

01161
15

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**Estimación de Daño Sísmico en la
Red Primaria de Distribución de
Agua Potable del Distrito Federal**

TESIS DE MAESTRÍA

presentada a la División de
Estudios de Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERÍA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POR: OMAR ANDREY PINEDA PORRAS

como requisito para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Ciudad Universitaria
México D.F., noviembre de 2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas
UNAM a difundir en formato electrónico e imp
contenido de mi trabajo recepci

NOMBRE: OMAR ANDREY
PINEDA TORRES

FECHA: 13 XI 07

FIRMA: [Firma manuscrita]

A Elba

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A mis padres por su apoyo y ejemplo.

A mi familia.

A Elba, mi novia, la mujer que amo, por su apoyo y comprensión.

Al Dr. Mario Ordaz por la excelente orientación que me dio en el desarrollo de esta tesis.

A los doctores Gustavo Ayala, Sonia Ruiz, Eduardo Reinoso y Jaime García por su colaboración y cuidadosa revisión de esta tesis.

A mis profesores.

A mis amigos: Raquel, Miguel, Carlos, Nubia y Harry.

A mis compañeros de estudio.

A la UNAM y al **Instituto de Ingeniería** por el apoyo que me brindaron para la realización de esta maestría.



A **México**, país que me recibió con los brazos abiertos y me permitió cumplir este importante paso en mi vida.

ÍNDICE

ABREVIATURAS	6
1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 Antecedentes	7
1.2 Alcance	8
1.3 Resumen	9
2 IMPACTO SÍSMICO EN LAS TUBERÍAS ENTERRADAS	10
2.1 Aspectos generales de las tuberías enterradas	10
2.2 Principales modos de falla	11
2.2.1 Fallas en tuberías continuas	11
2.2.2 Fallas en tuberías segmentadas	11
2.3 Efecto de la propagación de ondas sísmicas	11
2.3.1 Ondas de cuerpo	12
2.3.2 Ondas superficiales	12
2.4 Aspectos que influyen en el comportamiento sísmico de las tuberías	13
2.5 Otros factores que influyen en el daño sísmico	13
3 MAPAS DE VELOCIDAD MÁXIMA HORIZONTAL DEL SUELO (VMHS) EN EL DISTRITO FEDERAL	15
3.1 Descripción del programa Z. (Ordaz 1996)	15
3.1.1 Cálculo en la zona de lomas	16
3.1.2 Movimiento del terreno en las zonas de lago y transición	16
3.2 Método empleado para el cálculo de la VMHS	16
3.3 Ajuste del programa Z	17
3.3.1 Eventos sísmicos utilizados	17
3.3.2 Ajuste individual de eventos sísmicos	18
3.3.3 Funciones generales de ajuste	20
3.4 Mapas de VMHS	24
3.4.1 Mapas de VMHS para los sismos utilizados en el ajuste	24
3.4.2 Mapas de VMHS para sismos postulados	32
3.5 Método simplificado para estimar la VMHS en sismos postulados	41
4 RELACIÓN EMPÍRICA DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA LA RPDAP DEL DF	46
4.1 Reseña histórica de las REVS	47

4.2 Algunos modelos de REVS	49
4.2.1 American Lifelines Alliance	49
4.2.2 REVS con datos del sismo de Loma Prieta (1989)	51
4.2.3 REVS con datos del sismo de Northridge (1994)	52
4.3 Aspectos generales de la REVS propuesta	53
4.4 Cálculo de la REVS	54
4.5 Análisis de la REVS	58
4.6 Intervalos de confianza	60
5.5 Nivel de daño saturado	68
5 ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN LA RPDAP DEL DF PARA SISMOS POSTULADOS	69
5.1 Descripción de la RPDAP	69
5.2 Descripción de los daños causados por el sismo de 1985	70
5.3 Comparación de los daños de 1985 con los obtenidos usando otros modelos de REVS	74
5.4 Mapas de vulnerabilidad sísmica relativa (MVSR)	76
5.4.1 Aspectos generales	76
5.4.2 MVSR para el sismo del 19 de septiembre de 1985	76
5.5 Estimación de daños usando la REVS propuesta	80
5.5.1 Consideraciones generales	80
5.5.2 Curvas de daño sísmico total	81
6 CONCLUSIONES	84
REFERENCIAS	88
APÉNDICE A	90
APÉNDICE B	92
APÉNDICE C	93
APÉNDICE D	98
APÉNDICE E	99

ABREVIATURAS

AMHS	Aceleración máxima horizontal del suelo
BNSF	Base nacional de sismos fuertes
CU	Ciudad Universitaria
DF	Distrito Federal
DPS	Deformación permanente del suelo
EAF	Espectro de amplitudes de Fourier
EAV	Espectro de amplitudes de velocidad
EBMUD	East Bay Municipal Utility District
FTS	Función de transferencia de sitio
LADWP	Los Angeles Department of Water and Power
MVSR	Mapa de vulnerabilidad sísmica relativa
NDS	Nivel de daño saturado
POS	Propagación de ondas sísmicas
RACM	Red acelerométrica de la Ciudad de México
REVS	Relación empírica de vulnerabilidad sísmica
RPDAP	Red primaria de distribución de agua potable
VMHS	Velocidad máxima horizontal del suelo

1 INTRODUCCIÓN

En el grupo de líneas vitales, que suplen de las necesidades básicas a una población, se encuentran principalmente: los sistemas de distribución de agua de consumo humano, las redes de recolección de aguas lluvias y de desecho, las líneas de interconexión eléctrica, las vías terrestres y sus elementos estructurales adicionales.

Los sistemas de distribución de agua de consumo humano son las líneas vitales más importantes, debido a que suplen una necesidad básica para que los pobladores de una región puedan subsistir. Por esta razón, es prioritario que en todo momento estos sistemas funcionen adecuadamente, aunque esto realmente es muy difícil de cumplir.

La Ciudad de México, considerada como una de las ciudades más grandes del mundo, cuenta con un sistema de distribución de agua potable que transporta cerca de 3 millones de metros cúbicos al día, a casi 8 millones y medio de habitantes (OPS-OMS, 2000). Debido a lo anterior, es fundamental prevenir los daños que se puedan presentar ante un inesperado evento sísmico como el ocurrido el 19 de septiembre de 1985, en el cual el 30% de la red de tuberías fue afectado y 5.3 millones de personas sufrieron la falta de agua (Ayala y O'Rourke, 1989).

Al comprender la gran responsabilidad que demanda la adecuada prestación del servicio de agua, en esta tesis se adquirió el compromiso de analizar los datos de daños disponibles del sismo de 1985, utilizar la información acerca del movimiento sísmico en el suelo del Valle de México, y desarrollar una metodología de análisis de la relación entre los daños y el movimiento del suelo. Todo con el fin de contribuir al conocimiento de la vulnerabilidad sísmica de la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) y permitir el desarrollo de planes tanto económicos, como logísticos, tendientes a superar la escasez de agua durante sismos como el de 1985.

En términos generales, la vulnerabilidad de las redes de distribución de agua potable está relacionada con la servicialidad que prestan. Una red de distribución que no pueda cumplir con su función de transportar el agua debido a una serie de factores que pueden impedirlo, se dice que es: "vulnerable a esos factores". En esta tesis se considera únicamente la vulnerabilidad de la RPDAP por causas sísmicas y se denomina: "vulnerabilidad sísmica", la cual se puede interpretar como la susceptibilidad de recibir daño causado por sismos que impida el normal funcionamiento de transportar el agua potable.

1.1 Antecedentes

Teniendo en cuenta la magnitud del daño en la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del DF a causa del sismo del 19 de septiembre de 1985, los estudios que hasta ahora se han realizado son insuficientes para cubrir los tres pasos más importantes en la administración efectiva de daños en tuberías enterradas de distribución de agua debido a sismos:

1. Identificar las zonas de posible concentración de daños. Esto se puede realizar con el empleo de: mapas de daños de sismos pasados, relaciones de vulnerabilidad sísmica, cuantificación de la deformación y curvatura del suelo (sección 2.3), análisis de elementos finitos en la red existente, entre otros.
2. Evaluar los posibles costos de reparación de la red ante escenarios sísmicos futuros.
3. Desarrollar criterios de diseño sísmico, de forma que cada tramo de tuberías al ser reparado pueda mejorar su comportamiento y reducir el número de fallas ante sismos futuros.

Cubriendo parte del primer paso, Ayala y O'Rourke (1989) recopilaron los datos de daños causados por el sismo de 1985 en la RPDAP del DF. En su informe técnico, los autores incluyen además: daños causados en el Estado de México, área epicentral del sismo y otras estructuras enterradas como la red de drenaje y el sistema de transporte Metro. Lo más relevante de este reporte es la ubicación espacial de los daños en el sismo de 1985, puesto que los análisis y cálculos realizados en esta tesis parten de esta importante información.

En otro informe, O'Rourke y Ayala (1993) junto con los datos obtenidos por Barenberg, (1988), crean un catálogo más amplio con respecto a la relación entre la propagación de ondas sísmicas y el daño de tuberías enterradas. Los datos mexicanos expuestos allí corresponden a valores promedio de daño para las zonas de lomas, transición y lago, durante el sismo de 1985, y para la zona de Tláhuac durante el sismo de 1989.

1.2 Alcance

En esta tesis se desarrollan seis tópicos relacionados con la vulnerabilidad sísmica de la red primaria de distribución de agua potable del Distrito Federal. Cada uno de ellos, está involucrado con el desempeño sísmico de la red y contribuye a cumplir gran parte de los pasos 1 y 3 mencionados en la sección 1.1. Estos tópicos, ordenados de acuerdo a su desarrollo, se presentan a continuación.

1. Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para el Distrito Federal: en la sección 3.4 se presentan los mapas de velocidad máxima para los eventos sísmicos ocurridos el 25 de abril de 1989, 14 de septiembre de 1995, 9 de octubre de 1995 y 19 de septiembre de 1985. Los registros sísmicos de estos eventos fueron utilizados en el ajuste del programa Z. También se presentan los mapas para eventos postulados tipo costeros (Ordaz *et al* 1994 y Ordaz *et al* 1995), de magnitudes 7.5, 8.0 y 8.4, para distancias focales de 250, 300 y 350 km.
2. Método simplificado para estimar la velocidad máxima del suelo en sismos postulados: este método, expuesto en la sección 3.5, permite a través de tres sencillos mapas y una ecuación, obtener el valor de la velocidad máxima horizontal del suelo, para sismos postulados de magnitudes entre 4 y 9, y distancias focales menores de 500 km. También, es posible usar un solo mapa pues las tres variables involucradas presentan colinealidad; esto, con el inconveniente de perder precisión en el cálculo.
3. Relación empírica de vulnerabilidad sísmica para la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del Distrito Federal: esta relación, descrita en el capítulo 4 y base fundamental de esta tesis, permite conocer cuál es el daño esperado, expresado como el número de reparaciones por kilómetro de tubería, para cada nivel de velocidad máxima del suelo. Esta curva permite conocer el número esperado de fugas en la red, para un determinado escenario sísmico, representado por un mapa de distribución de velocidades máximas.
4. Comparación de la vulnerabilidad sísmica de la RPDAP con otros sistemas de distribución de agua: esta comparación, mostrada en la sección 5.3, fue realizada al aplicar tres relaciones de vulnerabilidad elaboradas con datos de daño de otros sistemas de distribución de agua, a los mapas de distribución de velocidades máximas del Distrito Federal, para el sismo del 19 de septiembre de 1985. El resultado muestra que la red en estudio es altamente vulnerable con respecto a otros sistemas de distribución de agua.
5. Mapa de vulnerabilidad sísmica relativa para la RPDAP del DF: este mapa, presentado en la sección 5.4, identifica las zonas con alta vulnerabilidad de daños en tuberías enterradas. Esto permite desarrollar planes estratégicos para la superación de catástrofes sísmicas en la red en estudio, puesto que da pistas claves en la localización de daños.

6. Curvas de daño para sismos postulados: estas curvas, presentadas en la sección 5.5, permiten cuantificar el posible daño de un sismo de determinada magnitud y distancia focal. El daño se cuantifica como el número esperado de fugas, que al ser multiplicado por el valor esperado unitario permite calcular el costo total de reparación de la red.

1.3 Resumen

El capítulo 2 hace una introducción al impacto sísmico en tuberías enterradas. Describe brevemente cual es el comportamiento sísmico de las tuberías enterradas y la diferencia con respecto al comportamiento de estructuras convencionales. Menciona las principales causas de daños en las tuberías: la propagación de ondas sísmicas y la deformación permanente del suelo. Se hace referencia a los principales modos de falla de las tuberías y se amplían los conceptos básicos del efecto de la propagación de ondas sísmicas al producir deformación y curvatura en el suelo. Se indican los tipos de ondas y se resaltan las más perjudiciales para las tuberías. Se enumeran una serie de factores que pueden influir en el comportamiento sísmico de las tuberías y se describe brevemente su influencia en los daños. Finalmente, se presenta otro grupo de aspectos que pueden influir en el comportamiento sísmico de las tuberías y que realmente son difíciles de analizar.

En el capítulo 3 se describe la forma de obtener los mapas de velocidad máxima horizontal del suelo en el Distrito Federal. Estos mapas son importantes debido a que la relación empírica desarrollada en el capítulo 4, el mapa de vulnerabilidad sísmica relativa mostrado en la sección 5.4 y la estimación de daños de la sección 5.5 fueron realizados con aquellos. Se describe brevemente el programa de cálculo utilizado y la forma de calibrarlo a través de una función de ajuste, de manera que la estimación de la velocidad fuera cercana a los valores registrados en las estaciones acelerográficas del Distrito Federal. En la sección 3.4 se presentan los mapas de velocidad para las componentes N-S y E-W para los cuatro sismos usados en la calibración del programa, y finalmente, se incluyen los mapas de velocidad para sismos postulados.

El capítulo 4 empieza describiendo las diferentes relaciones de vulnerabilidad para los componentes de un sistema de distribución de agua. Luego, hace una reseña histórica de las relaciones de vulnerabilidad empíricas para tuberías enterradas de conducción de agua, mostrando la evolución que ha habido: desde las primeras que relacionan el daño con la Intensidad Modificada de Mercalli, pasando por las que usaban la aceleración máxima del suelo, hasta las actuales que utilizan la velocidad horizontal máxima del suelo. También se mencionan aquellas que incluían otros aspectos que influyen en el comportamiento de las tuberías. En la sección 4.2 se describen tres relaciones de vulnerabilidad importantes, las cuales son utilizadas para comparar la vulnerabilidad sísmica del sistema de distribución de agua del DF. Posteriormente, en las secciones 4.3 a 4.6, se describe la forma de calcular la REVS para la RPDAP del DF, se realiza un análisis de las ecuaciones calculadas, y finalmente, se presenta el análisis de intervalos de confianza. En la parte final de este capítulo, se expone el concepto de nivel de daño saturado. Este concepto, permite tomar decisiones de tipo constructivo y económico, cuando una red de tuberías llega a estar cerca del colapso a causa de un sismo.

En el capítulo 5 finaliza el trabajo de la presente tesis, mostrando las curvas de daño de la red ante sismos. Se hace una descripción de la red y de los daños que sufrió en el sismo de 1985, se comparan estos daños con los obtenidos con tres relaciones de vulnerabilidad hechas con datos de otros sismos. Se presenta el mapa de vulnerabilidad sísmica relativa (MVSr) para la red, basado en datos del daño causado por el sismo de 1985. Este mapa permite conocer las zonas de la ciudad más propensas a sufrir daños en las tuberías enterradas. Finalmente, se muestran las curvas de daño, donde se estima el número de fugas para sismos postulados de diferentes magnitudes y distancias focales. El modelo de sismos postulados corresponde al desarrollado por Ordaz *et al* (1994) y Ordaz *et al* (1995).

2 IMPACTO SÍSMICO EN LAS TUBERÍAS ENTERRADAS

En los edificios y demás estructuras convencionales, el efecto producido por un sismo está relacionado con la fuerza de inercia inducida, el contenido de frecuencia del movimiento sísmico y el efecto dinámico causado por el movimiento. Con respecto a las tuberías enterradas el panorama es un tanto diferente. Por una parte, las tuberías enterradas, debido a su gran longitud y poca masa, no son afectadas por la fuerza de inercia. En otras palabras, la aceleración del suelo no es un parámetro adecuado para el diseño sísmico. Por otra parte, los principales daños en las tuberías están relacionados con desplazamientos relativos entre puntos de interconexión. Estos pueden ser una consecuencia de la deformación permanente del suelo (DPS) y de las deformaciones inducidas por la propagación de ondas sísmicas (POS).

La DPS es ocasionada principalmente por deslizamientos de tierra, dispersión lateral debido a licuación del suelo y asentamientos inducidos por sismos. En la mayoría de la extensión del DF no hay presencia de DPS; ésta se limita a zonas muy pequeñas que requieren un estudio más detallado. Por esto, en la presente tesis no se incluyó la influencia de la DPS en el cálculo de daños. Además, en el sismo del 19 de septiembre de 1985 la principal causa de daños en las tuberías del DF fue el producido por la propagación de ondas sísmicas (O'Rourke, 1996), siendo un caso excepcional en el cual la DPS no tuvo efecto significativo.

Por otra parte, los desplazamientos relativos a causa de la propagación de ondas sísmicas se relacionan matemáticamente con la velocidad horizontal máxima del suelo (sección 2.3) e inducen deformaciones que generalmente no hacen parte del diseño de las tuberías, ocasionando entonces la ocurrencia de fallas, que afectan la prestación del servicio de distribución de agua.

Para ampliar la descripción del impacto sísmico en las tuberías enterradas, en este capítulo se mencionan sus principales características y comportamiento sísmico, los principales modos de falla, se hace una breve introducción al efecto producido por la propagación de ondas sísmicas y se enumeran algunos factores que pueden influir en el daño por causas sísmicas en las tuberías.

2.1 Aspectos generales de las tuberías enterradas

Con respecto a su sistema de construcción, las tuberías que generalmente funcionan bajo tierra se pueden clasificar en continuas y segmentadas. Cada uno de estos tipos de tuberías tiene modos de falla diferentes.

Las tuberías continuas en su mayoría son metálicas y plásticas, y poseen juntas rígidas. Su comportamiento sísmico es mejor que las construidas con otros métodos. Por otra parte, las tuberías segmentadas consisten en tramos de tubo conectados por juntas, que generalmente son flexibles, y tienen varios modos de falla que los hacen vulnerables a los efectos sísmicos.

Los materiales más usados para la construcción de tuberías son: hierro fundido, acero, asbesto cemento, hierro dúctil y concreto. Adicionalmente hay sistemas constructivos que combinan materiales, como las tuberías

de concreto con cilindros de acero. Otro material muy utilizado es el PVC, que es relativamente moderno y cuyo uso se ha difundido ampliamente.

2.2 Principales modos de falla

Los modos de falla en tuberías enterradas dependen de las características de la tubería y pueden ser afectados por su estado de integridad. Por ejemplo, la corrosión y otros factores relacionados con el medio ambiente externo (Ej: tipo de suelo) pueden hacer más vulnerable a la tubería a determinadas formas de falla.

2.2.1 Fallas en tuberías continuas

Las tuberías continuas fallan principalmente debido a pandeo local debido a compresión axial. Otros modos de falla poco frecuentes son las causadas por flexión y por tensión axial.

El pandeo local causado por excesiva compresión axial produce pliegues en la tubería en los cuales se concentran los esfuerzos inducidos por el desplazamiento relativo entre los extremos (acortamiento) causado por la propagación de ondas sísmicas y la deformación permanente del suelo, cuando los esfuerzos superan los valores límites se producen grietas circunferenciales que causan fugas. En el sismo de Michoacán (1985) se observó este tipo de fallas en tuberías de conducción de agua, causadas por la propagación de ondas sísmicas. (M.J. O'Rourke y X. Liu, 1990)

Las fallas por flexión y por tensión son casos que no ocurren con frecuencia debido a la gran ductilidad que desarrollan las tuberías continuas, porque generalmente están hechas de materiales metálicos que permiten amplias deformaciones sin presentar fisuras.

2.2.2 Fallas en tuberías segmentadas

Las tuberías segmentadas son más vulnerables a la propagación de ondas sísmicas y sus modos de falla dependen de los desplazamientos relativos que sufre la masa de suelo que rodea la tubería.

Cuando el suelo experimenta deformaciones por compresión, la tubería puede fallar por aplastamiento de la conexión (campana y espiga) e incluso puede haber incrustación de un segmento dentro de otro.

Cuando la deformación del suelo es causada por tensión, la falla típica en las tuberías segmentadas es la desconexión. Esto ocurre principalmente cuando el desplazamiento relativo inducido por el suelo a la tubería es superior a la holgura interna de la conexión (longitud de la espiga dentro de la campana).

En el caso donde la masa de suelo presenta curvatura debido a desplazamientos no uniformes, se pueden presentar fallas por flexión en segmentos de tuberías de diámetro pequeño.

2.3 Efecto de la propagación de ondas sísmicas

En la evaluación del posible daño a causa de sismos potenciales futuros, típicamente se utilizan correlaciones empíricas entre el daño sísmico observado (Ej: número de fugas por kilómetro) y alguna medida de movimiento del suelo a causa de sismos (Ej: velocidad máxima horizontal del suelo), (O'Rourke, 1996). En esta tesis estas correlaciones se denominan relaciones empíricas de vulnerabilidad sísmica (REVS, capítulo 4) y relacionan el daño, medido como el número de fugas por kilómetro de tubería, con la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS).

Las REVS únicamente sirven para cuantificar los daños esperados y no pueden ser utilizadas ni en análisis, ni en diseño de tuberías enterradas; en su lugar, se usan la deformación y curvatura del suelo.

La propagación de ondas sísmicas es la causante de la deformación y curvatura de la masa de suelo que rodea a la tubería y la perjudica por la restricción inducida en ella. Newmark (1967) demostró que la deformación máxima del suelo en tensión o compresión en la dirección de la propagación de la onda está dada por:

$$\varepsilon_g = V_m / C$$

donde V_m es la velocidad máxima horizontal del suelo causada por movimientos sísmicos y C es la velocidad de propagación de la onda sísmica. De igual forma, Newmark (1967) estimó la máxima curvatura del suelo, k_g , como:

$$K_g = A_m / C^2$$

donde A_m es la máxima aceleración del suelo perpendicular a la dirección de propagación de la onda (onda de cuerpo o superficial).

Estas expresiones deben ser modificadas si la dirección de interés no es paralela a la dirección de propagación de la onda. A_m y V_m pueden ser estimadas usando leyes de atenuación o a partir de registros sísmicos de estaciones cercanas. C varía si las ondas consideradas son de cuerpo o superficiales.

2.3.1 Ondas de cuerpo

Estas ondas son producidas por fallas sísmicas y son más rápidas que las superficiales. Están compuestas por las ondas P y S: Las P son ondas en las cuales la tierra se mueve paralela a la dirección de propagación generando deformaciones alternadas de compresión y tensión; las S son ondas de cortante en las cuales los movimientos de la tierra son perpendiculares a la dirección de propagación.

Las ondas S son las que más perjudican a las tuberías puesto que llevan más energía y tienden a deformar más el suelo, en comparación con las ondas P. El valor de la velocidad aparente C para las ondas S y P es infinito si la incidencia es vertical.

2.3.2 Ondas superficiales

Estas ondas son generadas por reflexión y refracción de ondas de cuerpo y viajan sobre la superficie de la tierra. La amplitud de su movimiento decrece con la profundidad. Están conformadas por las ondas Rayleigh (ondas R) y Love (ondas L): En las ondas R la partícula traza un movimiento retrógrado elíptico en un plano vertical con la componente horizontal de movimiento, siendo paralelas a la dirección de propagación; en las ondas L el movimiento de la partícula es a lo largo de una línea horizontal perpendicular a la dirección de propagación.

De las ondas superficiales, sólo las ondas R son generalmente consideradas para el análisis y diseño de tuberías enterradas debido a que su movimiento retrógrado elíptico en el plano vertical induce grandes deformaciones en comparación con las producidas por las ondas L, para un medio estratificado.

Debido a que las ondas R siempre viajan paralelas a la superficie del suelo, su velocidad de fase C_{ph} es la velocidad de propagación aparente y es función de la variación de la velocidad de onda cortante con la profundidad y, a diferencia de las ondas de cuerpo, es también función de la frecuencia. El valor de C_{ph} se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{ph} = \lambda f$$

donde f es la frecuencia y λ es la longitud de onda. La variación de C_{ph} con la frecuencia se representa con una curva de dispersión.

Las ondas al propagarse desde la fuente hasta la tubería pueden estar afectadas por diversos factores tales como la atenuación, heterogeneidad e anisotropía del suelo, cambios bruscos del suelo, entre otros.

2.4 Aspectos que influyen en el comportamiento sísmico de las tuberías

En general, los análisis del daño producido en tuberías a causa de sismos relacionan el número de fugas por unidad de longitud con alguna medida de intensidad sísmica (sección 4.1). Estos análisis son válidos para todas las tuberías sin diferenciar sus características particulares.

Sin embargo, al recopilar datos de daños causados por diversos sismos en el mundo, se ha logrado establecer una serie de aspectos claves que influyen en el comportamiento sísmico de las tuberías. Entre estos aspectos se encuentran el tipo de suelo, el diámetro, material y tipo de conexión de la tubería. El trabajo más aceptable y reciente, que reúne información de diversos sismos del mundo, y tiene en cuenta éstos aspectos es el desarrollado por la American Lifelines Alliance, A.L.A. (2001); a partir del cual, el nivel de daño se puede caracterizar de la siguiente forma.

- Tipo de suelo: La tasa de daño será mayor en suelos blandos que en duros. Entre más corrosivo sea el suelo la tasa de daño será mayor.
- Diámetro de la tubería: A mayor diámetro menor la tasa de daño para materiales metálicos y lo contrario para materiales frágiles como el concreto.
- Material: En tuberías continuas, los materiales metálicos, al tener mayor ductilidad, producen una menor tasa de daño respecto a los demás materiales.
- Tipo de conexión: Entre mayor sea la flexibilidad de la conexión menor será la tasa de daño.

Es importante advertir que este patrón de daño es muy general y corresponde a la observación de muchos datos de daños.

