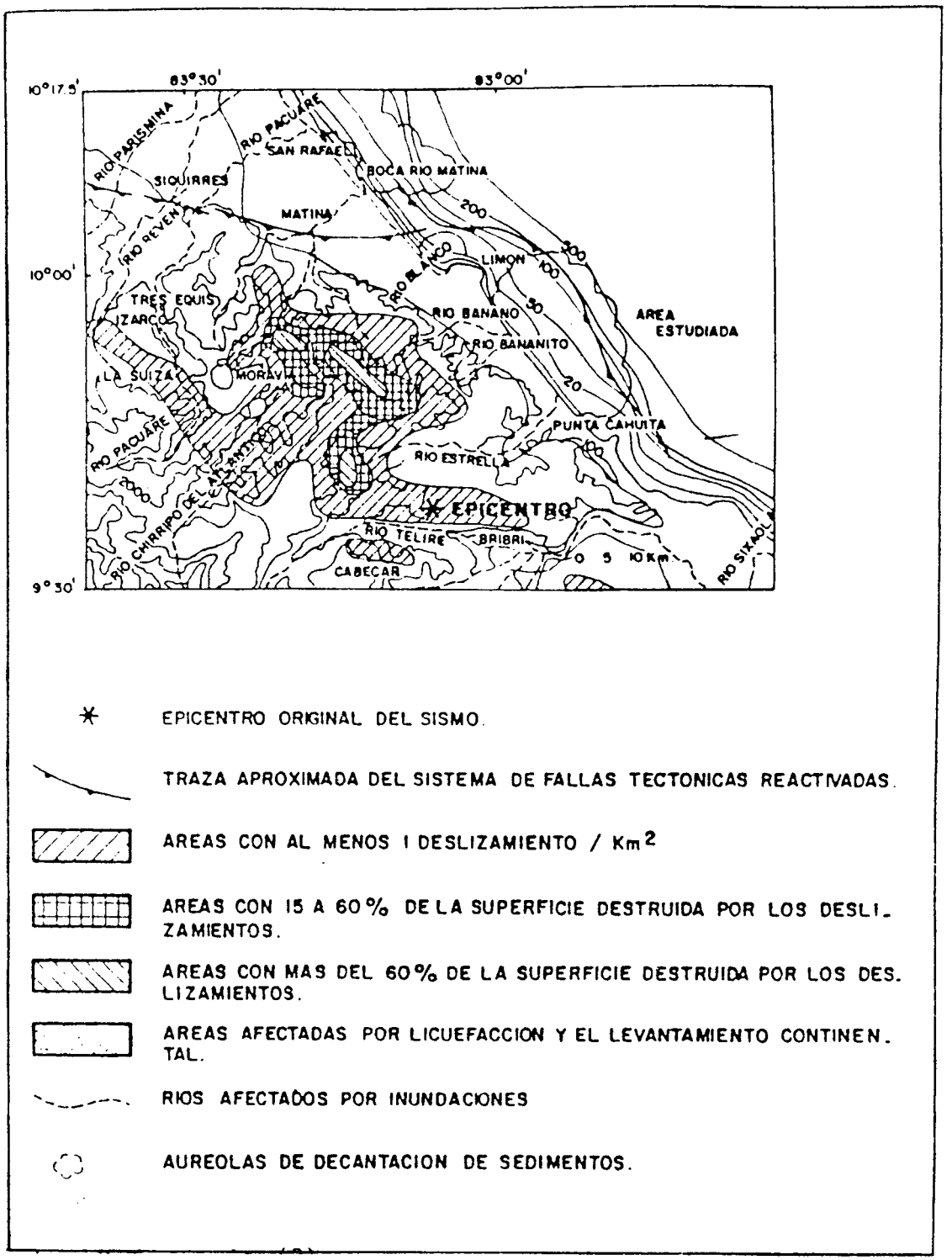
Fuente: Referencia (3)