2.5 Otros factores que influyen en el daño sísmico

Aunque al considerar los cuatro aspectos mencionados en la sección anterior la estimación de daños es más precisa, existen otras razones que influyen en el comportamiento sísmico de la tubería y no han sido correlacionados con el daño, posiblemente debido a la insuficiencia de datos, la baja influencia en el comportamiento sísmico y a que la mayoría se presentan en zonas pequeñas.

En tuberías enterradas construidas hace varias décadas, la subsidencia acumulada de muchos años puede afectar la capacidad de resistencia de la tubería. Esto se observó en el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Ayala y O'Rourke, 1989), en el cual se cree que la subsidencia fue la causa de la reducción de resistencia de algunas

tuberías del sureste del DF, provocando fugas ante niveles de aceleración y velocidad del suelo en los cuales en condiciones normales el daño sería menor o posiblemente no existiría.

La reducción de la resistencia de las tuberías a causa del envejecimiento de la tubería y corrosión es otro factor que no se considera explícitamente en los análisis de daños. Otros factores que también pueden influir en el daño en tuberías enterradas son:

- La reducción de la capacidad de carga del suelo causada por el efecto acumulado de sismos.
- El cambio en las propiedades originales del suelo producto de los cortes y rellenos propios de la construcción de las redes de tuberías.
- La variación espacial de la presión que ejerce el suelo en la tubería.
- Los cambios abruptos en la rigidez debido a variabilidad en el material o diámetro de la tubería.

3 MAPAS DE VELOCIDAD MÁXIMA HORIZONTAL DEL SUELO (VMHS) EN EL DISTRITO FEDERAL

Tal como se menciona en el capítulo 4, las relaciones de vulnerabilidad utilizadas en esta tesis están en función de la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS). Esto se debe a que, tal como se describe en el apéndice E, la VMHS está mejor correlacionada con los daños en la red en estudio que la aceleración máxima del suelo.

Con el propósito de hacer una adecuada estimación de la VMHS para cada punto de la red de tuberías en estudio, se utilizó el programa Z, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con patrocinio del Departamento del Distrito Federal (Ordaz 1996). Este programa inicialmente estaba orientado a determinar espectros de respuesta de sitio en el DF. Para ser usado en esta tesis fue modificado de forma que puede calcular las componentes N-S y E-W de la VMHS en un sitio específico; esto se realizó utilizando funciones de ajuste a los modelos originalmente propuestos.

Las funciones de ajuste calculadas permiten hacer una mejor estimación de la VMHS, con el fin de superar la insuficiencia de datos del programa Z en bajas frecuencias (inferiores a 0.3 Hz). Para la determinación de las funciones de ajuste, se utilizaron 152 registros sísmicos tomados de la Base Nacional de Sismos Fuertes (BNSF), pertenecientes a cuatro importantes sismos de diferentes magnitudes. Se procedió a calcular la VMHS con el programa Z y se comparó con la obtenida a partir de los registros sísmicos. Se utilizó entonces un factor de corrección de forma que el error calculado entre la VMHS observada y la calculada fuera mínimo.

En este capítulo se presenta una breve descripción de los conceptos básicos del programa Z y adicionalmente se describe el método de cálculo empleado para la obtención de la VMHS. Se muestran los mapas de velocidad de los cuatro eventos sísmicos estudiados, las funciones de ajuste para sismos postulados y los mapas de VMHS para sismos postulados. En la parte final, se incluye un procedimiento sencillo para estimar la VMHS en cualquier punto del Distrito Federal para sismos postulados, con una magnitud y distancia focal determinada.

3.1 Descripción del programa Z. (Ordaz 1996)

El programa Z es una valiosa herramienta que sirve para calcular espectros de sitio en cualquier lugar del DF ante temblores históricos o postulados. Con él se pueden obtener espectros de respuesta ante movimientos del suelo reconocidos como temblores de diseño. Esto es posible gracias a la información referente a la respuesta sísmica en el Valle de México contenida en el programa.

3.1.1 Cálculo en la zona de lomas

Castro, *et al* (1988) crearon un modelo empírico para estimar las amplitudes del espectro de Fourier (EAF) para el sitio Ciudad Universitaria (CU). Los EAF permiten cuantificar las amplitudes del movimiento en la superficie del terreno. Este modelo se basa en la regresión lineal de los datos a partir de una forma funcional que está de acuerdo con modelos teóricos de fuente (McGuire, 1978).

Debido a la insuficiencia de datos, Ordaz *et al* (1994) construyeron un modelo de regresión basado en el teorema de Bayes. Al caracterizar el movimiento del terreno por medio de sus EAF se sustituye la estimación de aceleración y velocidad máximas del terreno para definir los espectros de respuesta (Esteva, 1970). La regresión de las amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en CU preserva los rasgos prominentes debidos a la amplificación regional señalada por Ordaz y Singh, (1992), que según Singh *et al* (1994) está presente en todo el valle de México.

3.1.2 Movimiento del terreno en las zonas de lago y transición

La estimación de las amplitudes del movimiento del terreno en sitios instrumentados se realiza a través del uso de las funciones de transferencia de sitio (FTS) propuesto por Ordaz *et al* (1989). Al conocer el EAF para el sitio de referencia CU, el EAF para el sitio de interés se puede estimar mediante el producto entre la FTS y el EAF de CU.

Las FTS se calculan a partir de las amplificaciones relativas del movimiento del terreno observadas en los datos registrados por las estaciones de la Red Acelerométrica de la Ciudad de México (RACM).

La estimación de las FTS en sitios no instrumentados del Valle de México se realiza a través de un esquema de interpolación espacial (Lancaster y Salkauskas, 1986; Pelto *et al*, 1988). En este modelo se vinculan soluciones teóricas y numéricas, así como las incertidumbres relacionadas con los datos y con el tratamiento numérico, a fin de reducir y cuantificar los niveles de error que se tienen en las predicciones (CIS, 1991-1995).

3.2 Método empleado para el cálculo de la VMHS

Con el procedimiento descrito anteriormente, el programa Z calcula el espectro de sitio en cualquier parte del Distrito Federal multiplicando el EAF con la FTS y con la función de transferencia para un oscilador de un grado de libertad. En el cálculo de la VMHS sólo se utilizan el EAF y la FTS.

Para la obtención de la VMHS, se calcula el espectro de amplitudes de velocidad EAV, representado por $|V(\omega)|$, a partir de la siguiente expresión:

$$|V(\omega)| = |A(\omega)| / \omega$$

$|A(\omega)|$ es el EAF multiplicado por la FTS y ω es la frecuencia.

De esta forma, se puede estimar el EAV para un sitio específico del DF y a través de la teoría de vibraciones aleatorias se puede calcular el valor esperado de la velocidad máxima horizontal en el sitio.

El programa Z está ajustado para estimar adecuadamente los EAF en el intervalo de frecuencias de 0.3 a 3 Hz. El límite inferior de 0.3 Hz se debe a que hace falta suficiente información en bajas frecuencias, lo cual hace difícil la estimación de la velocidad debido a que esta es una medida de baja frecuencia.

Esto se puede entender mejor al analizar lo que sucede al obtener la velocidad a partir de la integración de la aceleración. La integral hace que se pierda la información de alta frecuencia, por lo que la información de baja frecuencia pasa a tener mayor peso en el cálculo y debido a la falta de datos en esta zona del espectro se produce un desajuste en la estimación.

3.3 Ajuste del programa Z

Por las razones expuestas en la sección anterior, el programa Z requiere un ajuste debido a la diferencia que hay entre los valores de velocidades calculados y los obtenidos partiendo de los registros sísmicos. Esta diferencia se cuantifica a través del valor del error ε que se define con la siguiente expresión.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{V_c}{V_r}\right)$$

donde V_c es la velocidad corregida y V_r la velocidad calculada a partir de la integración de los registros originales.

Inicialmente se realizaron ajustes individuales para los cuatro eventos sísmicos estudiados, con el propósito de conocer sus distribuciones de velocidades. Posteriormente se calculó una función general de ajuste que incluye todos los datos disponibles y permite estimar la velocidad para sismos postulados.

3.3.1 Eventos sísmicos utilizados

Los eventos sísmicos que se tuvieron en cuenta para ajustar el programa Z fueron los ocurridos el 25 de abril de 1989, el 14 de septiembre de 1995, el 9 de octubre de 1995 y el 19 de septiembre de 1985. En total se consideraron 152 registros sísmicos de diferentes estaciones acelerográficas y los eventos señalados. En la tabla 3.1 se presenta la descripción de los sismos usados en la obtención de las funciones de ajuste y el número de registros usados.

Tabla 3.1 Descripción de los eventos sísmicos estudiados

FECHA DEL EVENTO	MAGNITUD	DISTANCIA (km)	PROFUNDIDAD FOCAL (km)	NUMERO DE REGISTROS USADOS
25 abr 1989	6.9	304	19	60
14 sep 1995	7.4	305	22	42
9 oct 1995	8.0	560	5	42
19 sept 1985	8.1	295	15	8

De todos los registros disponibles, se realizó una selección de manera que fueran descartados aquellos en los cuales se sospechara falta de datos. Por ejemplo, que las formas inicial o final del sismograma estuvieran alejadas de la línea base, número de puntos escaso, registros segmentados en varios archivos, etc.

Aún con la selección anterior de registros, los datos poseen errores que deben ser corregidos para una mayor precisión en los cálculos. El principal error es el de la línea base, que debe coincidir con el eje horizontal. Esto

se logró al restar una constante a todo el acelerograma de forma que el promedio de sus valores fuera cero. La constante es el promedio de las aceleraciones del registro.

Adicionalmente se realizó un filtrado de las señales con filtros pasabanda del tipo Butterworth con 4 polos, con el propósito de tener en cuenta únicamente el intervalo de frecuencias de interés, comprendido entre 0.05 y 10 Hz. Este filtrado ayuda a corregir errores de lectura de datos de los acelerógrafos, asociados al ruido natural del aparato, que pueden alterar las frecuencias bajas de la señal.

El límite inferior de frecuencias en el filtro pasabanda tomado fue de 0.05 Hz debido a que era necesario garantizar que el acelerograma llegara a cero en la velocidad final. Sin embargo, no se sabe realmente cuál es el valor del límite inferior óptimo que permita la mejor estimación de velocidad.

3.3.2 Ajuste individual de eventos sísmicos

La función de ajuste usada para calcular la velocidad en las componentes del sismo N-S y E-W, es de la forma:

$$V_c = V_z \cdot e^{(\alpha \cdot T + \beta)}$$

donde V_c es la velocidad máxima corregida, V_z es la velocidad máxima calculada con el programa Z, T es el periodo del sitio en estudio, α y β son constantes de ajuste.

En la figura 3.1 (gráficas de la izquierda) se muestra la distribución del error ε con respecto al periodo del suelo T , para cada evento sísmico.

El parámetro objetivo usado para la determinación de las constantes α y β fue hacer que el error medio ε tuviera el valor de cero y que a la vez se lograra la reducción de la desviación estándar de los valores del error.

El objetivo de las condiciones del ajuste es que al hacer cero el error medio se elimine el sesgo presente en la distribución de los errores y por lo tanto se logre ajustar mejor la velocidad calculada V_c ; también buscan que la reducción de la desviación estándar controle la dispersión de los errores en las estimaciones.

Tabla 3.2 Valores de α y β para los eventos sísmicos estudiados

EVENTO	MAGNITUD	α NS	β NS	α EW	β EW
25 abr 1989	6.9	-0.1363	0.2855	-0.0361	-0.0248
14 sep 1995	7.4	-0.1131	0.1041	-0.1111	0.0839
9 oct 1995	8.0	0.0785	0.2569	0.0978	0.2248
19 sep 1985	8.1	-0.0126	0.1945	0.0012	0.1974

Los valores del error medio ε y desviación estándar para los datos sin ajustar y ajustados, se presentan en las tablas 3.3 y 3.4.

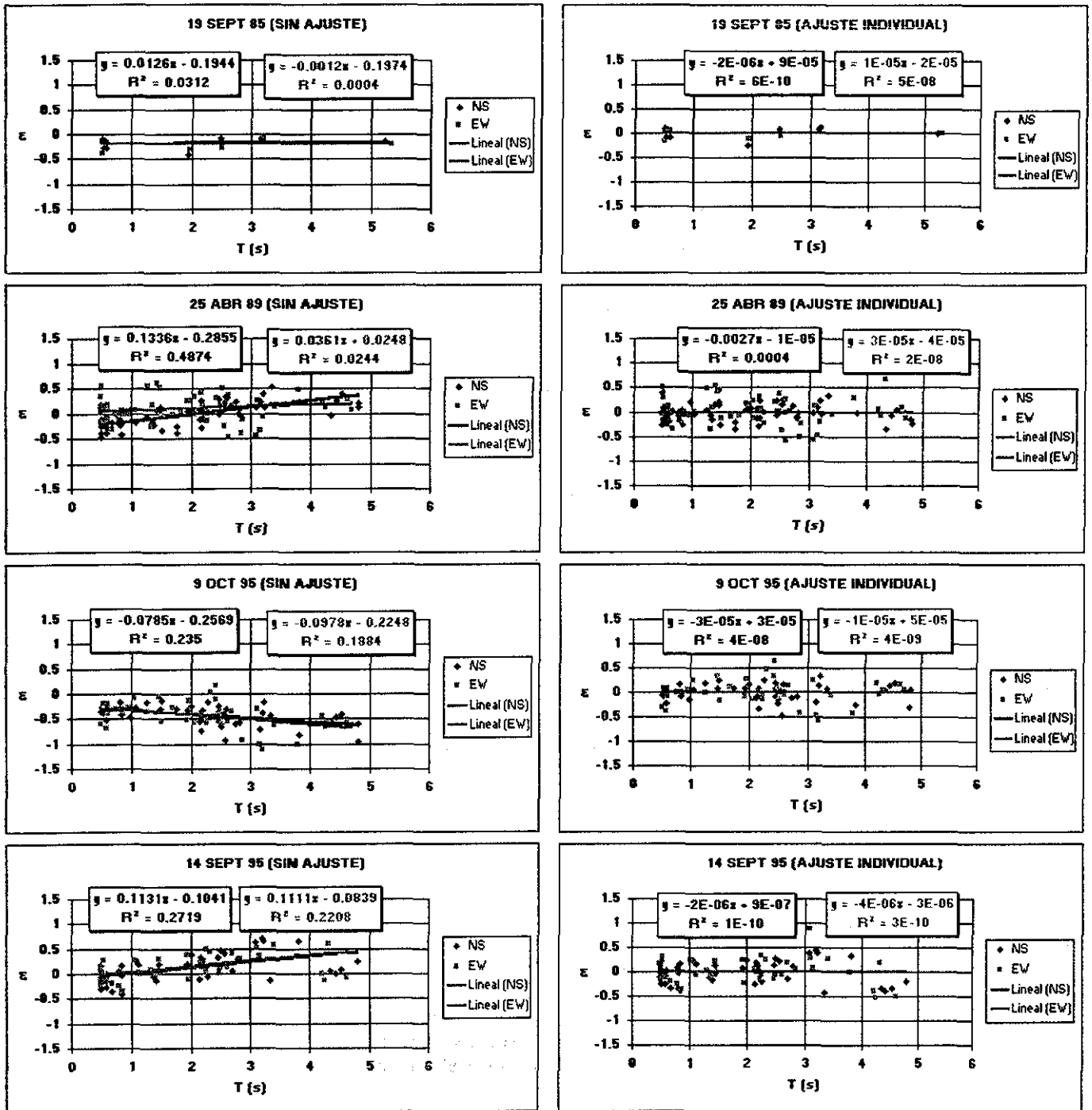


Figura 3.1 Distribución del error ε para los eventos sísmicos estudiados

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.3 Error medio del ajuste

ERROR MEDIO DEL AJUSTE DE DATOS					
EVENTO	No DATOS	SIN CORREGIR		CORREGIDOS	
		NS	EW	NS	EW
25 abr 1989	60	-0.02823	0.09373	-0.00513	0.00002
14 sep 1995	42	0.11569	0.13043	0.00000	-0.00001
9 oct 1995	42	-0.43274	-0.44174	-0.00004	0.00002
19 sep 1985	8	-0.17823	-0.19895	0.00010	0.00000

Tabla 3.4 Desviación estándar del ajuste

DESVIACION ESTANDAR DEL AJUSTE DE LOS DATOS					
EVENTO	No DATOS	SIN CORREGIR		CORREGIDOS	
		NS	EW	NS	EW
25 abr 1989	60	0.23328	0.29618	0.16825	0.27355
14 sep 1995	42	0.30587	0.33190	0.23537	0.25814
9 oct 1995	42	0.19740	0.28401	0.17627	0.24516
19 sep 1985	8	0.24142	0.10014	0.12448	0.10284

En las tablas 3.3 y 3.4 se observa que los valores del error medio ϵ de los datos corregidos son prácticamente nulos y que se logró la reducción de la desviación estándar, cumpliendo así con los objetivos fijados inicialmente para la obtención de las constantes α y β .

3.3.3 Funciones generales de ajuste

Con el propósito de conocer la distribución de velocidades para eventos sísmicos postulados es necesario vincular las constantes del ajuste (α y β) con el tamaño del sismo; en este caso se utilizó la magnitud del evento sísmico. Esto se logró a través de las siguientes expresiones que definen α y β en función de la magnitud m (figura 3.2); y que fueron obtenidas a través de un ajuste general de todos los datos disponibles.

COMPONENTES N-S Y E-W

Si la magnitud m es menor o igual a 7.4:

$$\alpha = -0.1$$

$$\beta = 0.1$$

Si m es mayor de 7.4:

$$\alpha = 0.142857 \cdot m - 1.157142$$

$$\beta = 0.142857 \cdot m - 0.957142$$

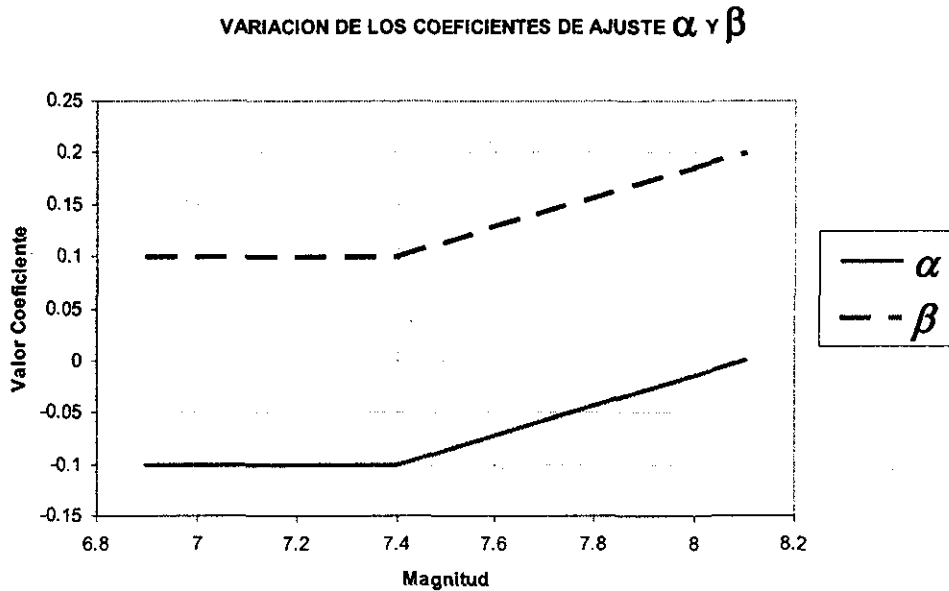


Figura 3.2 Coeficientes α y β

Estas funciones de ajuste vinculan en el cálculo los parámetros que mejor describen al sismo y al sitio; éstos son la magnitud y el período predominante de sitio.

De igual forma que en el ajuste individual de eventos, el cálculo de las funciones generales de ajuste tiene como parámetro objetivo hacer que el error medio tenga el valor de cero y a su vez se logre la reducción de la desviación estándar.

Debido a que los eventos sísmicos tienen distintas cantidades de datos es necesario tomar los valores ponderados del error medio ϵ_{mp} y de la desviación estándar σ_p , que se definen con las siguientes expresiones:

$$\epsilon_{mp} = \frac{\sum_{i=1}^{NE} \epsilon_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^{NE} N_i} \quad \sigma_p = \frac{\sum_{i=1}^{NE} \sigma_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^{NE} N_i}$$

ϵ_i y σ_i son los valores del error medio y desviación estándar de cada evento sísmico; N_i es el número de datos del evento i ; y NE es el número de eventos considerados en el ajuste que en este caso es cuatro.

En las tablas 3.5 y 3.6 se observa el valor del error medio ponderado y la desviación estándar del ajuste de los datos. En términos generales, se redujeron los valores de ϵ_{mp} y σ_p . Por una parte, se logró que el error

medio ponderado ε_{mp} fuera cercano a cero luego del ajuste general y adicionalmente se redujera el valor absoluto del error medio individual de cada evento. Por otra parte, se logró disminuir tanto la desviación estándar ponderada σ_p como el valor individual de cada sismo, con dos excepciones (9 oct 95 NS y 19 sep 85 EW).

Tabla 3.5 Error medio del ajuste general

ERROR MEDIO DE LOS DATOS					
EVENTO	No DATOS	SIN CORREGIR		CON AJUSTE GENERAL	
		NS	EW	NS	EW
25 abr 1989	60	-0.02823	0.09373	-0.02821	0.02473
14 sep 1995	42	0.11569	0.13043	0.02136	0.03750
9 oct 1995	42	-0.43274	-0.44174	-0.27902	-0.28771
19 sep 1985	8	-0.17823	-0.19895	0.02177	0.00105
Error medio ponderado		-0.10813	-0.05949	-0.08119	-0.05932

Tabla 3.6 Desviación estándar del ajuste general

DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS					
EVENTO	No DATOS	SIN CORREGIR		CON AJUSTE GENERAL	
		NS	EW	NS	EW
25 abr 1989	60	0.23328	0.29618	0.17321	0.28402
14 sep 1995	42	0.30587	0.33190	0.23595	0.25851
9 oct 1995	42	0.19740	0.28401	0.21073	0.28006
19 sep 1985	8	0.24142	0.10014	0.12522	0.10285
Desviación estándar ponderada		0.24385	0.29237	0.19839	0.26634

En la figura 3.3 se observa la variación del error ε con respecto al periodo T de los datos sin ajustar y los corregidos usando la función general de ajuste. En general, el ajuste es adecuado; sin embargo, para el evento del 9 de octubre de 1995 se observa que la tendencia de la nube de puntos no es horizontal e igual a cero. Esto puede deberse a que su distancia focal es muy grande en comparación con los otros eventos.

Realmente es complejo hacer un ajuste perfecto con todos los datos de forma que el error medio ponderado sea cero y la desviación estándar sea un valor cercano al obtenido con el ajuste individual de eventos; por una parte, esto se debe a la insuficiencia de registros sísmicos, a la falta de estaciones acelerográficas, a errores de los sismógrafos; por otra parte, los eventos sísmicos pueden tener patrones diferentes de movimiento del suelo.

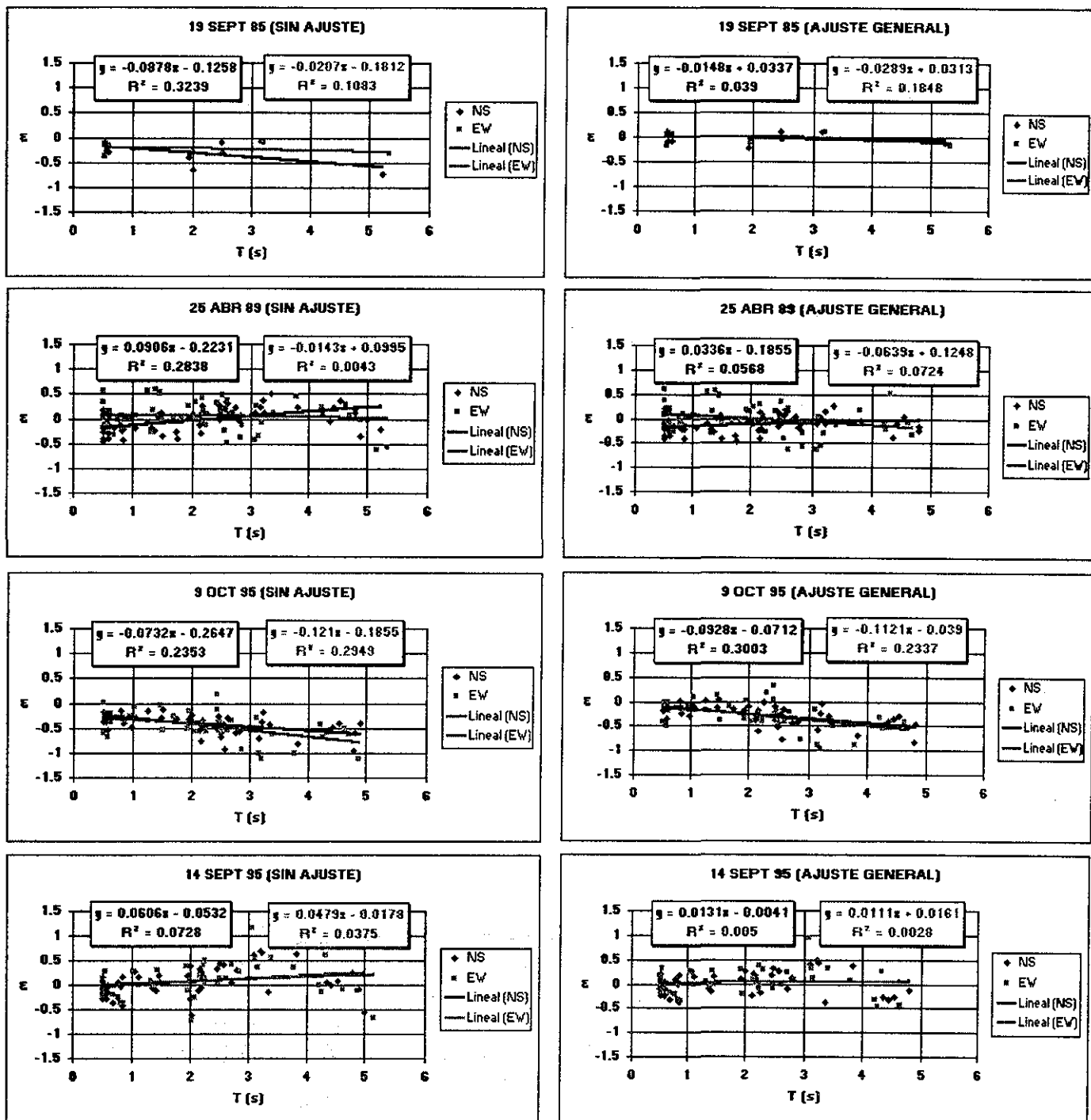


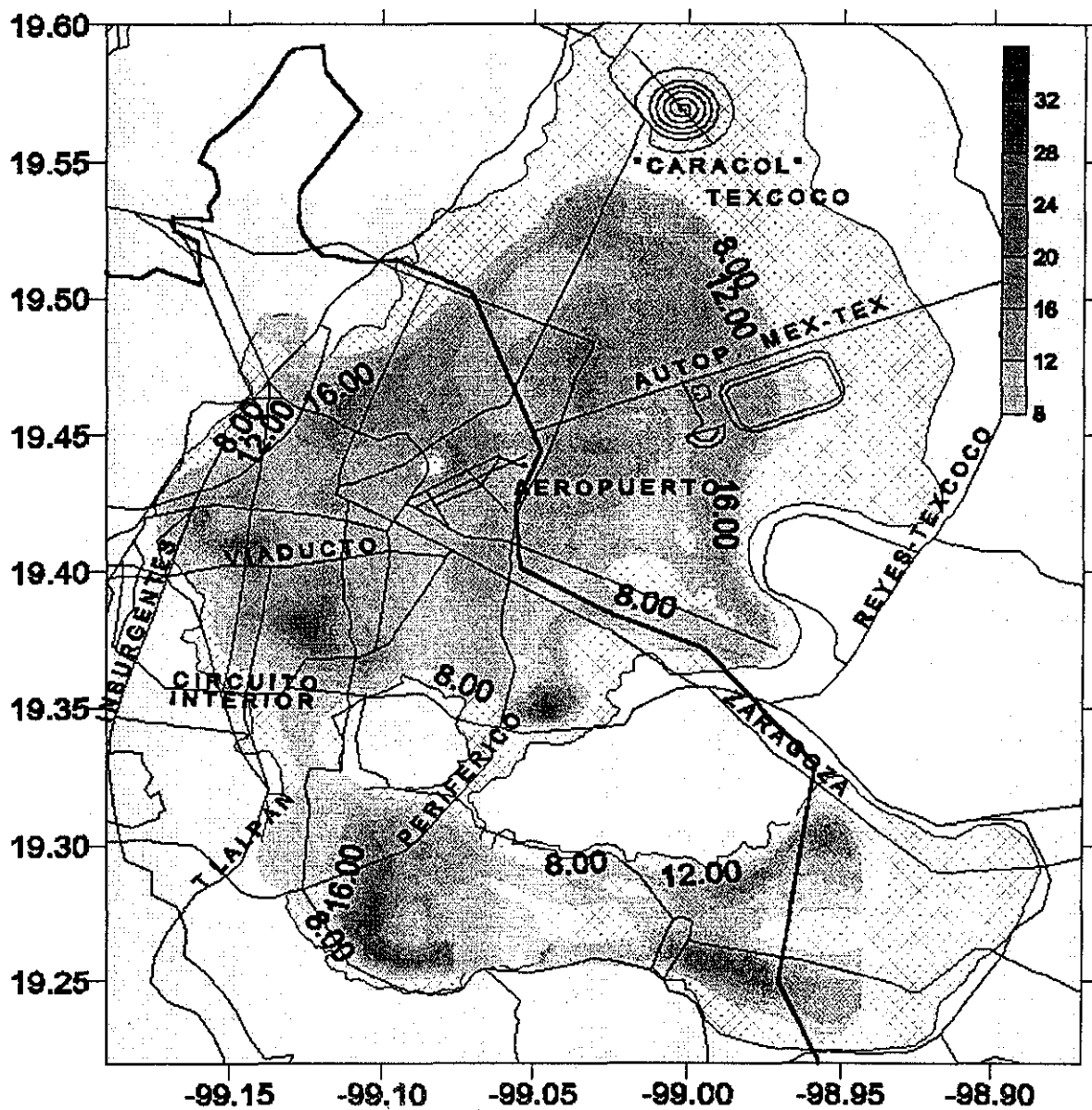
Figura 3.3 Distribución del error ε para el ajuste general

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4 Mapas de VMHS

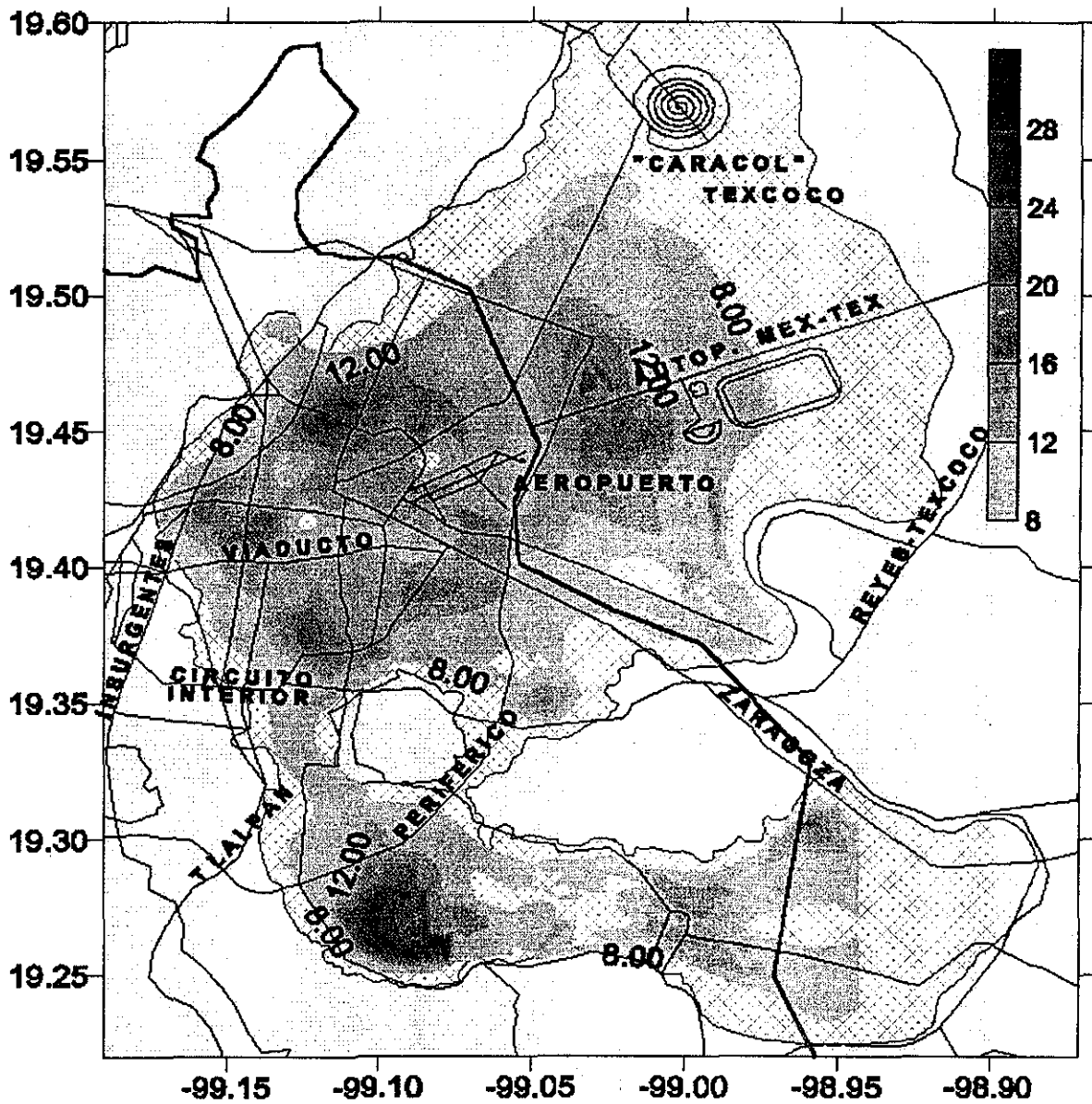
3.4.1 Mapas de VMHS para los sismos utilizados en el ajuste

A continuación se presentan los mapas de velocidad máxima horizontal del suelo en el Distrito Federal para los sismos utilizados en el ajuste del programa Z.



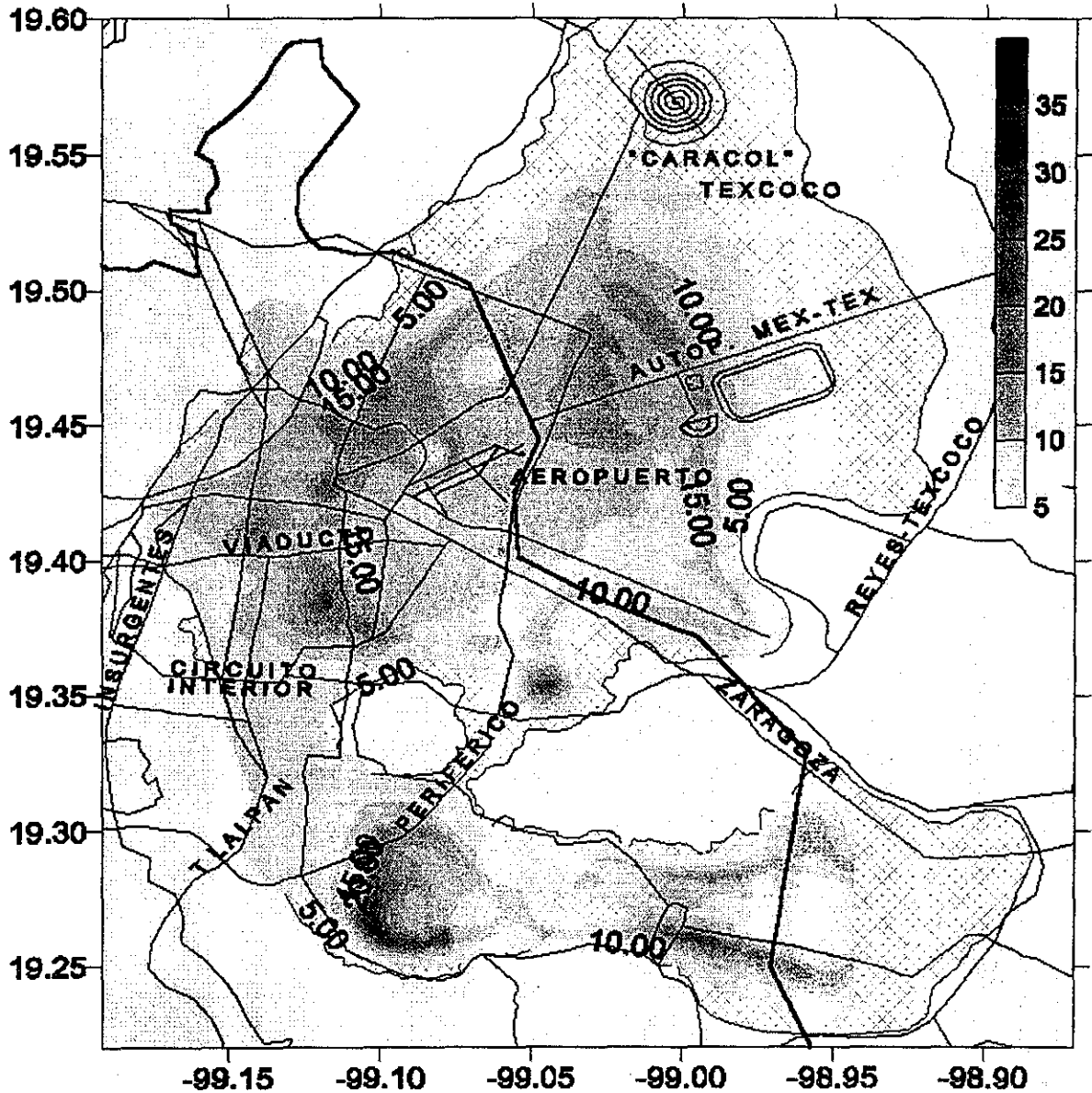
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 25 de abril de 1989, N-S (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



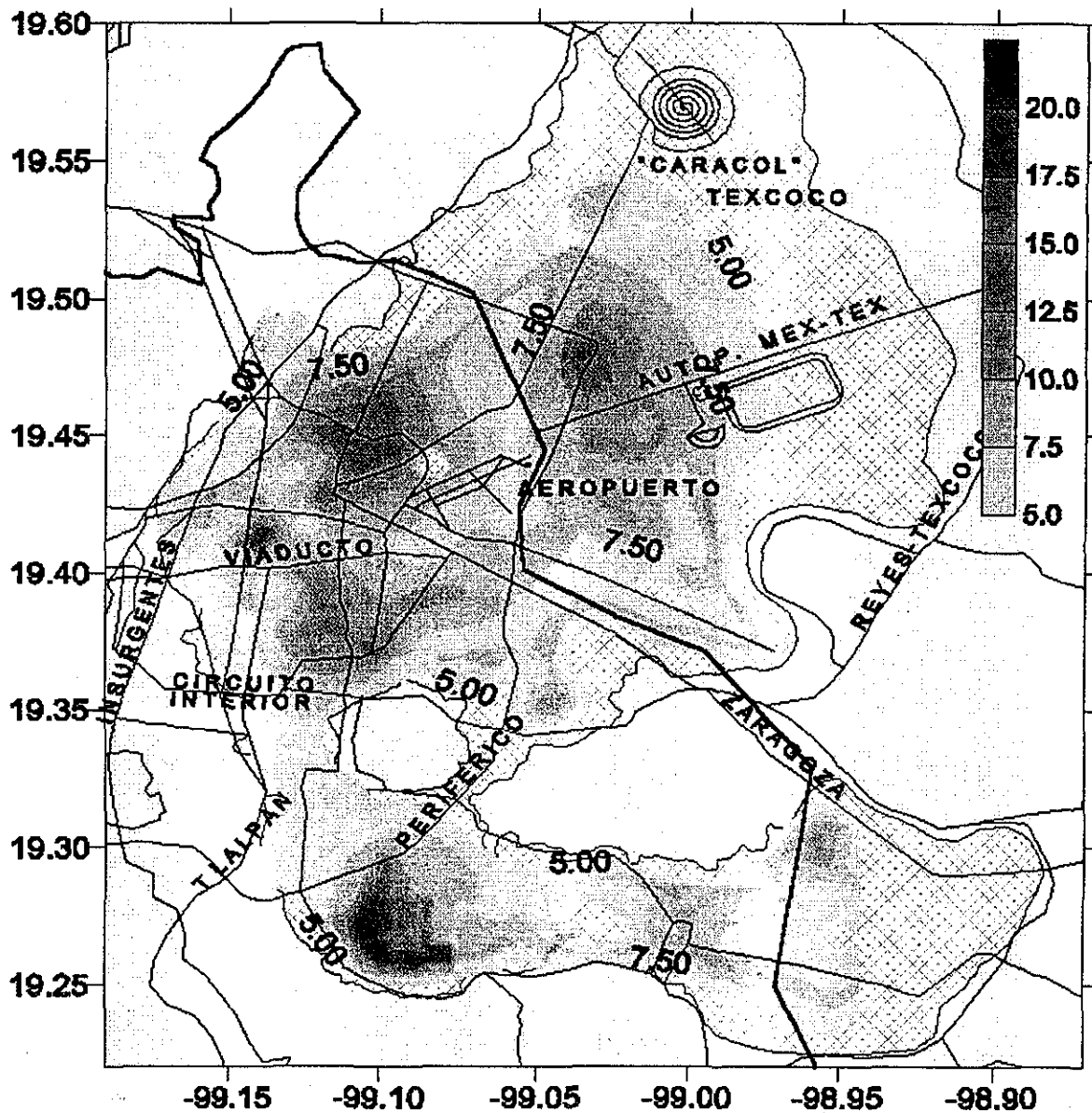
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 25 de abril de 1989, E-W (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



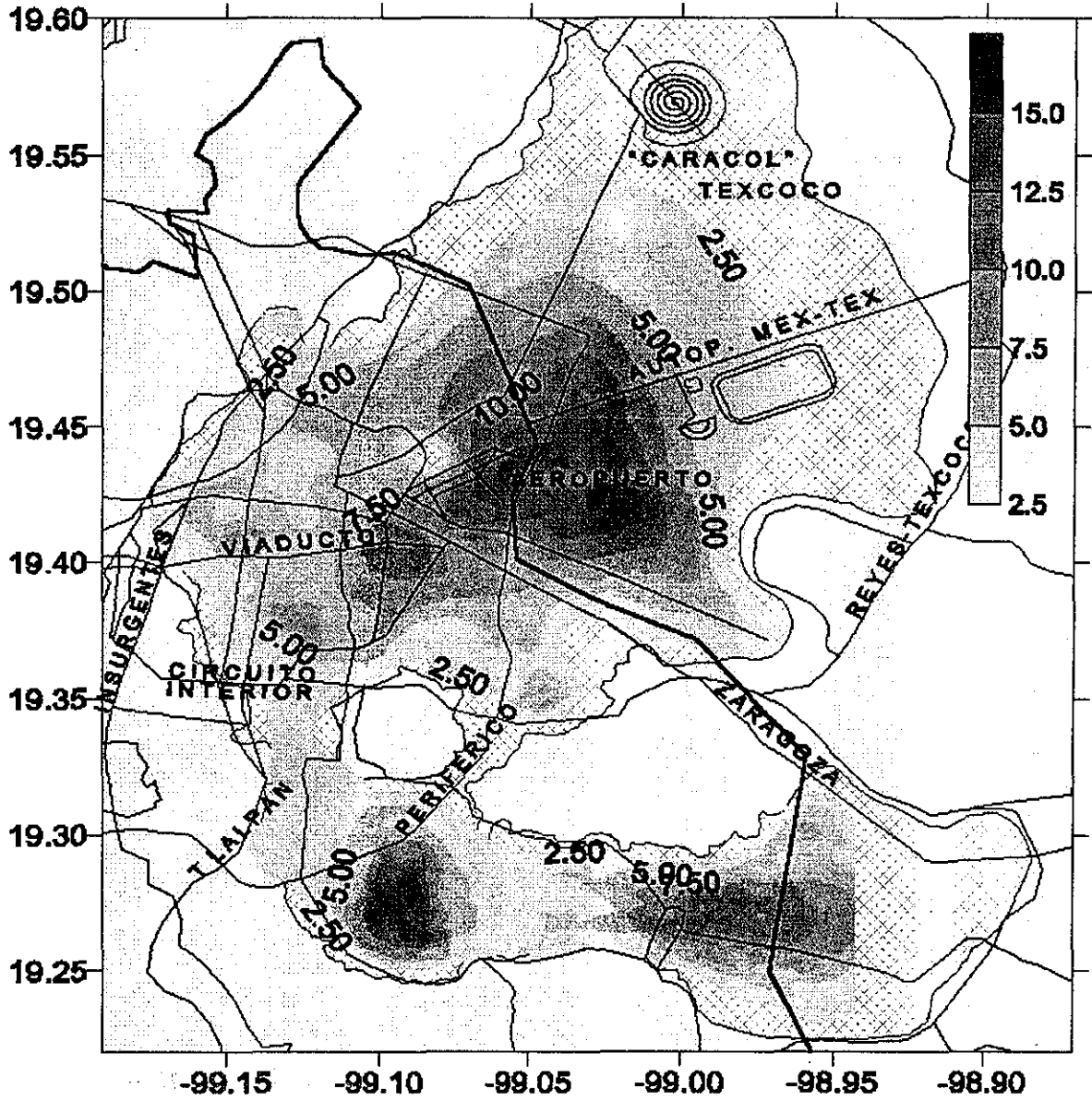
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 14 de septiembre de 1995, N-S (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



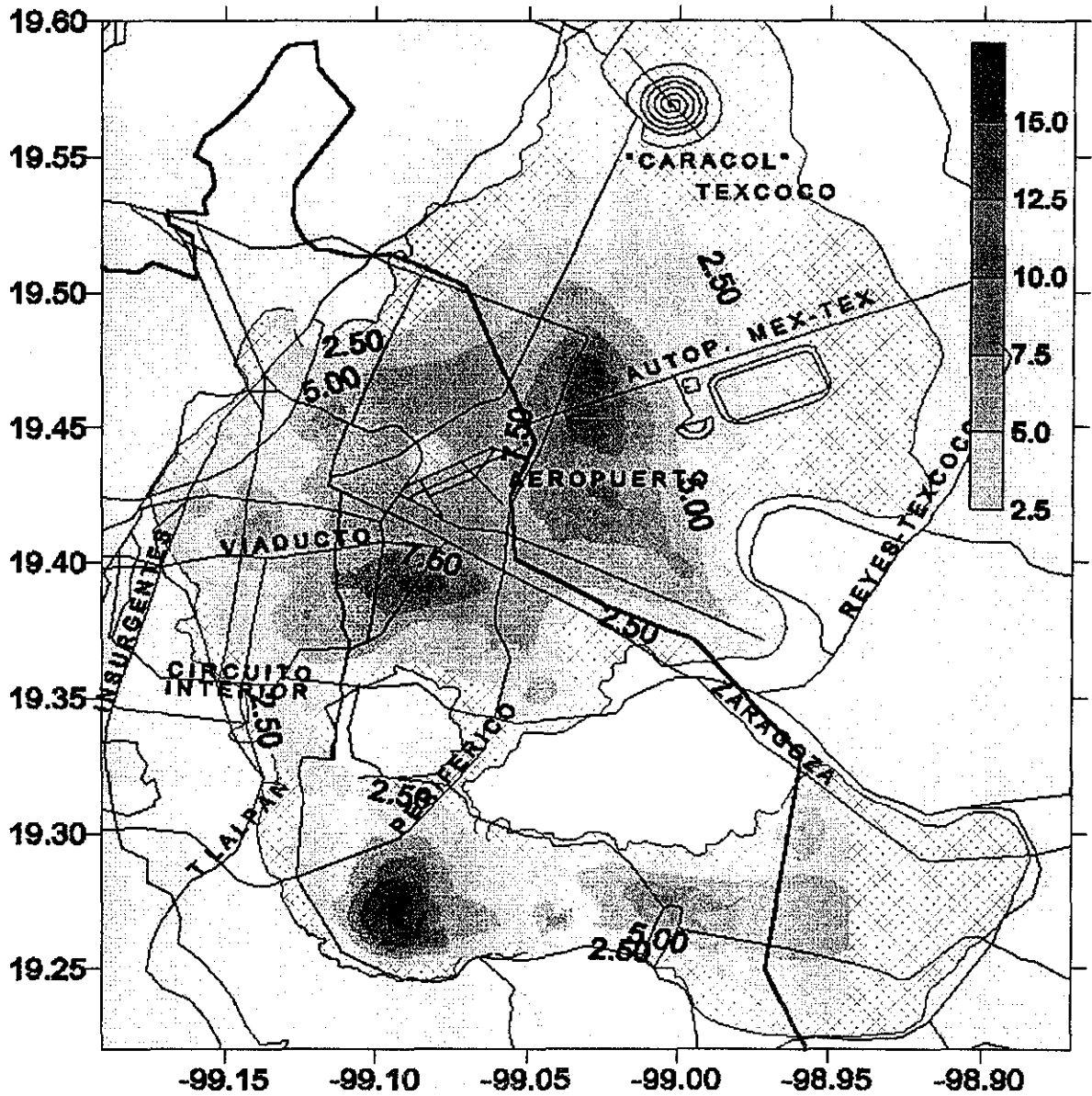
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 14 de septiembre de 1995, E-W (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



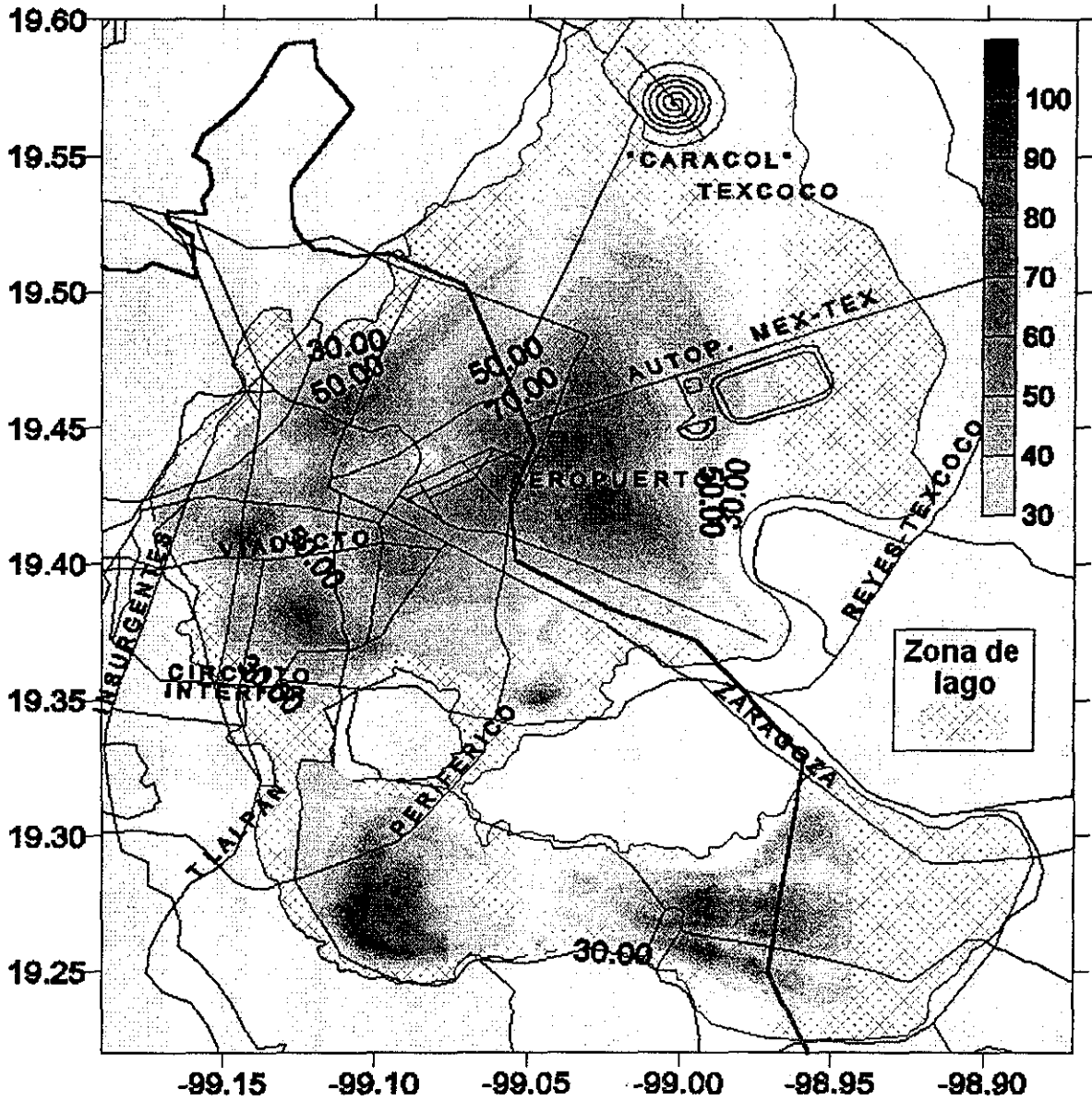
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 9 de octubre de 1995, N-S (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