Figura 6.8 Levantamiento cosísmico generado por el terremoto del 22/4/91



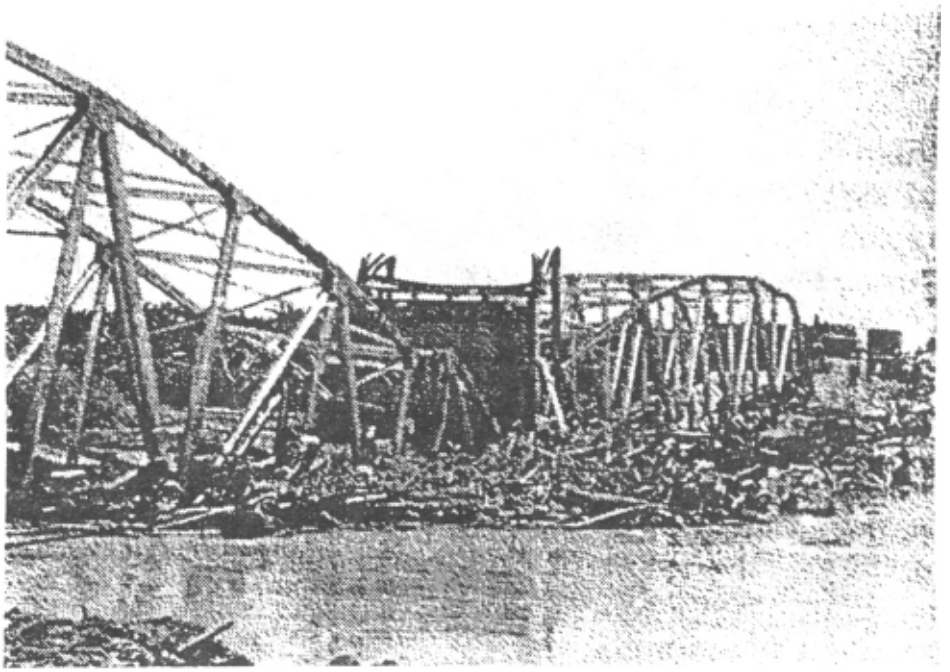
Fuente: Referencia (3)

Figura 6.9 Deslizamientos generados por el terremoto del 22/4/1991



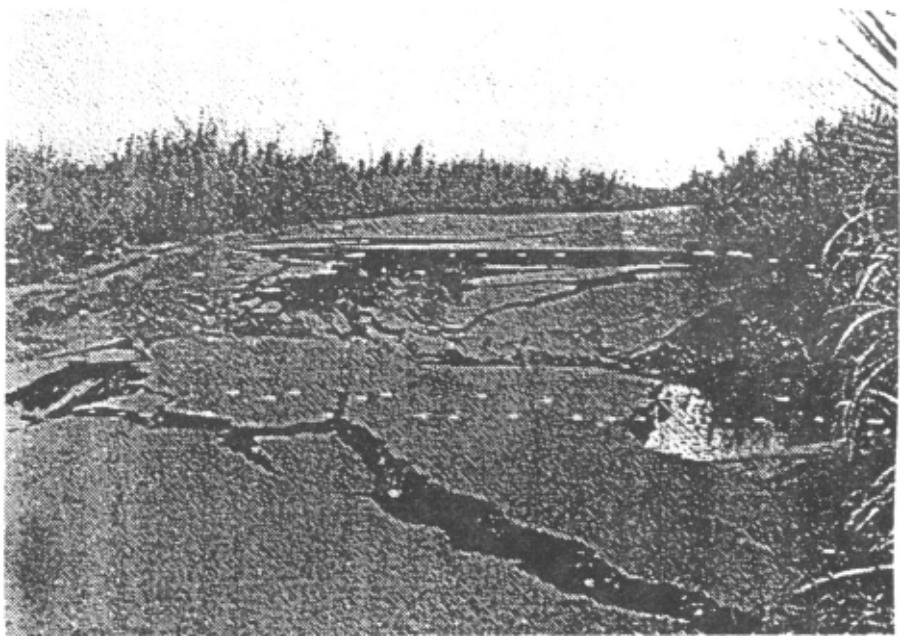
Fuente: Referencia (3)

Figura 6.10 Efectos sobre las carreteras



Fuente: Referencia (4)

a) Caída del puente sobre el río La Estrella



Fuente: Referencia (4)

b) Fractura y asentamientos de los rellenos en carreteras debido a la licuefacción

Figura 6.11 Efectos sobre las vías férreas

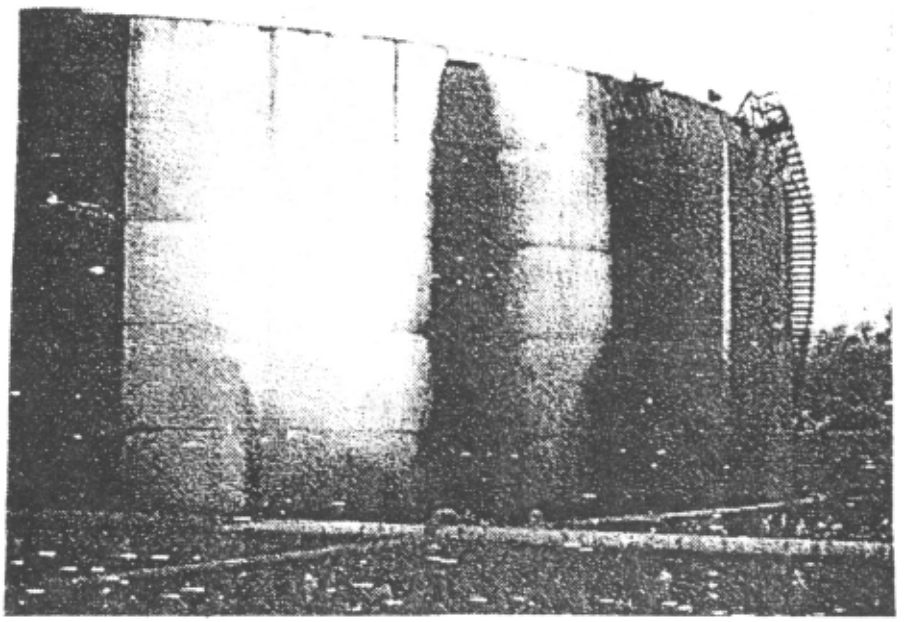
Fuente: Referencia (4)

a) Torcimiento de rieles

Fuente: Referencia (4)