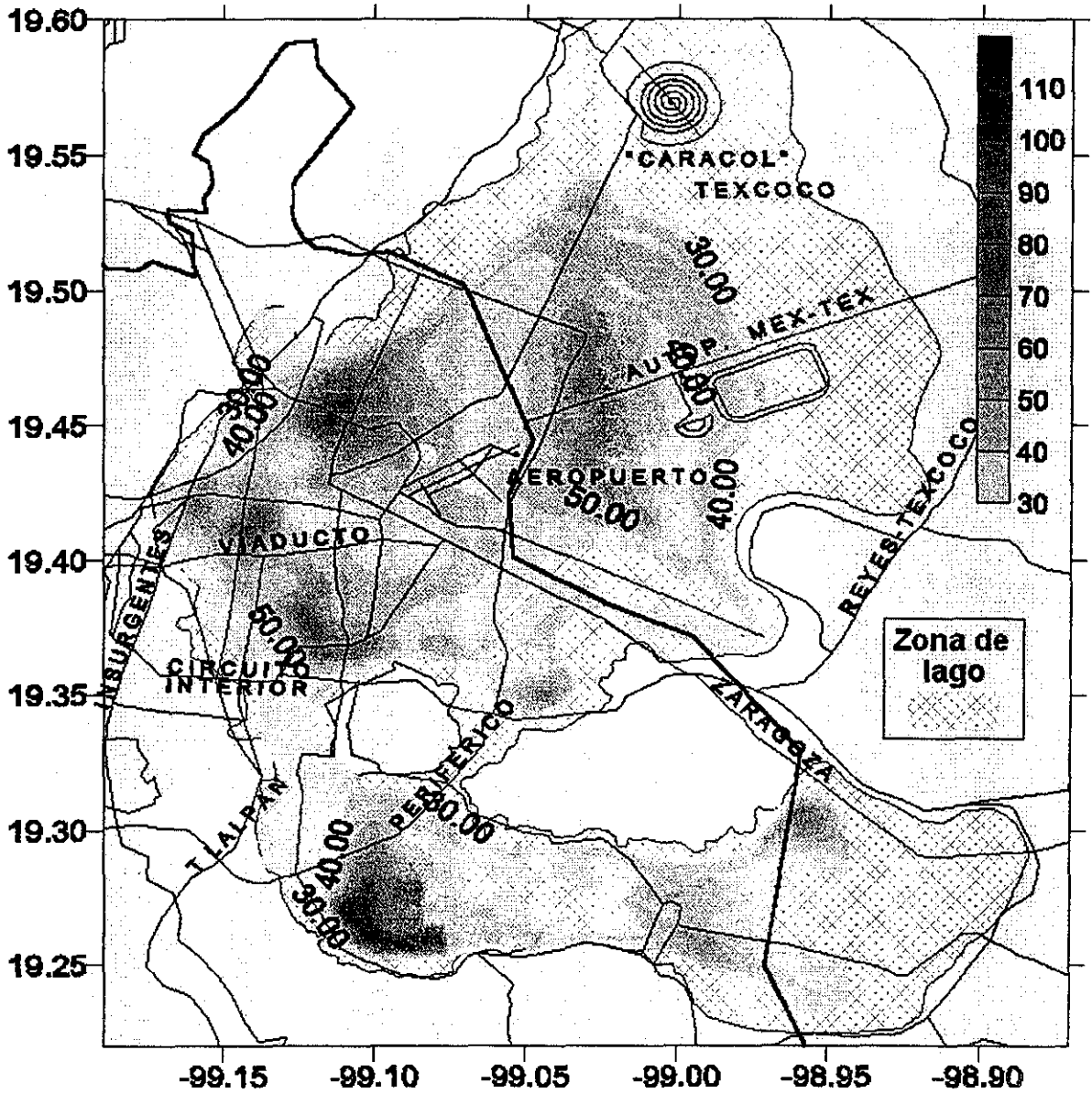
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 9 de octubre de 1995, E-W (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Mapa de velocidad máxima para el sismo del 19 de septiembre de 1985, N-S (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



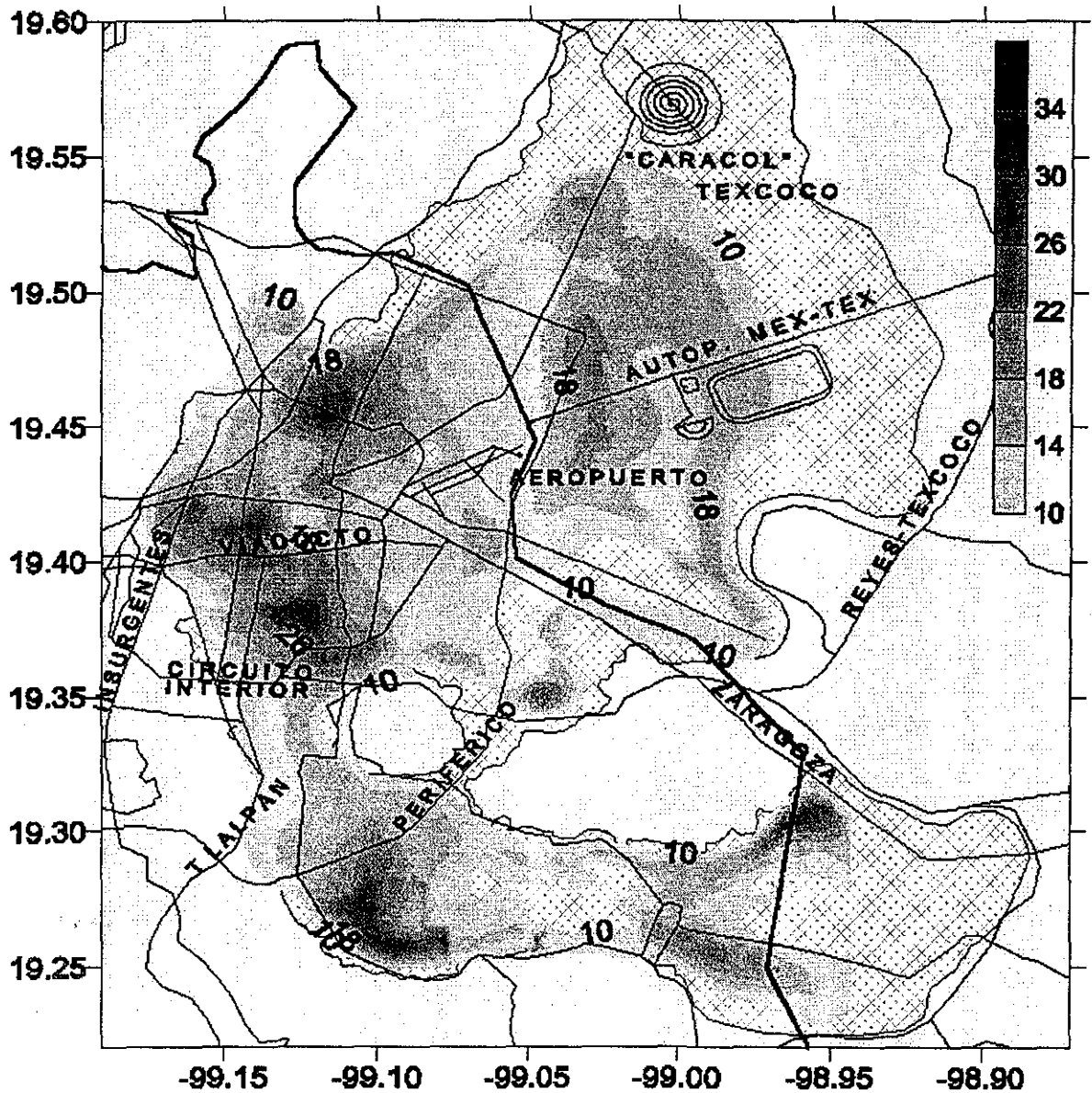
Mapa de velocidad máxima para el sismo del 19 de septiembre de 1985, E-W (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

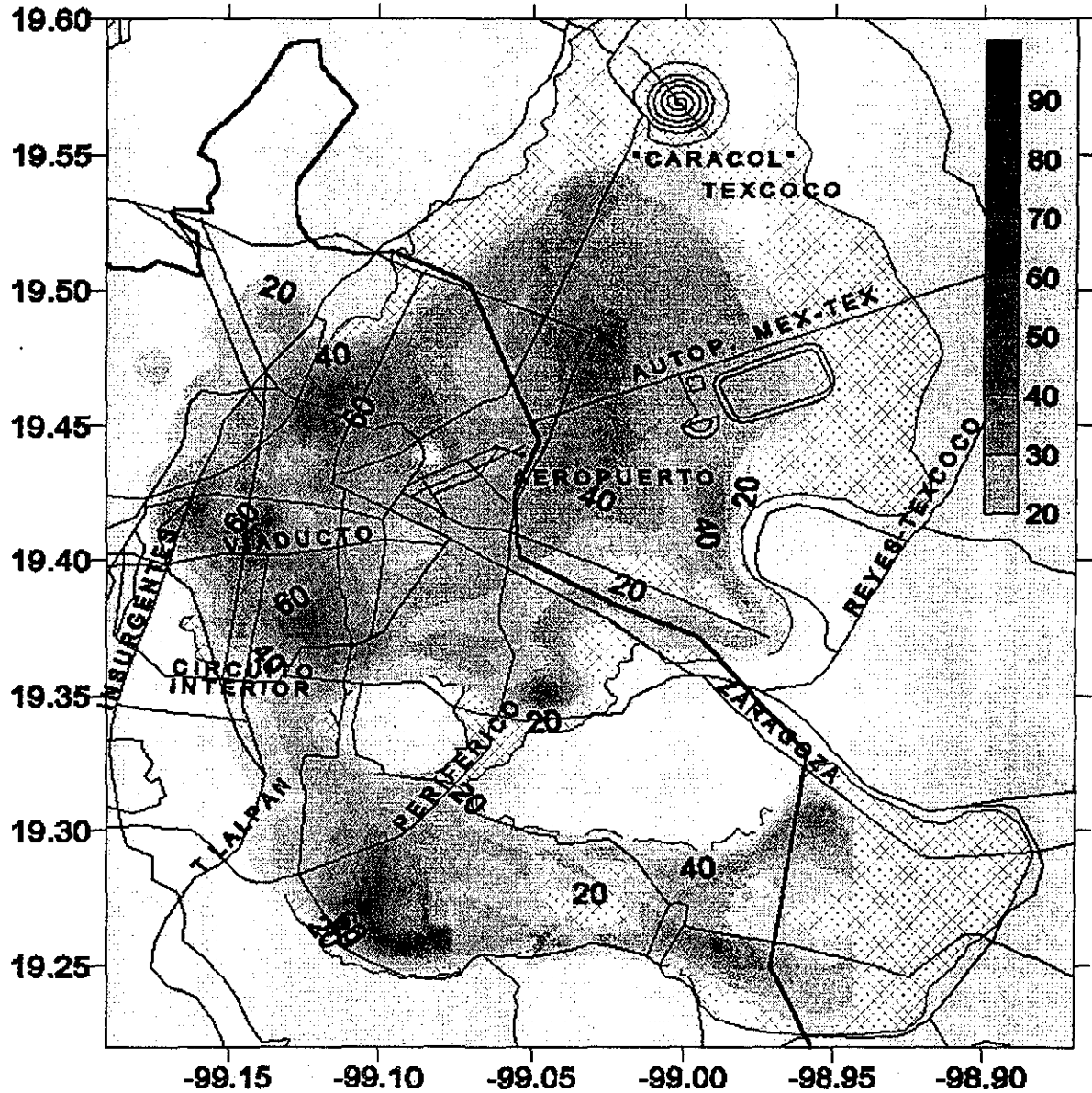
3.4.2 Mapas de VMHS para sismos postulados

A continuación se presentan los mapas de velocidad máxima horizontal (VMHS) del suelo para eventos sísmicos tipo costeros (Ordaz *et al* 1994, Ordaz *et al* 1995) de magnitudes 7.5, 8.0 y 8.4; para distancias focales de 250, 300 y 350 km. Se utilizó este tipo de sismos postulados debido a que corresponde con la naturaleza del sismo del 19 de septiembre de 1985, sismo que afectó la red en estudio y cuyos datos de fugas son la base de la estimación de daños de la presente tesis.

Los mapas que se presentan a continuación permiten apreciar la forma con la cual la VMHS varía con respecto a la magnitud y distancia focal del sismo en consideración para cada sitio del Distrito Federal. En la sección 3.5 se presenta una forma simplificada de calcular la VMHS.

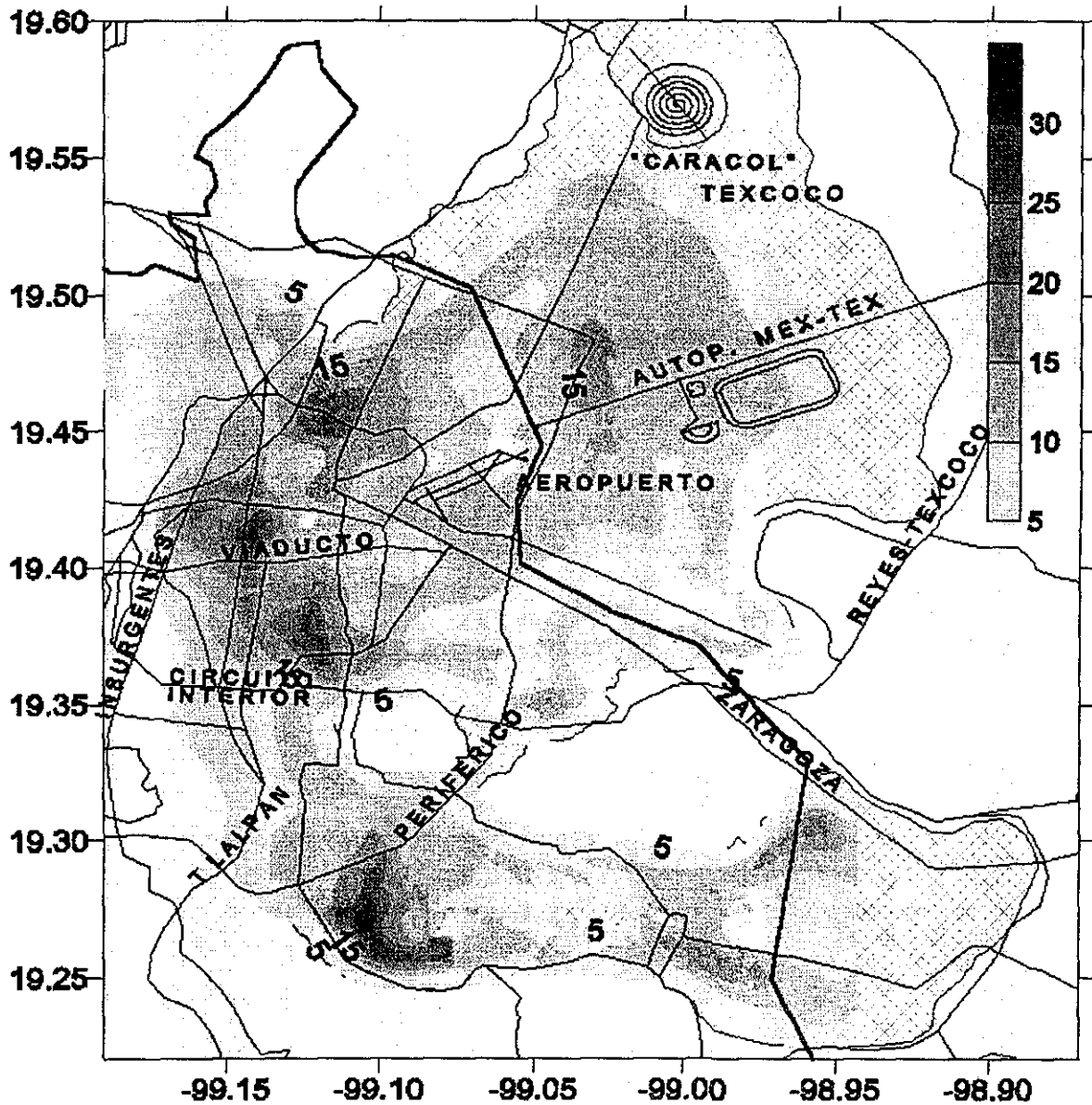


VMHS para sismo postulado con $R = 250$ km y $m = 7.5$ (cm/s)



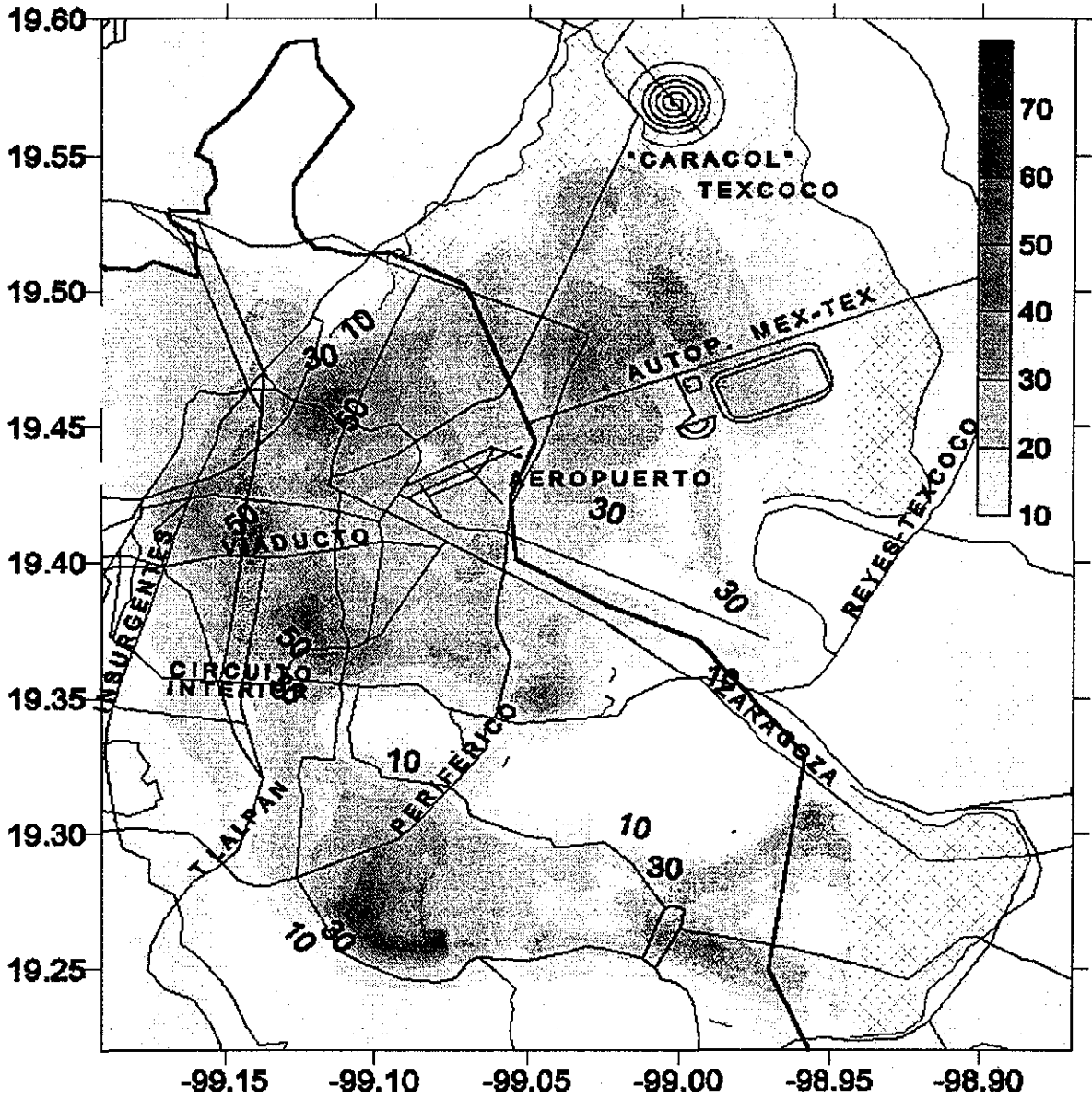
VMHS para sismo postulado con $R = 250$ km y $m = 8.0$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



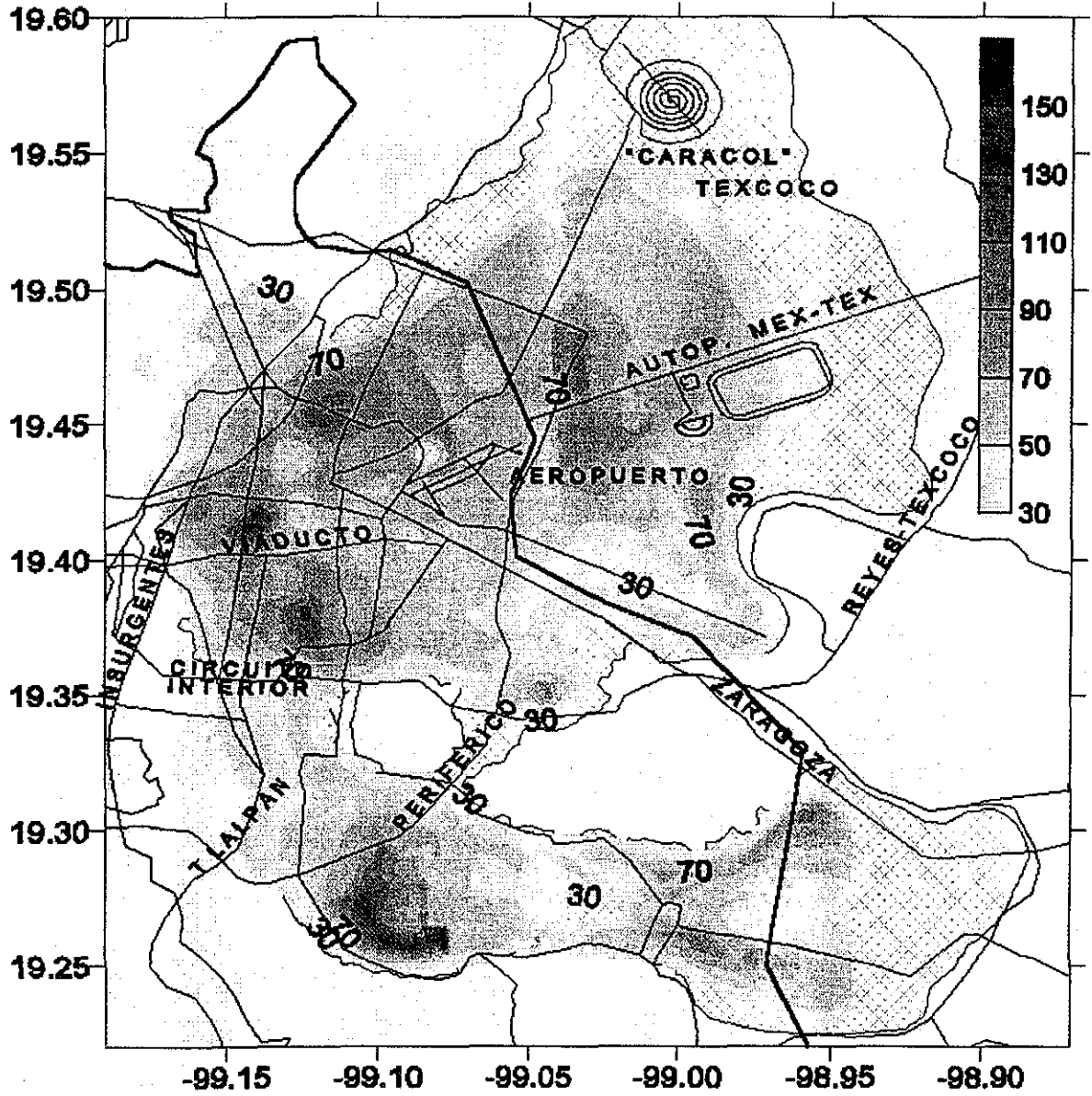
VMHS para sismo postulado con $R = 300$ km y $m = 7.5$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



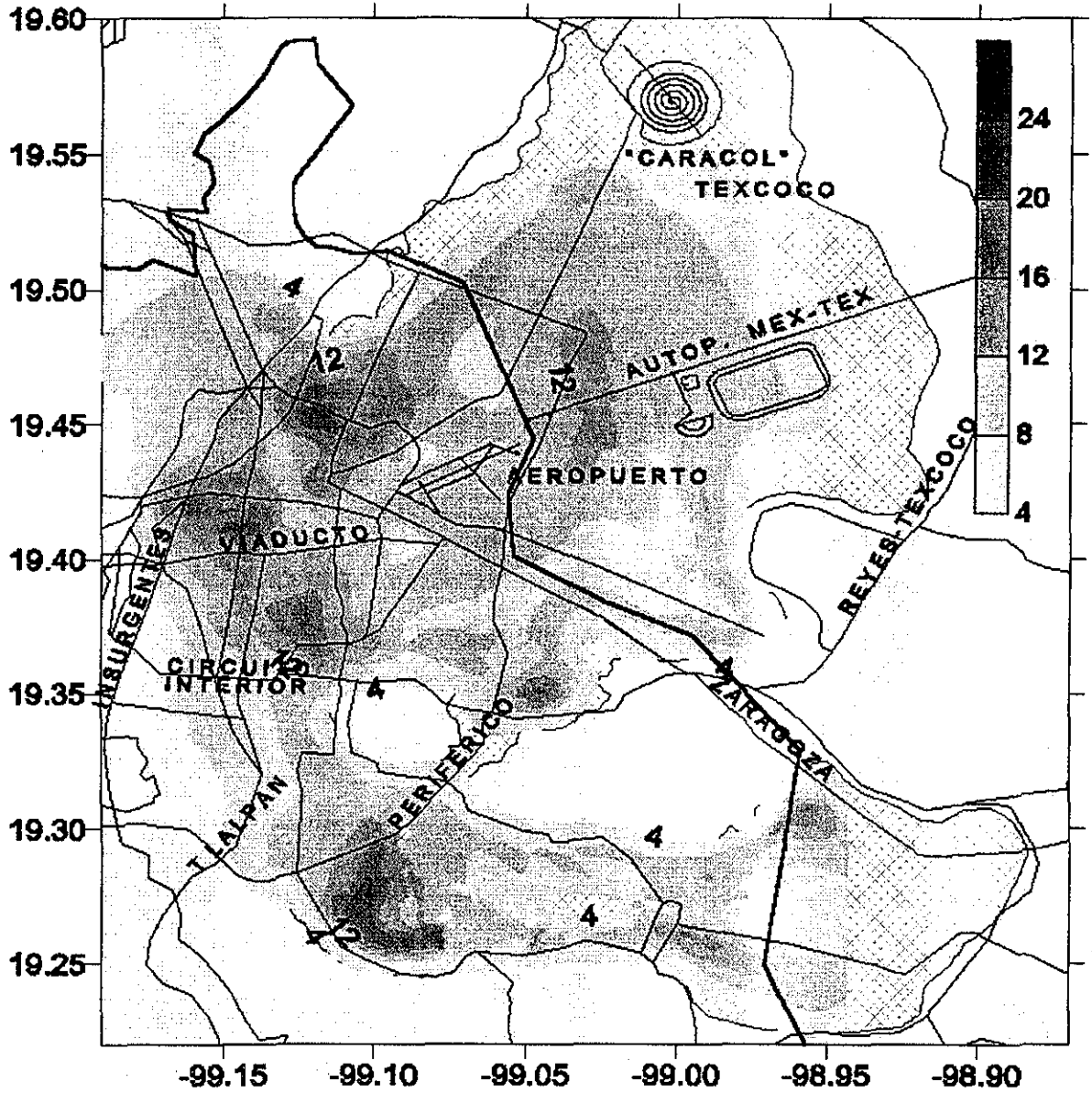
VMHS para sismo postulado con $R = 300$ km y $m = 8.0$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



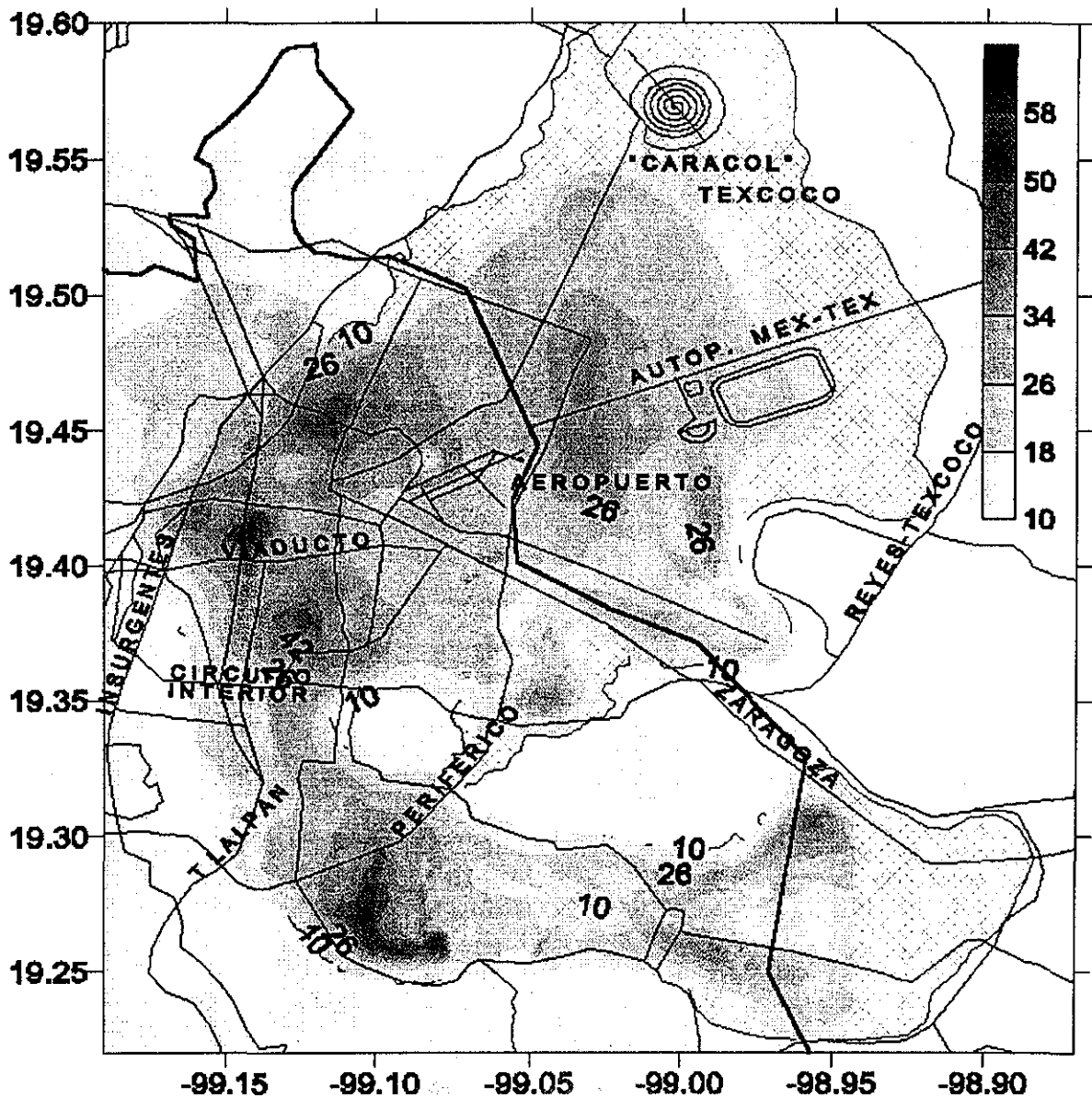
VMHS para sismo postulado con $R = 300$ km y $m = 8.4$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



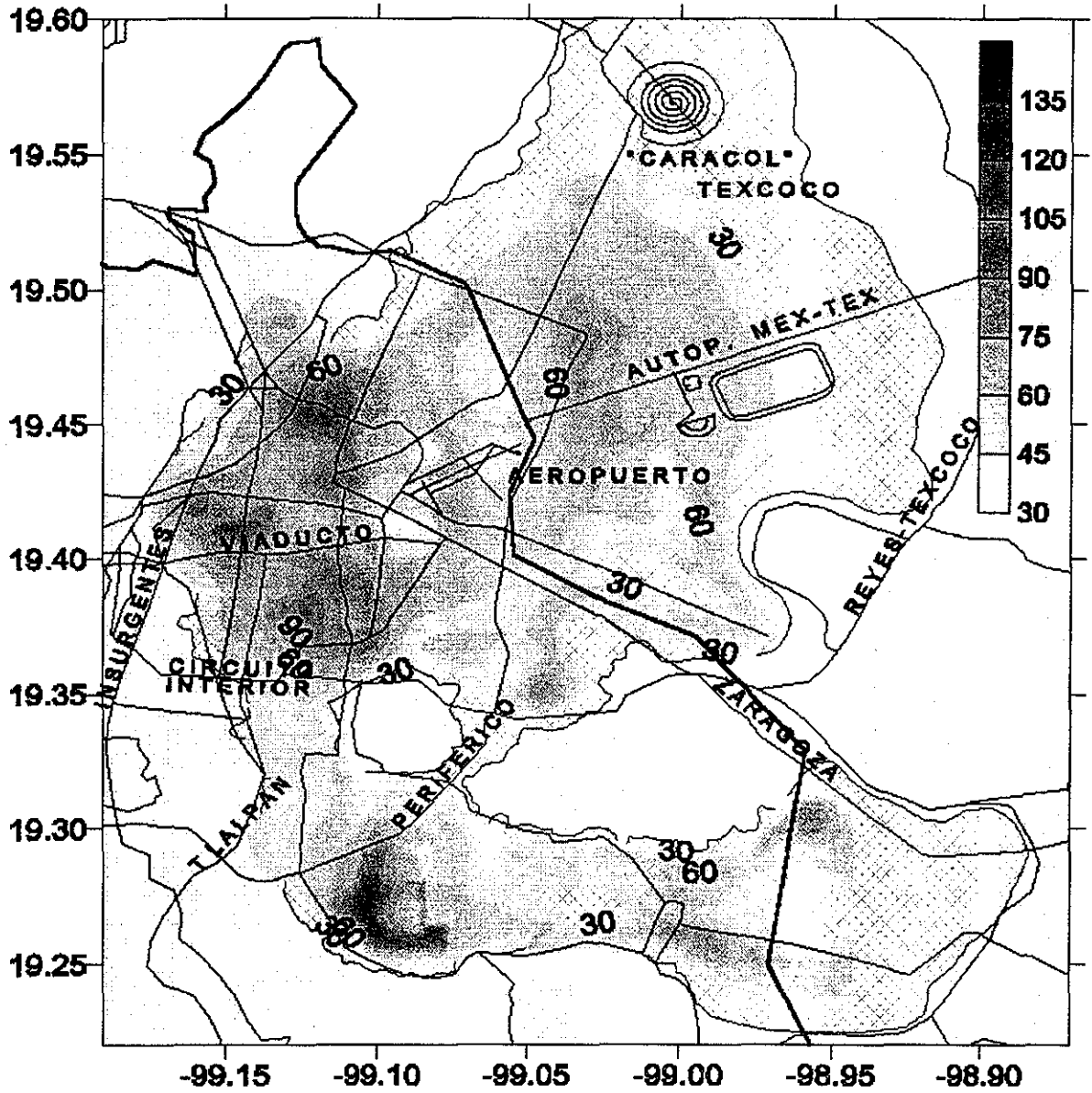
VMHS para sismo postulado con $R = 350$ km y $m = 7.5$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



VMHS para sismo postulado con $R = 350$ km y $m = 8.0$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



VMHS para sismo postulado con $R = 350$ km y $m = 8.4$ (cm/s)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.5 Método simplificado para estimar la VMHS en sismos postulados

En esta sección se presenta una forma simplificada de obtener la velocidad máxima en cualquier sitio del Distrito Federal para sismos postulados definidos por una magnitud m (entre 4 y 9) y distancia focal R (menor de 500 km). Esto fue posible gracias al ajuste realizado en cada punto del mapa y que corresponde con la siguiente expresión.

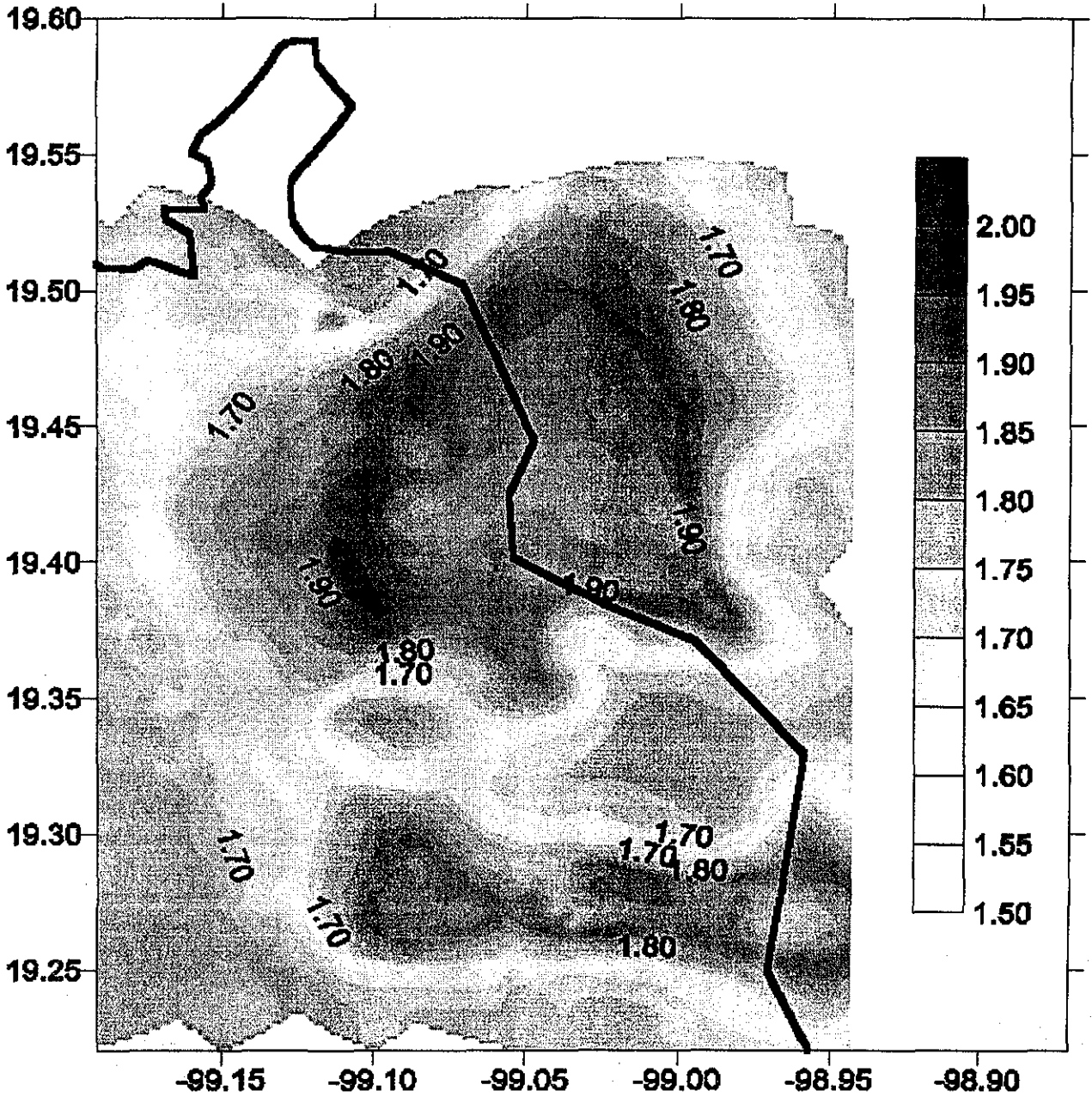
$$\ln(V) = A \cdot m + B \cdot \ln(R) + C$$

V es la velocidad máxima (cm/s), m es la magnitud del evento sísmico y R es la distancia focal (km). A , B y C son constantes de ajuste que tienen valores únicos para cada punto del mapa.

La expresión mostrada corresponde a una ley de atenuación para sismos de subducción que incluye efectos de sitio. Los mapas mostrados corresponden a los valores que toman las constantes A , B y C sobre el Distrito Federal y que al ser utilizados en la ecuación anterior, permiten estimar la VMHS. La tabla 3.7 indica los valores máximo y mínimo de las constantes A , B y C , así como su desviación estándar y magnitud. Se incluyó también los valores para el coeficiente de correlación R^2 de la ajuste de la ecuación para cada punto del mapa; se puede observar un ajuste casi perfecto en todos los puntos del mapa.

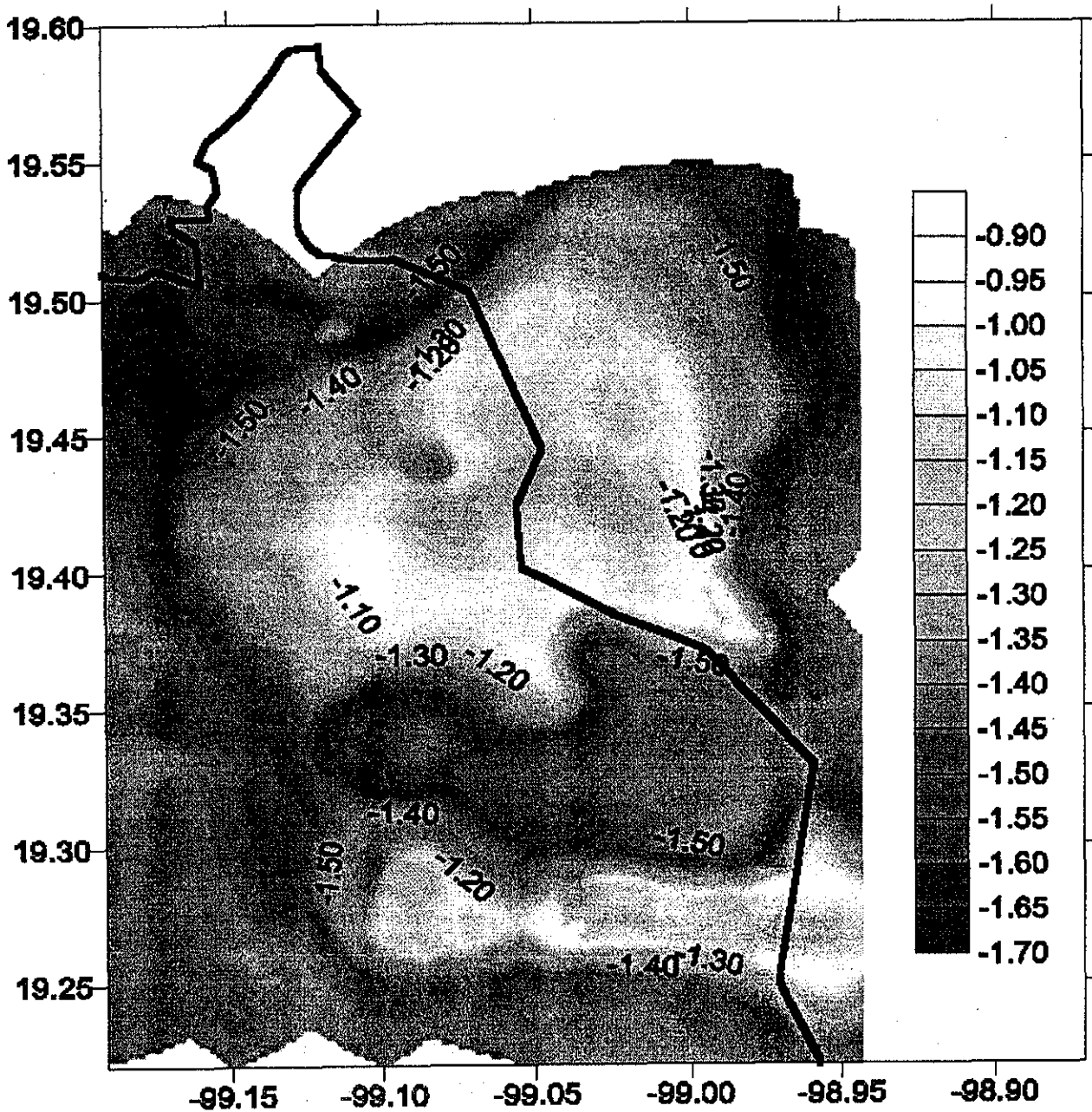
Tabla 3.7 Descripción de las constantes A , B y C

	MÁXIMO	MÍNIMO	σ	μ
A	1.965625	1.565036	0.075647	1.764944
B	-0.981775	-1.699742	0.143333	-1.393203
C	-0.176164	-6.894066	1.247859	-3.444366
R²	0.999913	0.999278	0.000124	0.999639



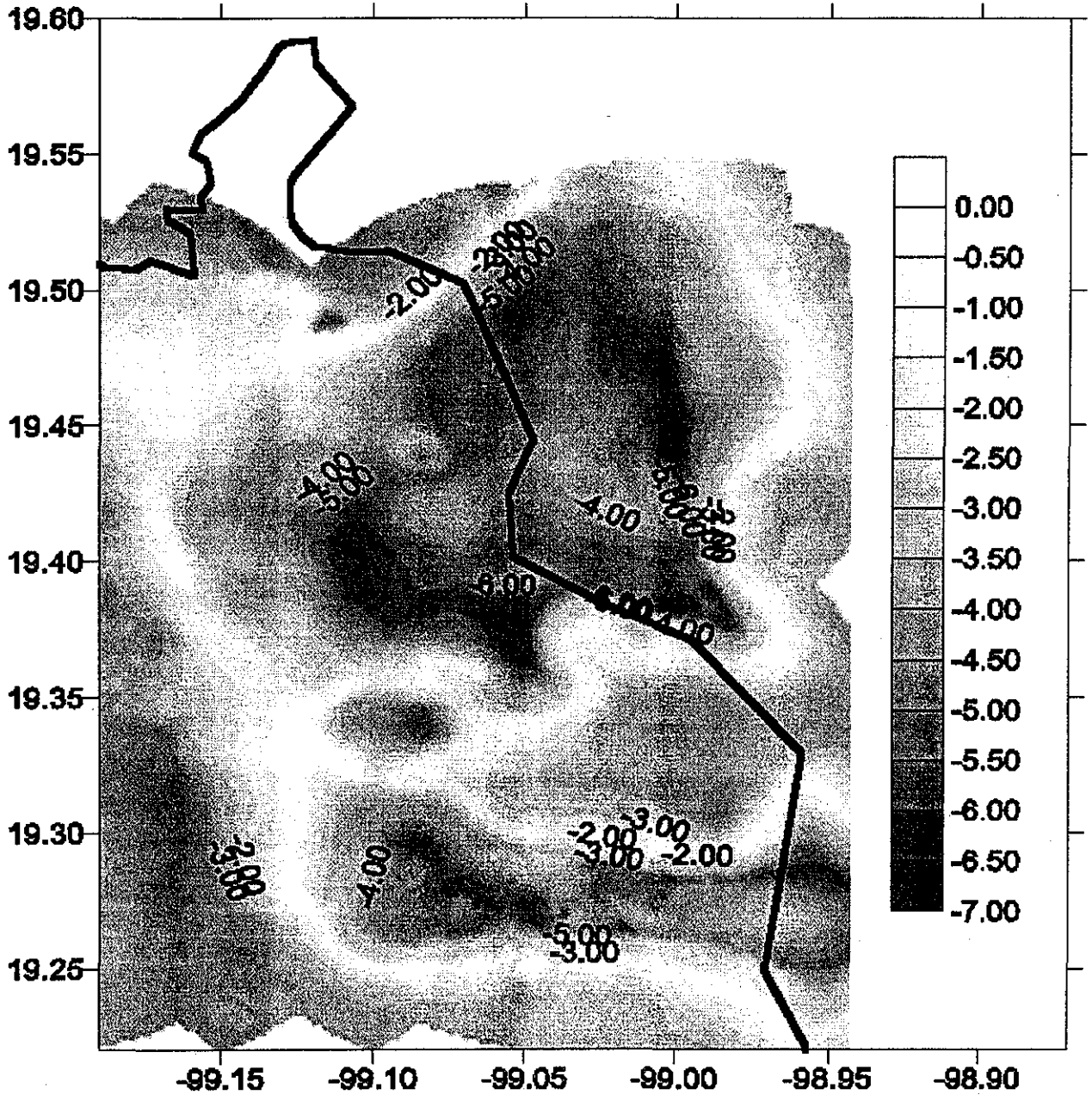
Mapa de valores A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Mapa de valores B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Mapa de valores C

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Al comparar los mapas de A, B y C se observa que sus valores están relacionados, pues las curvas de nivel tienen formas similares, esto se comprueba en las siguientes gráficas donde se observan los valores de R^2 y las líneas de ajuste.

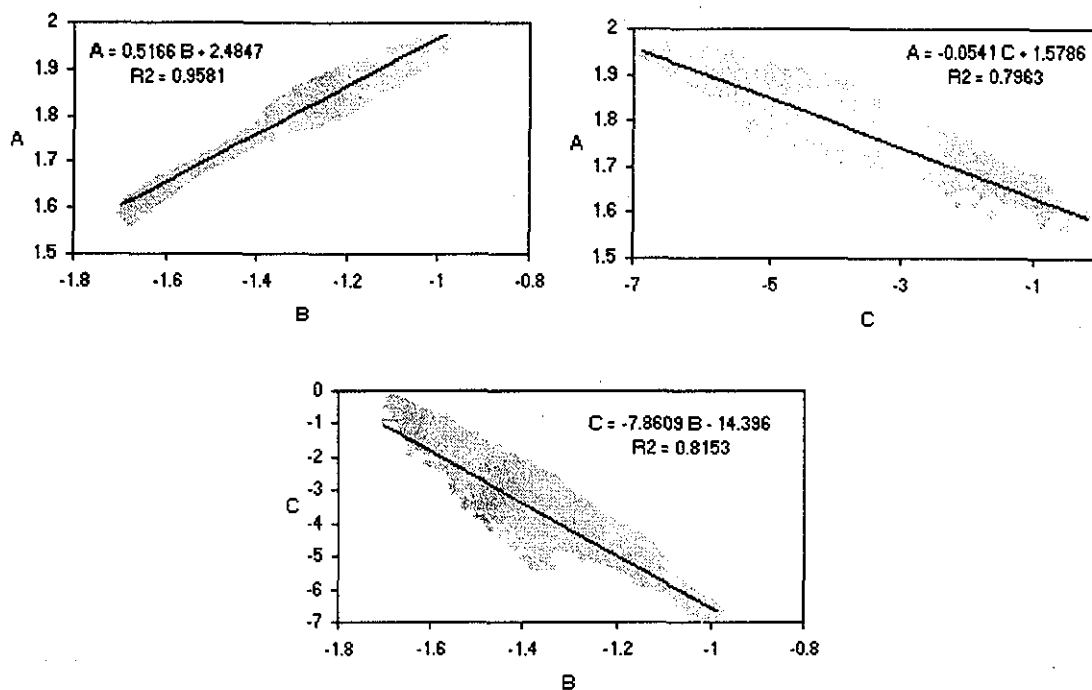


Figura 3.4

Al reemplazar las expresiones anteriores en la ecuación de cálculo de la velocidad, es posible reducir el número de constantes requeridas y por consiguiente, reducir el número de mapas necesarios para el cálculo. El inconveniente de la reducción de constantes es que el cálculo de la velocidad va perdiendo precisión por la dispersión observada en la relación lineal entre las constantes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4 RELACIÓN EMPÍRICA DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA LA RPDAP DEL DF

Las relaciones empíricas de vulnerabilidad sísmica (REVS) permiten, a través del ajuste de datos obtenidos en sismos pasados, comprender la variación del daño en algún componente del sistema con respecto a alguna medida de intensidad sísmica.