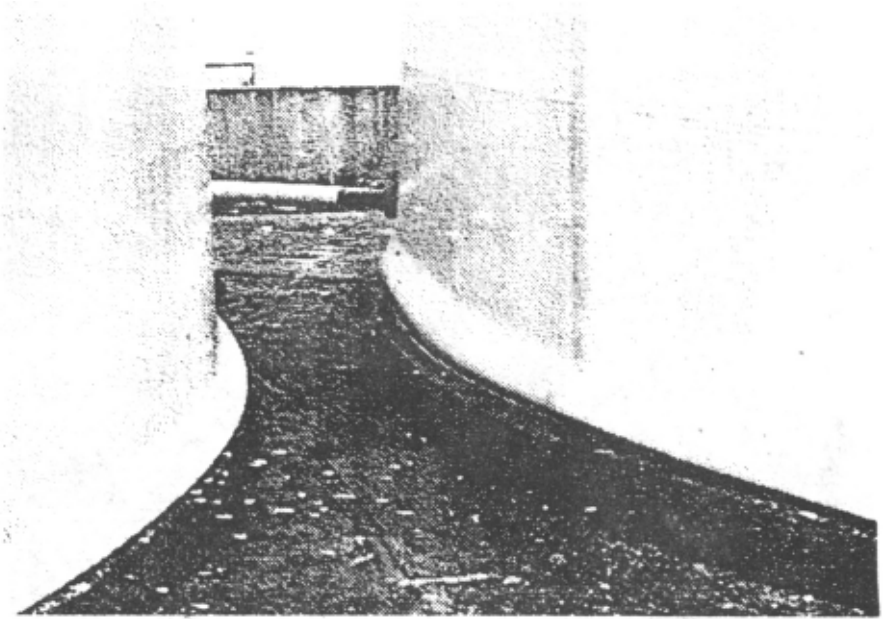
b) Desestabilización de puentes (nótese la inclinación con respecto a la vertical)

Figura 6.12 Efectos sobre la refinería de RECOPE



Fuente: Referencia (4)

a) Caída del techo por oleaje interno y derramamiento de crudo



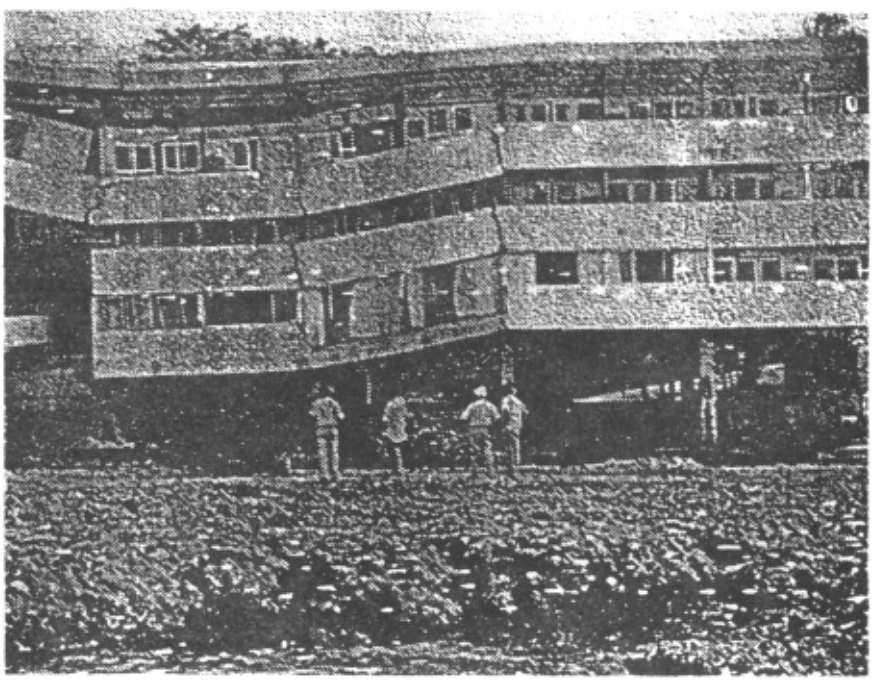
Fuente: Referencia (4)

b) Pandeo local en la base de las paredes ("pie de elefante")

Figura 6.13 Colapso total del primer piso, Hotel Internacional

Fuente: Referencia (4)

Figura 6.14 Colapso parcial Hotel Las Olas



Fuente: Referencia (4)