Existen diversas formas de utilizar las REVS. Por una parte, existen aquellas que relacionan una fracción del daño total en forma de porcentaje con respecto a una intensidad sísmica; en este caso el daño total estaría representado por el 100% de daño. Por otra parte, existen REVS en las cuales se representa el daño como un parámetro relativo a una distancia, por ejemplo: número de fugas por kilómetro.

Las primeras relaciones mencionadas son usadas generalmente en edificaciones propias de un sistema de recolección y tratamiento de agua. En este grupo se incluirían plantas de tratamiento, tanques de almacenamiento, válvulas de control de flujo, plantas de bombeo, hidroeléctricas, etc.

En el segundo grupo de REVS estarían incluidas las tuberías enterradas. Debido a que en esta tesis la estimación de daño sísmico se hace a partir de un análisis de vulnerabilidad para la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) para el Distrito Federal, se ha considerado únicamente REVS de este tipo, en el cual se estima el número de fugas por kilómetro de longitud de tubería.

Este capítulo inicia con una breve reseña histórica de las REVS desarrolladas con datos de fugas de varios sismos ocurridos alrededor del mundo en las últimas décadas.

El daño, tanto en las REVS usadas, como en la desarrollada en esta tesis, se define como una alteración de la tubería de conducción que requiere la asistencia de personal que realice la reparación hasta que el servicio pueda ser reestablecido en su totalidad. Es decir, se incluyen tanto las fracturas parciales (asociadas a las fugas de agua) como las totales en la tubería (asociadas al daño total), y está asociado a la ocurrencia de un evento sísmico caracterizado por un parámetro sísmico, en este caso la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS).

Este capítulo continúa describiendo tres modelos de relaciones de vulnerabilidad recientes; el primero de ellos es la REVS recomendada por la American Lifelines Alliance (A.L.A., 2001), en la cual se reúne información proveniente de un considerable número de sismos, incluyendo datos mexicanos. La principal característica de esta REVS es que incluye factores que permiten considerar los diferentes diámetros, materiales y conexiones de las tuberías, así como el tipo de suelo.

La segunda REVS presentada corresponde a la desarrollada con datos de fugas del sistema de agua EBMUD (East Bay Municipal Utility District) a causa del sismo de Loma Prieta, y fue elaborada por Eidinger (1998). Y finalmente, se muestra la REVS calculada con datos de fugas del sistema de distribución de agua LADWP (Los

Angeles Department of Water and Power) producidos por el sismo de Northridge (1994). Este trabajo fue hecho por O'Rourke y Jeon (1999).

Un resumen de los datos de fugas causados por el sismo de 1985 (Ayala y O'Rourke, 1989) es presentado con el propósito de resaltar los aspectos más importantes relacionados con las fallas en la RPDAP durante este sismo. Se describe además, datos adicionales que incluyen daños en tuberías mexicanas y en redes de tuberías de los Estados Unidos proporcionados por O'Rourke y Ayala (1993).

En las secciones 4.4 a 4.6 se desarrolla una REVS propia para la RPDAP del DF, basada en los datos de fugas del sismo de 1985 (Ayala y O'Rourke, 1989) y en los mapas de velocidad máxima del suelo para el DF desarrollados en esta tesis (capítulo 3). De esta forma, esta REVS muestra que efectivamente los daños esperados en la Ciudad de México son superiores a los registrados en otras partes del mundo.

En la parte final del capítulo se describe el concepto de "nivel de daño saturado" que puede ser útil para tomar decisiones de tipo económico cuando un sistema de distribución de agua llega al colapso casi total ante un evento sísmico.

4.1 Reseña histórica de las REVS

La estimación de daños en un sistema de distribución de agua ya existente debido al efecto de la propagación de ondas sísmicas se puede hacer teórica o empíricamente: teóricamente se haría analizando el comportamiento de la red de tuberías ante las deformaciones inducidas a causa de la deformación del suelo y empíricamente sería utilizando las REVS.

El análisis ideal del comportamiento sísmico de tuberías enterradas requiere de la completa caracterización de la red de tuberías a analizar y del conocimiento de las propiedades del suelo. Para esto es necesario conocer:

1. La ubicación espacial de la red y las propiedades de las tuberías.
2. Los niveles de velocidad y aceleración máxima de los sitios donde está ubicada la red durante eventos sísmicos. Se pueden utilizar leyes de atenuación y correcciones por efectos de sitio para estimar estos parámetros.
3. La velocidad de propagación de ondas sísmicas del suelo. En el caso de las ondas S es necesario conocer la velocidad de onda cortante de la capa superior de suelo y su ángulo de incidencia con respecto a la vertical. En el caso de las ondas R es necesario conocer la curva de dispersión del sitio.

Los dos primeros requerimientos son sencillos de obtener con respecto al tercero. Esto se debe a que, en general, la velocidad de propagación de ondas sísmicas depende de las características de los estratos que componen la corteza terrestre, que en algunos casos tienen patrones complejos que hacen difícil su análisis. Aunque se han desarrollado métodos simplificados para la obtención de la velocidad de propagación de ondas sísmicas (Ej: O'Rourke *et al*, 1984) es realmente complejo estimarla.

La utilización de las REVS permite estimar el daño en un sistema de conducción de agua de una forma más práctica, sin análisis complicados de la estructura del suelo, y que puede aplicarse en zonas extensas.

Generalmente, las REVS están basadas en la evidencia de daños a causa de eventos sísmicos pasados. La experiencia de peritos en el tema y algunas comparaciones entre casos vistos, son otros recursos que permiten complementar la información recopilada para calcular una REVS adecuada. A pesar de eso, un catálogo que contenga todos los tipos de tubería sujeta a todos los niveles de intensidad sísmica no existe.

Desde la década de los 80, en universidades e institutos de investigación de los Estados Unidos, la forma de relacionar el daño de las tuberías con los eventos sísmicos se reducía a una expresión que asociaba el número de fugas por unidad de longitud con la Intensidad Modificada de Mercalli, considerando factores que dependían del tipo de suelo y diámetro de la tubería. Una herramienta muy usada para la estimación del daño fue el Proceso de

Poisson, en el cual se consideraba la completa rotura de la tubería. La base fundamental de estas expresiones era la experiencia de los investigadores y datos históricos de eventos pasados.

Eguchi *et al* (1983) desarrolló una expresión para estimar el daño en tuberías de hierro fundido separando el daño causado por la propagación de ondas sísmicas del causado por deformación permanente del suelo. La expresión permite estimar el daño en las tuberías en función de la intensidad modificada de mercalli MMI.

Por otra parte, en 1975 en Japón (Katayama *et al*, 1975), se relacionó el daño con la aceleración máxima del terreno y la condición del suelo, usando como fuente registros de sismos recientes ocurridos en todo el mundo. Lo más relevante en este estudio es que se consideró la condición del suelo como factor crítico en la determinación de la vulnerabilidad.

Sólo fue hasta 1988 cuando Barenberg relacionó el daño con la velocidad máxima del terreno. El análisis se realizó computando el número de fugas por kilómetro, causadas por cuatro sismos ocurridos, y la velocidad máxima en los sitios donde se presentaron los daños.

El uso de la velocidad máxima del suelo mejora la estimación de la vulnerabilidad (sísmica) en el sentido de que se tiene un parámetro sísmico objetivo, calculado con base en registros obtenidos con aparatos modernos de precisión. Diferente al uso de la Intensidad Modificada de Mercalli en la cual el criterio del perito es el que determina el efecto sísmico, lo cual es una medida subjetiva.

Complementando el trabajo de Barenberg, O'Rourke y Ayala (1993) incluyeron datos de tuberías de gran diámetro de asbesto cemento, concreto, concreto presforzado; así como de diámetros menores de hierro fundido y asbesto cemento; provenientes de los sismos ocurridos en la Ciudad de México (1985 y 1989) y Coalinga (1983).

Luego del sismo de Loma Prieta ocurrido en 1989, Eidinger (1998) y Eidinger *et al* (1995) clasificaron los daños en cuatro niveles de velocidad máxima del terreno y tres tipos de tuberías. De esta forma ajustaron ecuaciones que permitían relacionar el número de fugas por cada 1000 pies de red con la velocidad pico del suelo para cada material de fabricación. Algo novedoso en este estudio fue la utilización de un sistema de información geográfica SIG para la localización de las tuberías y el ajuste de leyes de atenuación para la estimación de la velocidad máxima del suelo. A pesar de que el comportamiento de las tuberías de acero depende de la edad, suelo corrosivo, calidad de construcción, diámetro y otros factores, éstos no fueron incluidos en este estudio.

Ballantyne *et al* (1990), presentan un modelo que considera el comportamiento relativo de tuberías ante sismos. Para tal fin, los autores asignaron valores de 1 a 5 que representaban la capacidad sísmica (1 es baja y 5 es alta) para cada tipo de tubería, de acuerdo con 4 características: rugosidad, capacidad de pandeo, flexibilidad de la junta y capacidad de oposición a desplazamientos. De esta forma se puede diferenciar las tuberías que mejor se comportan ante sismos.

O'Rourke y Jeon (1999), en el análisis de daños del sismo de Northridge (1994) clasificaron los daños dependiendo del nivel de daño (6), material de la tubería (4), y se incluyeron tuberías con diámetro igual e inferior a 24". Con el fin de normalizar los datos, se retiró información relacionada con daños en conexiones al usuario final, duplicación de registros de daños o incertidumbre en el material o diámetro de la tubería y datos correspondientes a tuberías mayores a 24" de diámetro.

Eidinger y Avila (1999) desarrollaron una expresión para el cálculo de daños basada en los daños del sismo de Loma Prieta (1999); allí se incluyen factores que dependen del diámetro, material y tipo de unión de la tubería. También incluye un factor relacionado con la corrosión que puede ocasionar el suelo. Adicionalmente, a cada factor está asociado un índice de calidad que indica qué tan confiable es el cálculo.

Recientemente la organización American Lifeline Alliance (A.L.A., 2001) reunió 81 datos de sismos ocurridos en el mundo (se incluyen sismos ocurridos en México) y define una relación de vulnerabilidad estándar, modificada por una serie de factores que dependen del diámetro, material, tipo de unión de la tubería y nivel de corrosividad del suelo.

4.2 Algunos modelos de REVS

En esta sección se describen tres modelos de relaciones de vulnerabilidad desarrollados recientemente. El primero es el calculado por la organización A.L.A.(2001). Esta REVS consiste en una expresión que permite calcular el daño esperado y un grupo de factores de corrección que dependen del tipo de tubería y del suelo. Debido a que los factores usados en esta REVS no incluyen valores para todos los materiales y diámetros usados en la RPDAP del DF, se calcularon valores equivalentes basados en el comportamiento sísmico relativo con respecto a materiales que sí están incluidos. Esto fue posible ya que en esta REVS los factores de corrección están linealmente asociados a los valores de daño y el autor de esta REVS usó la comparación del daño sísmico como recurso para la obtención de la mayoría de factores.

Las otras dos relaciones descritas son la de Eidinger (1998) que se basa en datos de fugas causadas por el sismo de Loma Prieta y la de O'Rourke y Jeon (1999) basada en datos del sismo de Northridge.

Estos tres modelos son comparados con la REVS expuesta en esta tesis y utilizados en para calcular cuánto más o menos susceptibilidad de recibir daño causado por sismos tiene la RPDAP con respecto a otros sistemas de distribución de agua; esto se encuentra en la sección 5.3.

4.2.1 American Lifelines Alliance

ALA (2001) desarrolló formulaciones de fragilidad para componentes de un sistema de distribución de agua, tales como: tanques de almacenamiento, túneles de transporte, canales de agua, accesorios, y tuberías enterradas de distribución de agua.

Con respecto a las formulaciones de fragilidad para tuberías enterradas de distribución de agua (aquí llamada REVS), se analizan independientemente los daños causados por la propagación de ondas sísmicas y la deformación permanente del suelo. Debido a que en esta tesis se considera únicamente el efecto de la propagación de ondas, se tomará en cuenta sólo la REVS por este concepto.

La REVS que expresa la variación del daño con respecto a la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS) es:

$$RR = 0.00241542 \cdot K \cdot VMHS$$

Donde RR es la tasa de daño representada como el número de fugas por cada kilómetro de tubería; K es un factor que depende de las características de la tubería y/o del suelo, $VMHS$ está en cm/s. Los datos usados para la determinación de esta REVS son los mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Sismos usados por ALA (2001)

EVENTO SÍSMICO	Puntos	Porcentaje
Kobe (1995)	9	11%
Northridge (1994)	35	43%
Loma Prieta (1989)	13	16%
San Fernando (1971)	13	16%
Otros Sismos (8)	11	14%
TOTAL	81	100%

El material de las tuberías consideradas para este análisis, tiene las proporciones mostradas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Materiales usados por ALA (2001)

MATERIAL	Puntos	Porcentaje
Hierro Fundido	38	47%
Acero	13	16%
Asbesto Cemento	10	12%
Hierro	18	22%
Concreto	2	3%
TOTAL	81	100%

La REVS desarrollada por ALA(2001) corresponde a una línea recta, que cuando K es igual a 1 representa el comportamiento promedio para todos los tipos de tuberías independientemente de su diámetro, material, tipo de conexión y tipo de suelo. Sin embargo, presenta una gran dispersión pues tiene una desviación estándar del logaritmo natural del ajuste $\beta=1.15$; sin embargo, el factor K permite hacer una adecuada estimación del daño dependiendo de las características de la tubería.

Debido a que esta tesis estima el daño en tuberías de diámetros entre 20 y 72", sólo se indicarán los factores K para tuberías grandes (mayores a 16"), que son los mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Factores K recomendados por ALA (2001)

MATERIAL	TIPO DE UNION	SUELO	K
Acero soldado	Soldadura en arco	Todos	0.15
Concreto con Cilindro de acero	Soldadura en arco	Todos	0.7
Concreto con Cilindro de acero	Cemento	Todos	1.0
Concreto con Cilindro de acero	Empaque de hule	Todos	0.8

En el apéndice A se presenta la tabla completa de factores K para todos los diámetros.

Sugerencias adicionales dadas por A.L.A., (2001), indican que para tuberías fabricadas de hierro fundido de gran diámetro (de 16" y mayores) el factor K recomendado es el 50% que el dado para diámetros menores. Teniendo en cuenta esto, los valores son los mostrados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Factores K para tuberías de hierro fundido (ALA, 2001)

MATERIAL	TIPO DE UNION	SUELO	K
Hierro fundido	Cemento	Todos	0.5
	Cemento	Corrosivos	0.7
	Cemento	No corrosivos	0.35
	Empaque de hule	Todos	0.4

Debido a que las tablas anteriores no incluyen factores *K* para tuberías de asbesto cemento (con junta de cemento y para todo tipo de suelo) de gran diámetro, con base en comparaciones entre este tipo de tubería y otros tipos, se estimó que el valor más adecuado, teniendo en cuenta la calidad de los datos, es 2.0. (Apéndice A)

4.2.2 REVS con datos del sismo de Loma Prieta (1989)

En un estudio realizado por Eidinger (1998) se utilizó un sistema de información geográfica SIG para analizar los datos de daño de más de 3300 millas de tuberías del sistema de agua EBMUD (East Bay Municipal Utility District) expuestas a varias intensidades de movimiento del suelo en el sismo de Loma Prieta de 1989. Algunos modelos de atenuación fueron desarrollados para estimar el nivel de velocidad máxima del suelo asociado a cada tramo de la red; éstos fueron calibrados con los valores obtenidos a partir de registros sísmicos de 12 estaciones existentes en el área de daño.

Los datos de daño fueron organizados en cuatro grupos de velocidades máximas horizontales del suelo (VMHS) para cada uno de los tres materiales de la red. En total fueron 12 datos que se encuentran en la tabla 4.5 y figura 4.1.

Tabla 4.5 Tasas de daño para diferentes materiales (Eidinger, 1998)

VMHS pulg/s	HIERRO FUNDIDO NR/1000 pies	ASBESTO CEMENTO NR/1000 pies	ACERO SOLDADO NR/1000 pies
3	0.00560	0.00341	0.00253
5	0.01230	0.00239	0.00841
7	0.00517	0.00086	0.00610
17	0.09189	0.01230	0.14826

NR = Número de reparaciones

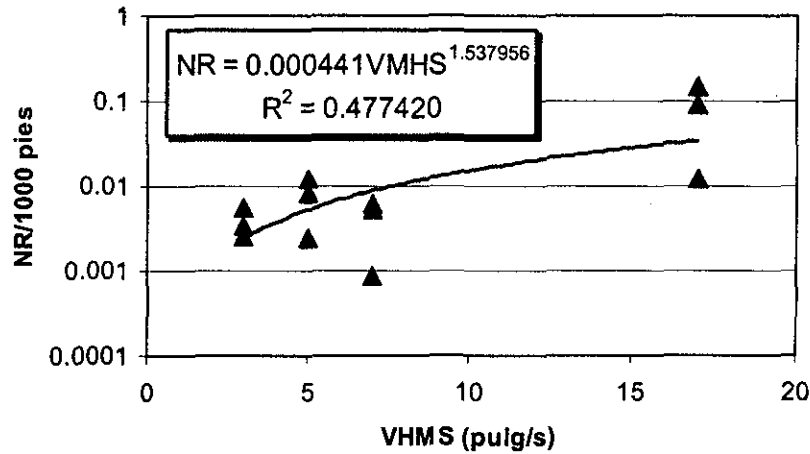


Figura 4.1 Relación de vulnerabilidad desarrollada por Eidinger (1998)

Eidinger (1988) presenta adicionalmente curvas para cada tipo de material (figura 4.2). Estas no fueron tenidas en cuenta para la comparación propuesta en la sección 5.3 debido a que los materiales del sistema de distribución de agua EBMUD (East Bay Municipal Utility District) no son los mismos que el de la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del DF. Sin embargo, la curva de ajuste general sí fue considerada en la comparación pues representa la tasa promedio de daño para cada nivel de velocidad máxima del suelo y puede servir de referencia para conocer que tan vulnerable es la RPDAP.

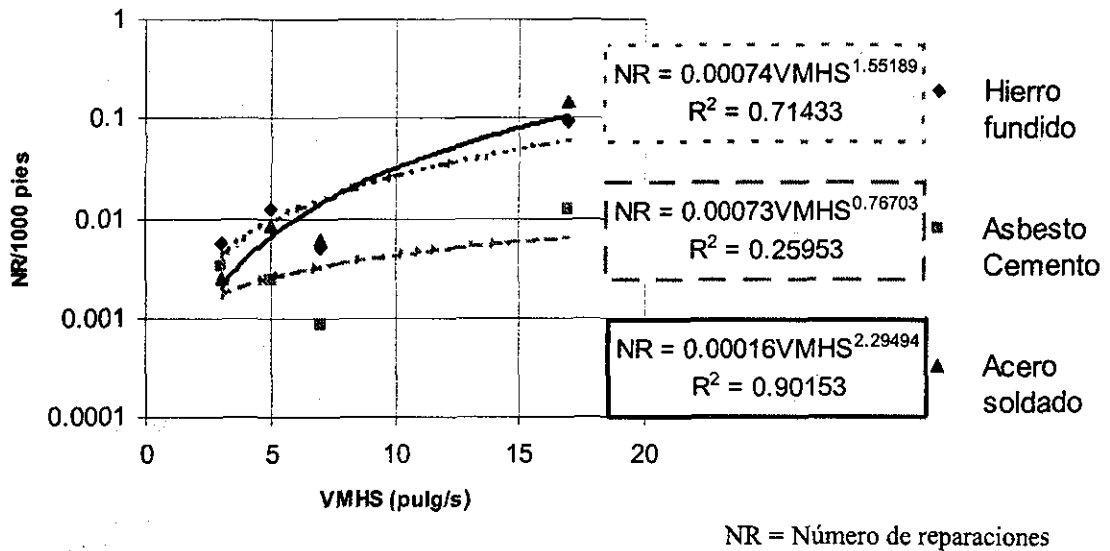


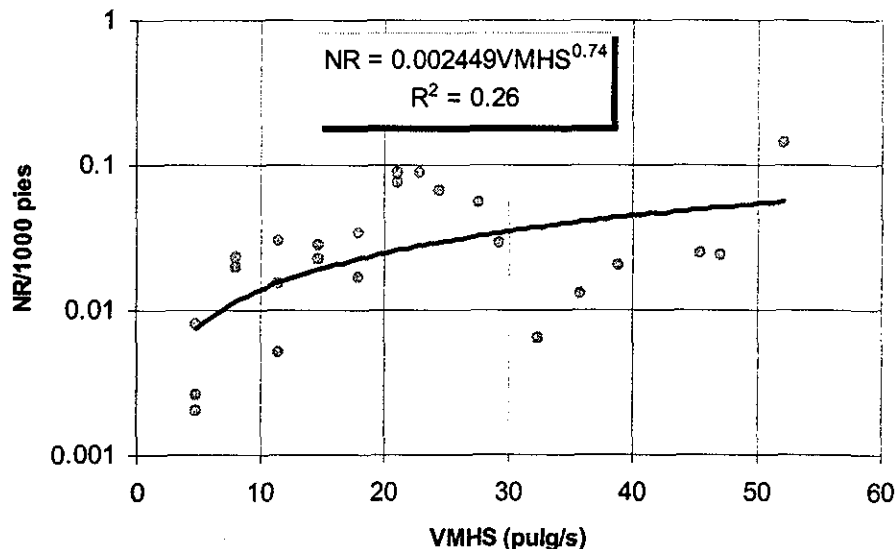
Figura 4.2 Relaciones de vulnerabilidad sísmica para tuberías de diferentes materiales (Eidinger, 1998)

4.2.3 REVS con datos del sismo de Northridge (1994)

El estudio de O'Rourke y Jeon (1999) comprende la revisión de las fugas del sistema de conducción de agua LADWP (Los Angeles Department of Water and Power) causadas por el sismo de Northridge ocurrido en 1994.

El sistema LADWP está conformado por tuberías de hierro, asbesto cemento y acero con diámetros superiores a 24 pulgadas, con una extensión total de 9242 km.

En este estudio los daños fueron correlacionados con el mayor valor de velocidad pico entre las componentes N-S y E-W del sitio instrumentado más cercano a la falla. La gráfica de los valores y su respectivo ajuste se presenta en la figura 4.3.



NR = Número de reparaciones
Figura 4.3 Relación de vulnerabilidad desarrollada por O'Rourke y Jeon (1999)

4.3 Aspectos generales de la REVS propuesta

La relación de vulnerabilidad propuesta por esta tesis está basada únicamente en datos del daño causado por el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la RPDAP del Distrito Federal. Los datos de fugas fueron tomados del trabajo de O'Rourke y Ayala (1993). En este informe técnico, los autores presentan un resumen de los daños observados en los sistemas de agua potable primario y secundario en el Distrito Federal y el Estado de México, así como en otras estructuras enterradas como la red de drenaje y el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México; presentan además un reporte de daños en el área epicentral del sismo. La sección 6.2 contiene más detalles acerca del origen de los datos utilizados en el cálculo de la REVS.

La RPDAP cubre 9 de las 16 delegaciones del Distrito Federal; de las 9 sólo en 6 se presentaron daños. El resumen del número de fugas por delegación, bien documentadas, se presenta en la tabla 4.6. La figura 4.4 muestra las 9 delegaciones donde se encuentra la RPDAP y señala las 6 donde se presentaron daños (área sombreada).

Tabla 4.6 Resumen de daños causados por el sismo de 1985

DELEGACIÓN	No. Fugas
Gustavo A. Madero	32
Cuauhtemoc	32
Venustiano Carranza	37
Benito Juárez	10
Iztacalco	19
Iztapalapa	29

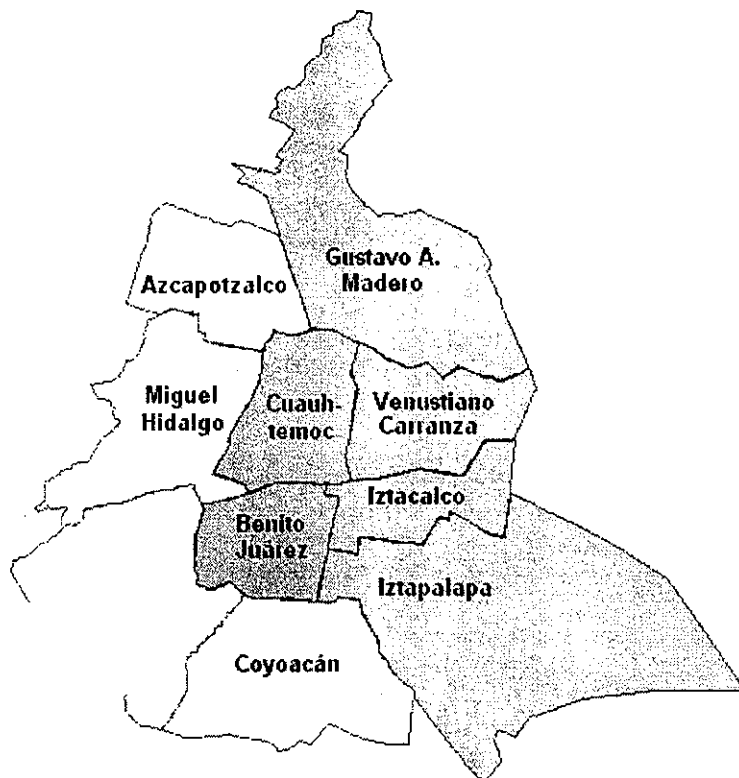


Figura 4.4 Delegaciones que cubre la RPDAP

En estas seis delegaciones se presentaron 159 de las 175 fugas registradas en todas las delegaciones del DF. Las 16 fugas ocurridas en las demás delegaciones corresponden a sistemas alternos de distribución de agua, como son los sistemas Lerma y Cutzamala, que distribuyen el agua en la zona sur del DF y son independientes de la red primaria, estudiada en esta tesis.

4.4 Cálculo de la REVS

Para el cálculo de una relación de vulnerabilidad que permitiera estimar el daño en las tuberías para un determinado nivel de velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS), se ubicó espacialmente la red de tuberías, las fugas y el mapa de velocidades para el sismo de 1985. Este mapa fue obtenido al promediar los valores de velocidad para las componentes N-S y E-W para este sismo (sección 3.4.1).

Debido a que la estimación de la VMHS es puntual para cada sitio en el DF, se utilizaron diferentes intervalos de valores de la VMHS para calcular el daño promedio. El daño se consideró como el número de fugas presentes en cada intervalo dividido en la longitud en kilómetros de la red correspondiente a ese mismo intervalo.

En la tabla 4.7 se presenta el tamaño y número de intervalos de VMHS considerados en este análisis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.7 Descripción de los intervalos de VMHS

INTERVALO DE VMHS (cm/s)	Número de intervalos
8.7	11
9.5	10
10.6	9
11.9	8
13.6	7
15.9	6
19.0	5
23.8	4
31.7	3

En el apéndice C se muestra la variación del daño con la VMHS para los intervalos considerados. En general, se observa que a medida que los intervalos de VMHS son más pequeños aumenta la dispersión de los puntos y es más probable que haya intervalos sin fugas. Por esta razón, se consideró apropiado tomar intervalos de VMHS iguales o superiores a 8.7 cm/s de forma que en todos los intervalos incluyeran como mínimo una fuga.

Los intervalos de VMHS están uniformemente distribuidos desde el valor de velocidad cero hasta el máximo presente en la red. En la tabla 4.8 se muestran los valores mínimos y máximos de velocidad asociados a las fugas y a la red. Se aprecia que la diferencia entre la velocidad mínima en la cual se presentaron fugas y la velocidad mínima presente en la red es 2.043 cm/s, esto sugiere que para velocidades inferiores a 6.11 cm/s es posible que no se presenten fugas en sismos futuros.

Tabla 4.8 VMHS para las fugas registradas y la RPDAP para el sismo de 1985

	Velocidad máxima horizontal del suelo (cm/s)	
	Fugas	Red
Mínimo	6.11	4.057
Máximo	95.05	95.83

Con el propósito de generar una REVS que pueda ser usada puntualmente y no por intervalos, se graficaron todos los puntos de forma que se observara la tendencia general y se pudiera calcular una curva promedio que permitiera estimar el daño para cada nivel de VMHS. Se graficaron estos puntos en escalas aritmética y logarítmica con el propósito de apreciar mejor su tendencia (figuras 4.5 y 4.6).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

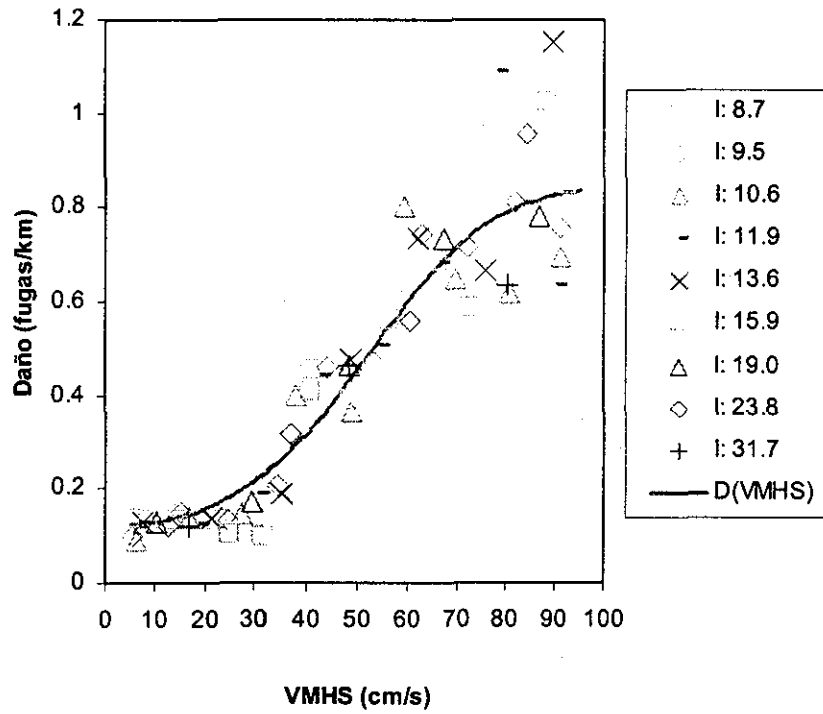


Figura 4.5 Gráfica de los puntos de daño por intervalos (escala aritmética)

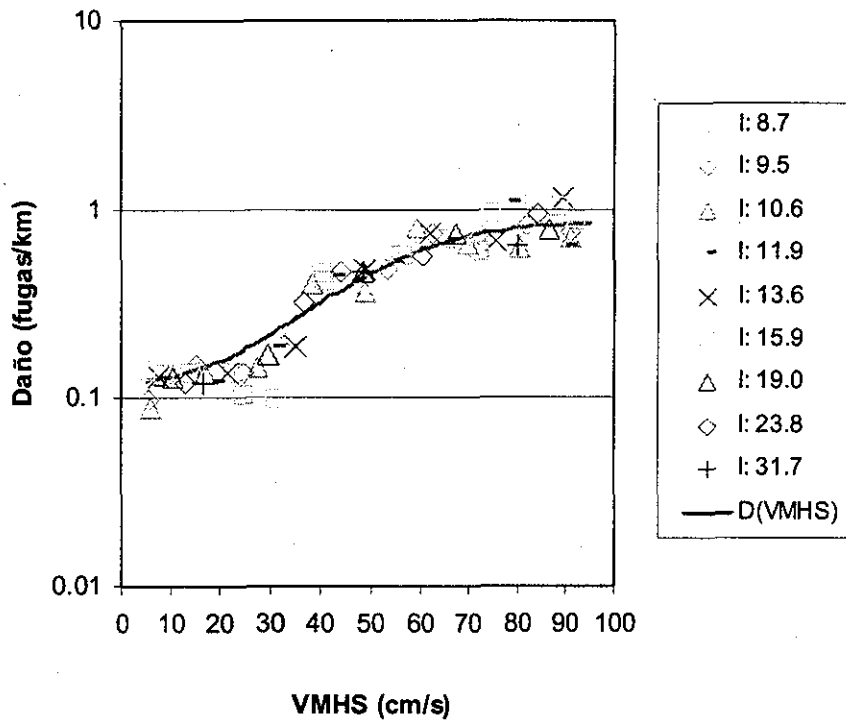


Figura 4.6 Gráfica de los puntos de daño por intervalos (escala logarítmica)

La gráfica en escala logarítmica (figura 4.6) muestra tres etapas en la tendencia de los valores. Inicialmente se aprecia que el daño es casi constante, luego se incrementa exponencialmente (lineal en esta gráfica) y finalmente el daño tiende a hacerse constante.

La gráfica en escala aritmética (figura 4.5) muestra similar tendencia que la gráfica logarítmica, pero nos permite apreciar mejor el incremento en la dispersión de los datos a medida que aumenta la VMHS. También se observa que la tendencia de los datos tiene forma de S, y es similar a la forma de la función de distribución de probabilidad normal acumulada y por esta razón se realizó el ajuste de datos con esta función.

La ecuación ajustada para valores de VMHS entre 5.35 y 95 cm/s tiene la siguiente forma:

$$D(V) = A + B \cdot \hat{n}(V; \mu, \sigma)$$

V representa la VMHS y \hat{n} es la función de distribución normal definida de la siguiente forma:

$$\hat{n}(V; \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^V \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(1/2)[(v-\mu)/\sigma]^2} dv$$

A , B , μ y σ son los parámetros que definen esta curva, sus valores son los siguientes:

A = 0.7281	B = 0.1172	$\mu = 51.8964$	$\sigma = 19.7811$
-------------------	-------------------	-----------------------------------	--------------------------------------

La REVS calculada hace una adecuada estimación de daños cuando la VMHS del suelo está entre 5.35 y 95 cm/s. Para VMHS inferiores a 5.35 cm/s se considera que el daño es nulo. Sin embargo, las fallas a VMHS cercanas a ese valor pueden presentarse por otras razones diferentes a la propagación de ondas sísmicas. Esto puede deberse a que la tubería antes del sismo posiblemente se encontraba en condiciones anormales de servicialidad sin que se hayan detectado escapes de agua; entonces, al generarse el sismo, una velocidad del suelo baja puede producir una fuga en la tubería y afectar el normal suministro de agua. Las condiciones anormales de servicialidad se refieren a deterioro de la tubería y pueden deberse al efecto de sismos anteriores, la subsidencia y otros factores que tal vez tengan que ver con los efectos de sitio del suelo.

Para velocidades máximas del suelo superiores a 95 cm/s la ecuación propuesta asintóticamente llega al valor medio de daño 0.8453 fugas/km. Es posible que esto no sea cierto debido a que es improbable que cuando la velocidad del suelo sea cercana a 95 cm/s el número de fugas sea el mismo (en la sección 5.5 se define el concepto de nivel de daño saturado). Por tal razón, se adoptó el criterio de conservar la pendiente de la curva cuando la VMHS es 95 cm/s, de forma que para velocidades superiores el daño calculado aumente linealmente. La forma de la ecuación de $D(V)$ para velocidades superiores a 95 cm/s es:

$$D(V) = m \cdot V + b$$

Los valores de m y b son 0.00137 y 0.70458, respectivamente.

En resumen, las ecuaciones que permiten estimar el daño $D(V)$ son:

$$D(0 < V < 5.35) = 0$$

$$D(5.35 \leq V < 95) = 0.7281 + 0.1172 \cdot n(V; 51.8964, 19.7811)$$

$$D(V \geq 95) = 0.00137 \cdot V + 0.70458$$

La siguiente figura muestra la forma de la REVS definida por las anteriores ecuaciones.

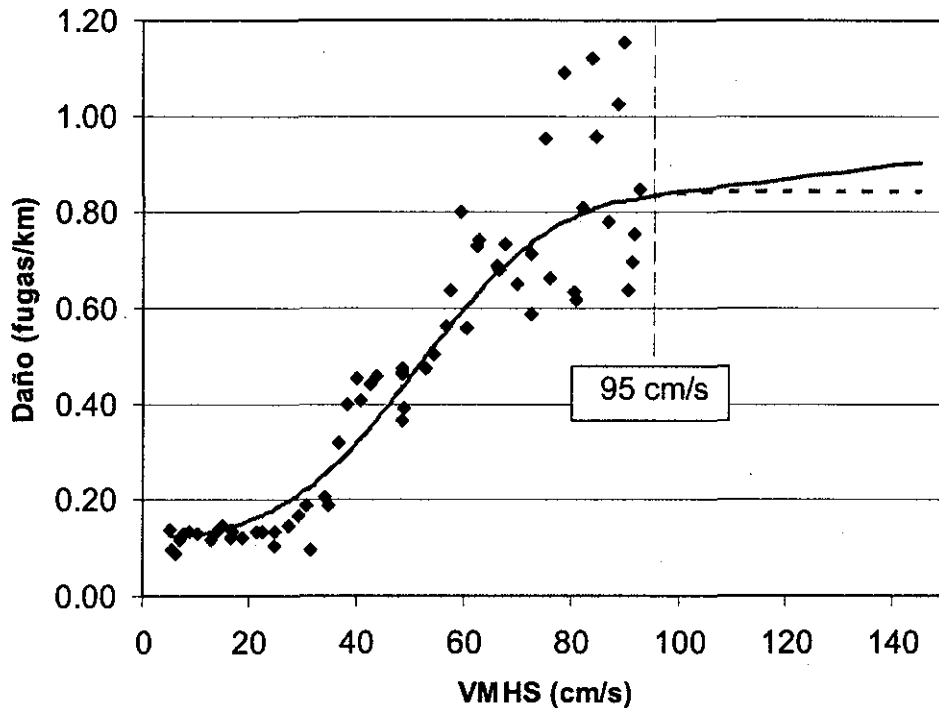


Figura 4.7 Relación empírica de vulnerabilidad sísmica

Es difícil saber si la forma lineal adoptada para la parte final de la REVS propuesta estima adecuadamente el daño para velocidades del suelo mayores a 95 cm/s. Sólo disponiendo de datos de daños causados por sismos con magnitudes superiores a la del sismo de 1985 se podría reducir la incertidumbre; sin embargo, se espera que no vuelvan a ocurrir sismos de proporciones tan grandes en la Ciudad de México.

4.5 Análisis de la REVS

A continuación se presenta la gráfica de la REVS estimada en la sección anterior (figura 4.8), que aquí se denota como $f(V)$, siendo V la velocidad máxima del suelo. Las gráficas 4.9 y 4.10 presentan la primera y segunda derivada de $f(V)$ con el fin de conocer la variación de la pendiente de la gráfica y sus puntos de inflexión.

En estas gráficas se muestra que cuando $V = \mu$ se presenta la máxima pendiente de $f(V)$, lo que indica que el incremento en la tasa de daño es máximo. La velocidad en este punto es 51.9 cm/s.

Los puntos donde $V = \mu - \sigma$ y $V = \mu + \sigma$ presentan los cambios de concavidad en $f(V)$ y se pueden considerar como los límites de la zona de máxima pendiente de $f(V)$. Esta zona estaría limitada por los valores de velocidad 32.12 y 71.68 cm/s.

La principal conclusión de este análisis es que cuando la velocidad del suelo ante un evento sísmico supera los 32.12 cm/s la tasa de daño aumenta más rápidamente, llegando a su máximo en 51.9 cm/s y reduciendo su rapidez de crecimiento hasta llegar a los 95 cm/s donde se hace constante.

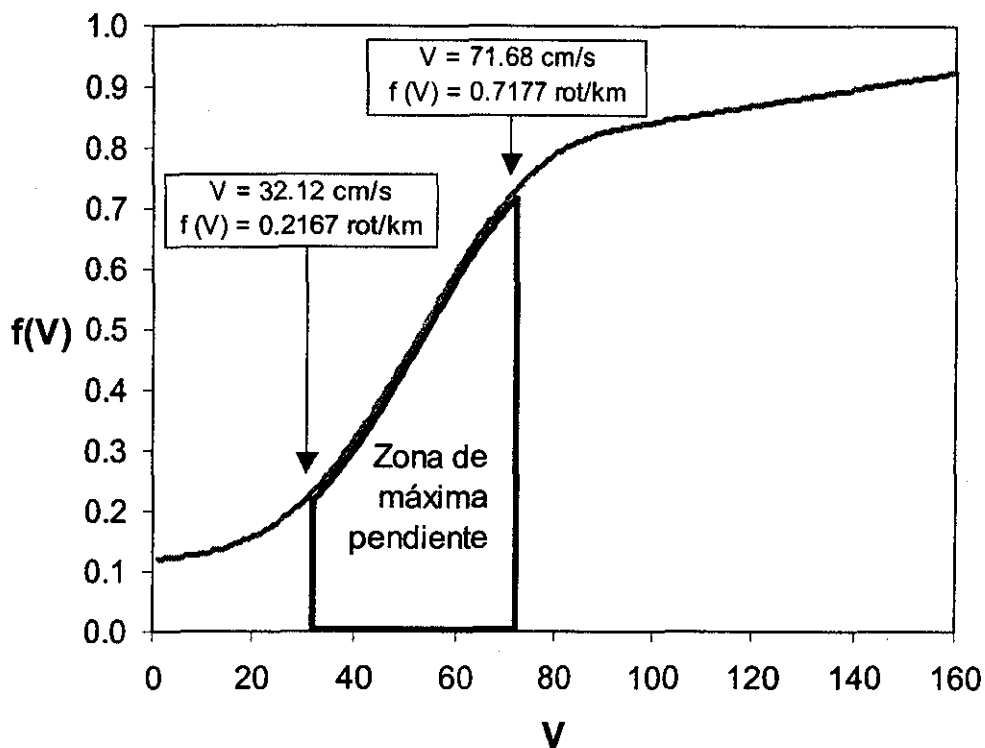


Figura 4.8 Relación de vulnerabilidad sísmica $f(V)$

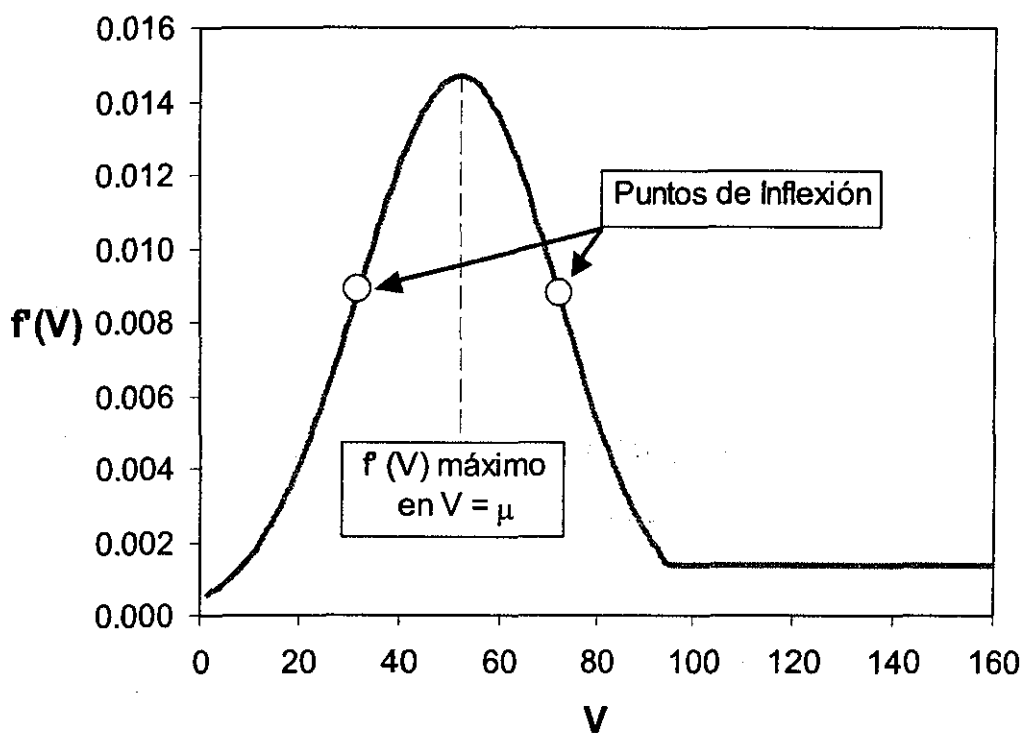
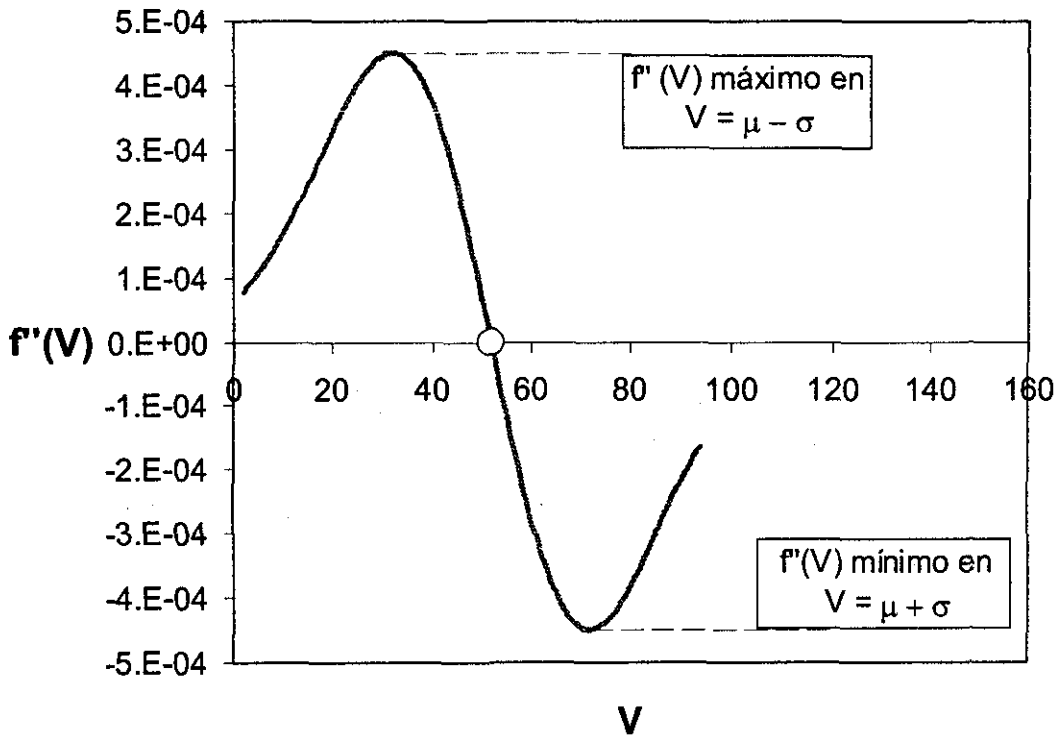


Figura 4.9 Primera derivada de $f(V)$

Figura 4.10 Segunda derivada de $f(V)$

4.6 Intervalos de confianza

Con el propósito de estimar un número de fugas máximo y mínimo esperadas ante un evento sísmico con un determinado nivel de confianza en el cálculo, se realizó el análisis de los intervalos de confianza para la estimación del daño para velocidades del suelo entre 5.35 y 95 cm/s. Para velocidades superiores a 95 cm/s, al igual que en la curva básica, se consideró continuar linealmente la variación del daño con la velocidad.

La figura 4.11 corresponde a la variación de la diferencia entre los valores de daño de los intervalos D_{int} y los valores ajustados D_{aj} con respecto a la VMHS. Se aprecia que la diferencia aumenta con la velocidad; por consiguiente, la desviación estándar también.

Debido a que los intervalos de confianza dependen de la desviación estándar, es necesario buscar otra forma de estimar el error en el cálculo consiguiendo que la desviación estándar sea constante. Al graficar el error como el logaritmo natural de la relación entre D_{int} y D_{aj} se obtuvo la figura 4.12.

En la figura 4.12 se aprecia que el error sigue una tendencia aproximadamente constante para todo el intervalo de velocidades. Esto sugiere que una distribución lognormal para el error sería adecuada para calcular los intervalos de confianza. Esto se comprueba al hacer un histograma con los puntos de la gráfica y comprobar que corresponden aproximadamente a una curva normal. En la siguiente gráfica se aprecia el histograma de frecuencias relativas que tiene como intervalo de clase una desviación estándar de la muestra de puntos $\sigma_{\ln e} = 0.2237$. La tabla que se presenta posteriormente resume el cálculo de la variación del error calculado como $D_{int} - D_{aj}$ y $\ln(D_{int}/D_{aj})$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

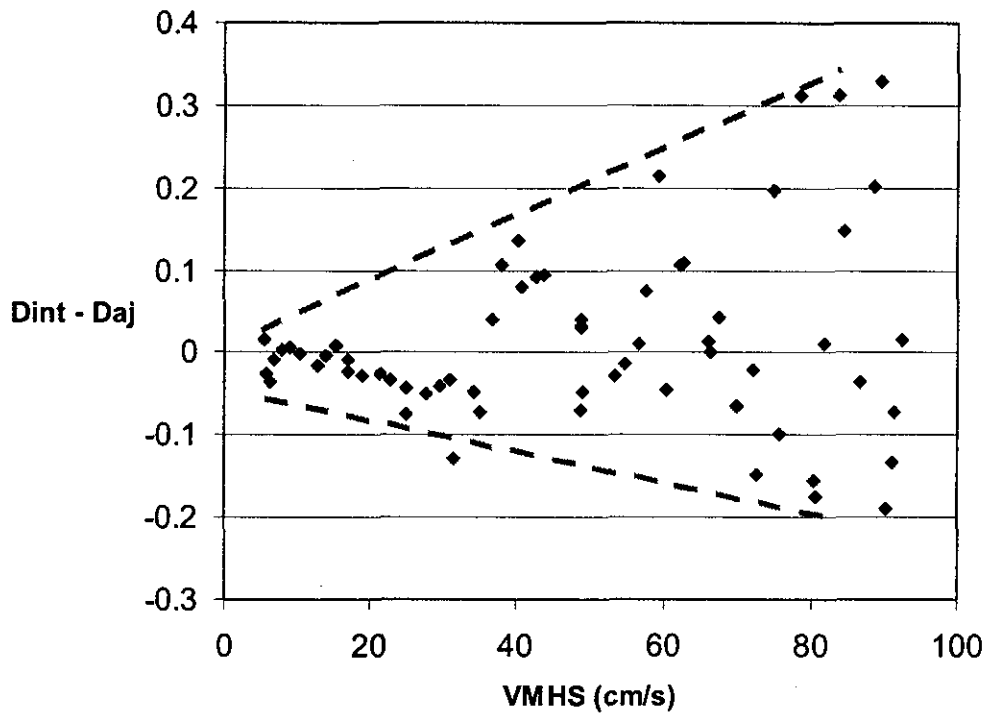


Figura 4.11 Variación del error medido como $e = D_{int} - D_{aj}$

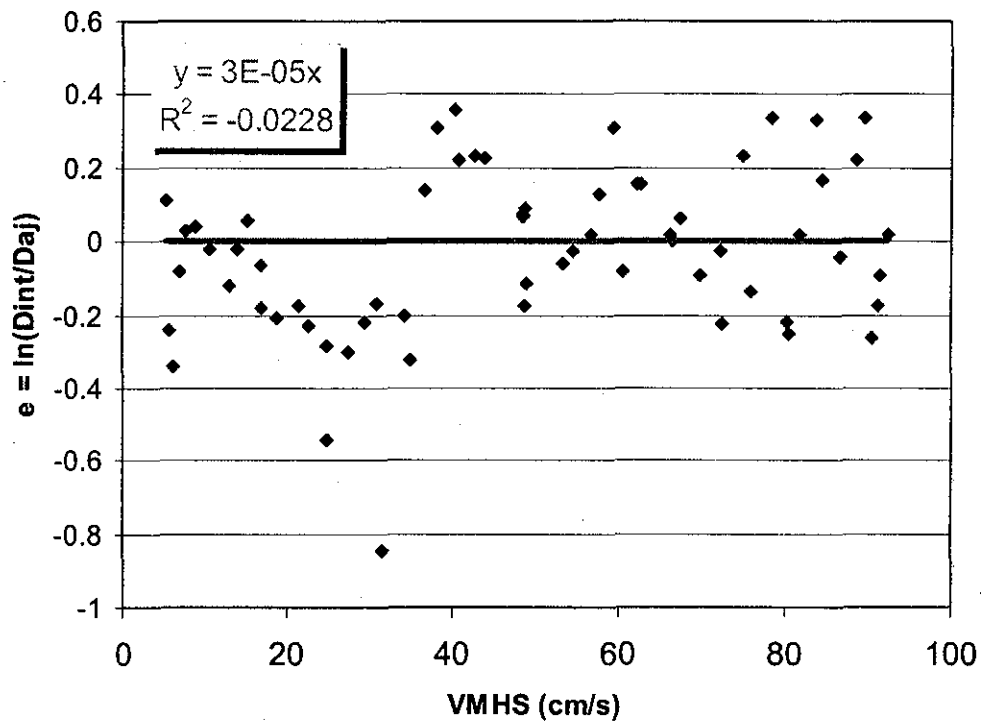


Figura 4.12 Variación del error medido como $e = \ln(D_{int}/D_{aj})$

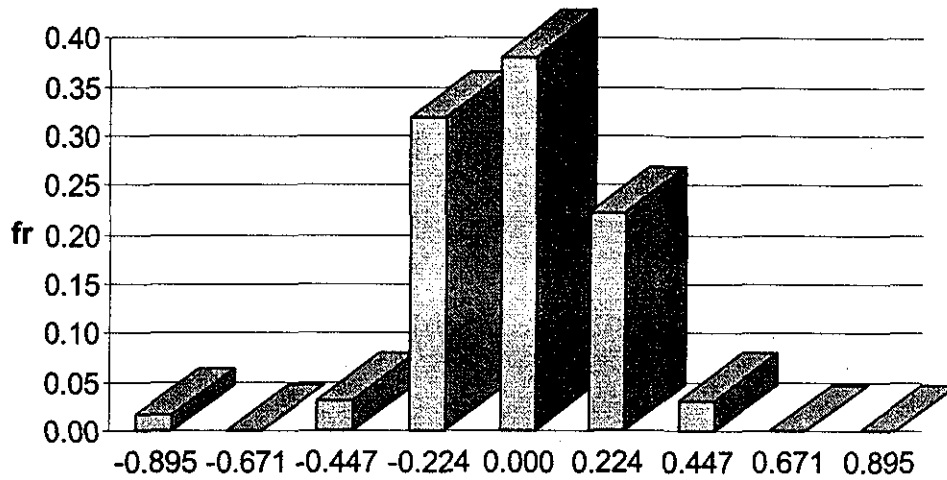


Figura 4.13 Histograma de frecuencias relativas de la distribución del error

Tabla 4.9 Resumen del cálculo del error

VMHS	Daño calculado	Daño ajustado	Dint - Daj	$e = \ln(Dint/Daj)$
(cm/s)	(fugas/km)	(fugas/km)	(fugas/km)	
5.35	0.1385	0.1240	0.0145	0.1108
5.75	0.0977	0.1244	-0.0267	-0.2418
6.30	0.0889	0.1249	-0.0361	-0.3407
6.95	0.1161	0.1256	-0.0096	-0.0792
7.80	0.1299	0.1266	0.0033	0.0258
8.95	0.1329	0.1281	0.0048	0.0366
10.50	0.1280	0.1305	-0.0025	-0.0193
12.90	0.1195	0.1350	-0.0154	-0.1215
14.05	0.1346	0.1375	-0.0029	-0.0212
15.25	0.1483	0.1405	0.0078	0.0540
16.85	0.1212	0.1451	-0.0239	-0.1799
16.90	0.1363	0.1452	-0.0089	-0.0634
18.85	0.1230	0.1517	-0.0287	-0.2098
21.40	0.1357	0.1621	-0.0264	-0.1776
22.75	0.1341	0.1684	-0.0343	-0.2278
24.75	0.1350	0.1791	-0.0441	-0.2828
24.85	0.1045	0.1797	-0.0752	-0.5421
27.50	0.1450	0.1964	-0.0514	-0.3037
29.50	0.1695	0.2110	-0.0415	-0.2192
30.75	0.1868	0.2210	-0.0342	-0.1680
31.45	0.0976	0.2269	-0.1294	-0.8442
34.25	0.2060	0.2528	-0.0468	-0.2046

Continúa en la página siguiente

VMHS	Daño calculado	Daño ajustado	Dint - Daj	$e = \ln(Dint/Daj)$
(cm/s)	(fugas/km)	(fugas/km)	(fugas/km)	
35.00	0.1885	0.2603	-0.0718	-0.3227
36.70	0.3188	0.2783	0.0405	0.1360
38.10	0.4001	0.2940	0.1061	0.3082
40.15	0.4546	0.3184	0.1362	0.3560
40.75	0.4060	0.3259	0.0801	0.2199
42.65	0.4419	0.3503	0.0916	0.2323
43.75	0.4583	0.3650	0.0933	0.2277
48.50	0.4644	0.4317	0.0327	0.0731
48.55	0.4625	0.4324	0.0301	0.0674
48.60	0.4741	0.4331	0.0410	0.0905
48.70	0.3641	0.4346	-0.0705	-0.1770
48.85	0.3896	0.4367	-0.0472	-0.1143
53.25	0.4727	0.5012	-0.0284	-0.0583
54.55	0.5054	0.5201	-0.0147	-0.0287
56.65	0.5614	0.5504	0.0110	0.0198
57.55	0.6384	0.5632	0.0752	0.1254
59.30	0.8006	0.5875	0.2131	0.3094
60.50	0.5575	0.6038	-0.0462	-0.0796
62.20	0.7318	0.6260	0.1058	0.1562
62.75	0.7408	0.6330	0.1078	0.1572
66.25	0.6876	0.6749	0.0127	0.0186
66.45	0.6794	0.6772	0.0022	0.0033
67.50	0.7326	0.6887	0.0438	0.0617
69.90	0.6489	0.7133	-0.0644	-0.0946
72.25	0.7140	0.7349	-0.0208	-0.0288
72.55	0.5893	0.7374	-0.1482	-0.2243
74.95	0.9531	0.7566	0.1966	0.2310
75.80	0.6643	0.7627	-0.0984	-0.1381
78.35	1.0904	0.7794	0.3110	0.3357
80.25	0.6352	0.7901	-0.1549	-0.2183
80.50	0.6153	0.7914	-0.1761	-0.2518
81.75	0.8096	0.7976	0.0120	0.0149
83.65	1.1189	0.8059	0.3130	0.3281
84.30	0.9556	0.8084	0.1472	0.1672
86.50	0.7816	0.8161	-0.0345	-0.0432
88.45	1.0231	0.8218	0.2013	0.2191
89.40	1.1521	0.8242	0.3278	0.3349
90.25	0.6358	0.8262	-0.1904	-0.2620
91.10	0.6955	0.8281	-0.1326	-0.1745
91.25	0.7555	0.8284	-0.0728	-0.0920
92.35	0.8467	0.8305	0.0162	0.0193

Los intervalos de confianza se calcularon con la siguiente expresión:

$$D(V) \cdot e^{-k \cdot \sigma_{\ln(e)}} < D(V)_{\alpha} < D(V) \cdot e^{+k \cdot \sigma_{\ln(e)}}$$

$D(V)_{\alpha}$ es el daño calculado con una confianza α , V representa la VMHS, $\sigma_{\ln e}$ es la desviación estándar de los valores del error calculado como $e = \ln(D_{int}/D_{aj})$. α y k se relacionan a través de la función de distribución normal estándar acumulada. La siguiente tabla muestra los valores de α y k utilizados en el análisis de intervalos de confianza para la REVS y los factores aplicados a $D(V)$.

Tabla 4.10 Factores empleados en el cálculo de los intervalos de confianza

$$\sigma_{\ln e} = 0.2237$$

α	k	$e^{+k \cdot \sigma_{\ln(e)}}$	$e^{-k \cdot \sigma_{\ln(e)}}$
0.80	0.842	1.207	0.828
0.8413	1.000	1.251	0.800
0.85	1.036	1.261	0.793
0.90	1.282	1.332	0.751
0.95	1.645	1.445	0.692
0.9772	2.000	1.564	0.639
0.99	2.326	1.683	0.594
0.9987	3.000	1.956	0.511

Las figuras 4.14 Y 4.15 muestran los intervalos de confianza para los valores de α presentados en la tabla 4.10. Se observa que las curvas con confianza de +/- 95 % cubren prácticamente todos los puntos, siendo las apropiadas para estimar el daño máximo y mínimo esperado para cada nivel de velocidad máxima del suelo. El resumen de los cálculos de los intervalos de confianza se presenta en las tablas 4.11 y 4.12.

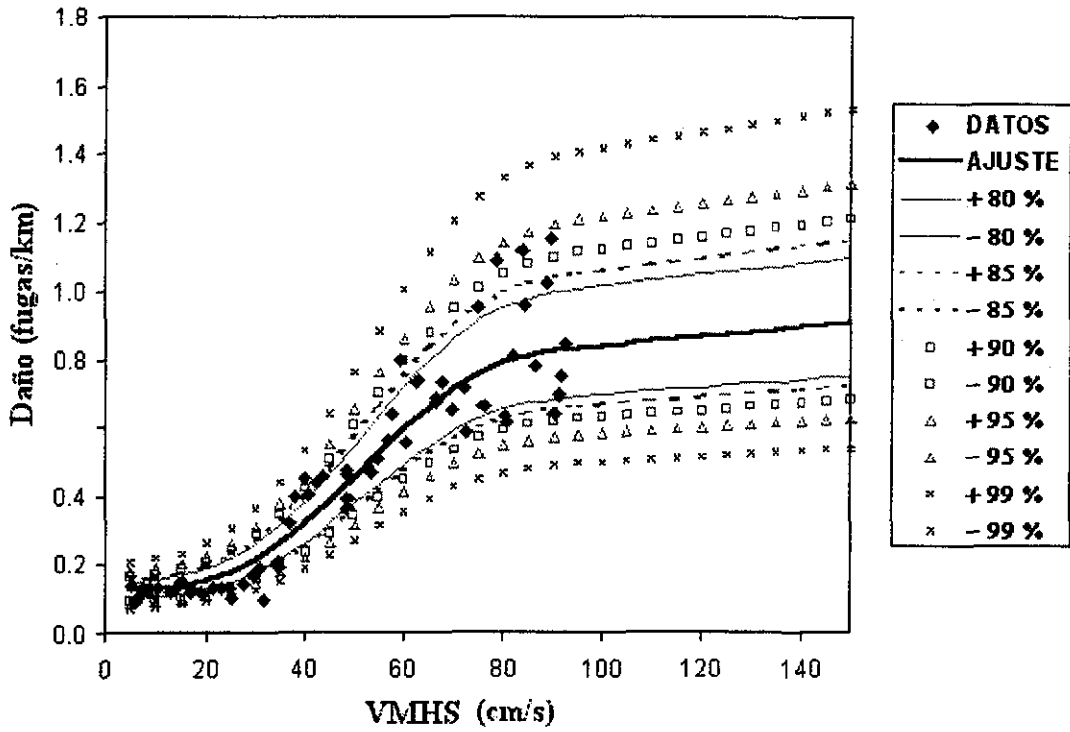


Figura 4.14 Intervalos de confianza para la estimación del daño

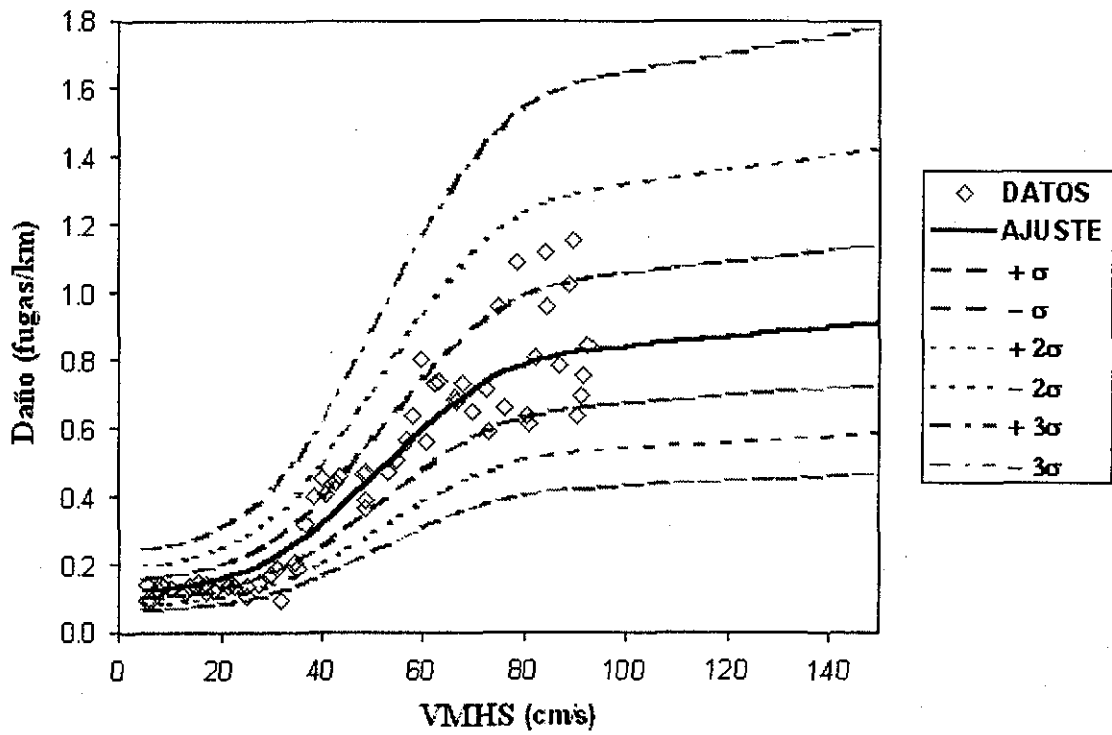


Figura 4.15 Intervalos de confianza para la estimación del daño (continuación)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.11 Resumen del cálculo de los intervalos de confianza

$\mu = 51.8965$
$\sigma = 19.7812$
$\sigma_{\ln(e)} = 0.2237$

k		0.842		1.036		1.282		1.645		2.326	
Confianza (+ - %)		+ 80 %	- 80 %	+ 85 %	- 85 %	+ 90 %	- 90 %	+ 95 %	- 95 %	+ 99 %	- 99 %
$e^{\pm k \sigma_{\ln(e)}}$		1.2071	0.8284	1.2609	0.7931	1.3320	0.7508	1.4447	0.6922	1.6826	0.5943
A	0.1172	0.1415	0.0971	0.1478	0.0930	0.1562	0.0880	0.1694	0.0811	0.1973	0.0697
B	0.7281	0.8789	0.6032	0.9181	0.5775	0.9698	0.5466	1.0519	0.5040	1.2251	0.4327
m	0.00137	0.00165	0.00113	0.00173	0.00109	0.00182	0.00103	0.00198	0.00095	0.00230	0.00081

Vel (cm/s)	Daño medio (rot/km)										
5	0.1237	0.1493	0.1025	0.1560	0.0981	0.1648	0.0929	0.1787	0.0856	0.2081	0.0735
10	0.1297	0.1565	0.1074	0.1635	0.1028	0.1727	0.0974	0.1874	0.0898	0.2182	0.0771
15	0.1399	0.1688	0.1159	0.1764	0.1109	0.1863	0.1050	0.2021	0.0968	0.2353	0.0831
20	0.1561	0.1885	0.1293	0.1969	0.1238	0.2080	0.1172	0.2256	0.1081	0.2627	0.0928
25	0.1806	0.2180	0.1496	0.2277	0.1432	0.2405	0.1356	0.2609	0.1250	0.3038	0.1073
30	0.2149	0.2594	0.1780	0.2710	0.1704	0.2863	0.1614	0.3105	0.1488	0.3616	0.1277
35	0.2603	0.3142	0.2156	0.3282	0.2065	0.3467	0.1954	0.3761	0.1802	0.4380	0.1547
40	0.3166	0.3822	0.2623	0.3992	0.2511	0.4217	0.2377	0.4574	0.2191	0.5327	0.1881
45	0.3820	0.4612	0.3165	0.4817	0.3030	0.5089	0.2868	0.5519	0.2644	0.6428	0.2270
50	0.4535	0.5474	0.3757	0.5718	0.3597	0.6040	0.3405	0.6552	0.3139	0.7630	0.2695
55	0.5267	0.6358	0.4363	0.6641	0.4177	0.7015	0.3954	0.7609	0.3646	0.8862	0.3130
60	0.5970	0.7207	0.4946	0.7528	0.4735	0.7952	0.4482	0.8626	0.4133	1.0046	0.3548
65	0.6605	0.7973	0.5472	0.8328	0.5238	0.8798	0.4959	0.9543	0.4572	1.1114	0.3926
70	0.7143	0.8622	0.5917	0.9006	0.5665	0.9514	0.5362	1.0319	0.4944	1.2018	0.4245
75	0.7569	0.9137	0.6271	0.9544	0.6003	1.0082	0.5683	1.0936	0.5239	1.2737	0.4499
80	0.7888	0.9522	0.6534	0.9946	0.6256	1.0506	0.5922	1.1396	0.5460	1.3272	0.4688
85	0.8110	0.9790	0.6719	1.0226	0.6432	1.0803	0.6089	1.1717	0.5614	1.3647	0.4820
90	0.8257	0.9967	0.6840	1.0411	0.6548	1.0998	0.6199	1.1929	0.5715	1.3893	0.4907
95	0.8347	1.0076	0.6914	1.0524	0.6620	1.1118	0.6266	1.2059	0.5777	1.4044	0.4961
100	0.8415	1.0158	0.6971	1.0611	0.6674	1.1209	0.6318	1.2158	0.5825	1.4160	0.5001
105	0.8484	1.0241	0.7028	1.0697	0.6728	1.1300	0.6369	1.2257	0.5872	1.4275	0.5042
110	0.8552	1.0324	0.7085	1.0783	0.6783	1.1391	0.6421	1.2355	0.5920	1.4390	0.5083
115	0.8621	1.0406	0.7141	1.0870	0.6837	1.1482	0.6472	1.2454	0.5967	1.4505	0.5123
120	0.8689	1.0489	0.7198	1.0956	0.6891	1.1574	0.6523	1.2553	0.6014	1.4620	0.5164
125	0.8757	1.0572	0.7255	1.1042	0.6945	1.1665	0.6575	1.2652	0.6062	1.4736	0.5205
130	0.8826	1.0654	0.7311	1.1129	0.7000	1.1756	0.6626	1.2751	0.6109	1.4851	0.5245
135	0.8894	1.0737	0.7368	1.1215	0.7054	1.1847	0.6678	1.2850	0.6156	1.4966	0.5286
140	0.8963	1.0819	0.7425	1.1301	0.7108	1.1938	0.6729	1.2949	0.6204	1.5081	0.5327
145	0.9031	1.0902	0.7482	1.1388	0.7163	1.2030	0.6780	1.3048	0.6251	1.5196	0.5367
150	0.9100	1.0985	0.7538	1.1474	0.7217	1.2121	0.6832	1.3147	0.6299	1.5312	0.5408

Tabla 4.12 Resumen del cálculo de los intervalos de confianza (continuación)

$\mu = 51.8965$
$\sigma = 19.7812$
$\sigma_{\ln(e)} = 0.2237$

k		1		2		3	
Confianza ($\pm k\sigma$)		$+\sigma_{\ln(e)}$	$-\sigma_{\ln(e)}$	$+2\sigma_{\ln(e)}$	$-2\sigma_{\ln(e)}$	$+3\sigma_{\ln(e)}$	$-3\sigma_{\ln(e)}$
$e^{\pm k\sigma_{\ln(e)}}$		1.2507	0.7996	1.5642	0.6393	1.9563	0.5112
A	0.1172	0.1466	0.0937	0.1834	0.0750	0.2293	0.0599
B	0.7281	0.9106	0.5822	1.1389	0.4655	1.4244	0.3722
m	0.00137	0.00171	0.00109	0.00214	0.00088	0.00268	0.00070

Vel (cm/s)	Daño medio (rot/km)						
5	0.1237	0.1547	0.0989	0.1935	0.0791	0.2420	0.0632
10	0.1297	0.1622	0.1037	0.2028	0.0829	0.2537	0.0663
15	0.1399	0.1749	0.1118	0.2188	0.0894	0.2736	0.0715
20	0.1561	0.1953	0.1248	0.2442	0.0998	0.3055	0.0798
25	0.1806	0.2258	0.1444	0.2824	0.1154	0.3532	0.0923
30	0.2149	0.2688	0.1718	0.3362	0.1374	0.4204	0.1099
35	0.2603	0.3256	0.2081	0.4072	0.1664	0.5092	0.1331
40	0.3166	0.3959	0.2531	0.4952	0.2024	0.6193	0.1618
45	0.3820	0.4778	0.3055	0.5976	0.2442	0.7474	0.1953
50	0.4535	0.5672	0.3626	0.7093	0.2899	0.8871	0.2318
55	0.5267	0.6587	0.4211	0.8238	0.3367	1.0303	0.2692
60	0.5970	0.7467	0.4774	0.9339	0.3817	1.1680	0.3052
65	0.6605	0.8261	0.5281	1.0332	0.4223	1.2922	0.3376
70	0.7143	0.8933	0.5711	1.1172	0.4566	1.3973	0.3651
75	0.7569	0.9467	0.6052	1.1840	0.4839	1.4808	0.3869
80	0.7888	0.9865	0.6307	1.2338	0.5043	1.5431	0.4032
85	0.8110	1.0143	0.6485	1.2686	0.5185	1.5866	0.4146
90	0.8257	1.0326	0.6602	1.2915	0.5279	1.6152	0.4221
95	0.8347	1.0439	0.6674	1.3056	0.5336	1.6328	0.4267
100	0.8415	1.0525	0.6729	1.3163	0.5380	1.6462	0.4302
105	0.8484	1.0610	0.6783	1.3270	0.5424	1.6596	0.4337
110	0.8552	1.0696	0.6838	1.3377	0.5467	1.6730	0.4372
115	0.8621	1.0781	0.6893	1.3484	0.5511	1.6864	0.4407
120	0.8689	1.0867	0.6947	1.3591	0.5555	1.6998	0.4442
125	0.8757	1.0953	0.7002	1.3698	0.5599	1.7132	0.4477
130	0.8826	1.1038	0.7057	1.3805	0.5643	1.7266	0.4512
135	0.8894	1.1124	0.7112	1.3912	0.5686	1.7400	0.4547
140	0.8963	1.1210	0.7166	1.4020	0.5730	1.7534	0.4582
145	0.9031	1.1295	0.7221	1.4127	0.5774	1.7668	0.4617
150	0.9100	1.1381	0.7276	1.4234	0.5818	1.7802	0.4652

5.5 Nivel de daño saturado

El nivel de daño saturado (NDS) es otro concepto por analizar. Cuando una red de tuberías llega al colapso total, el número de reparaciones no puede aumentar y por lo tanto el daño sería constante, independientemente de los niveles de movimiento del suelo. A continuación se exponen dos criterios para estimar el NDS:

1. Considerando el costo de reparación e instalación de tuberías: el NDS se podría estimar calculando cuál sería el número de reparaciones cuyo costo sea igual al costo de instalación de un kilómetro de tubería nueva.
2. Considerando la geometría de las tuberías: sería suponiendo que el costo de cada reparación equivale a la instalación de dos o más segmentos de tubería y calculando cuántos segmentos hay en un kilómetro de red. Por ejemplo, si un segmento de tubería de 72" mide 5 m, y considerando que por cada reparación se requiere restituir 4 segmentos, el número máximo de reparaciones por kilómetro sería 50.

Es poco probable que un sistema de redes de conducción de agua llegue al colapso total. Sin embargo, es importante definir cual sería el NDS para una red con el propósito de buscar el reemplazo total de la red y poder rediseñarla para que resista mejor los efectos sísmicos en el caso de que los daños estén cercanos al colapso total. Esto evitaría hacer innumerables reparaciones que producirían un sistema de tuberías con sectores más susceptibles de daño sísmico que otros. También evitaría que las zonas que no alcanzaron a colapsar y que quedaron parcialmente afectadas, fallen ante un sismo de menor magnitud.

5 ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN LA RPDAP DEL DF PARA SISMOS POSTULADOS

Este capítulo se inicia con una breve descripción de la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del Distrito Federal y resalta aspectos importantes de los daños que en ella causó el sismo de 1985. Se hace una comparación entre los daños de 1985 y los obtenidos con tres relaciones de vulnerabilidad desarrolladas por otros autores con datos de daños de otros sismos, de forma que se pueda conocer qué tan vulnerable es la red con respecto a otros sistemas.

Posteriormente se presenta el mapa de vulnerabilidad sísmica relativa para la RPDAP calculado con el evento de 1985 y con la relación de vulnerabilidad mostrada en el capítulo 4. Finalmente se presentan las gráficas de daño donde se estima el número de fugas para sismos postulados de determinada magnitud y distancia focal.

Las gráficas de daño permiten estimar el número de fugas ante sismos potenciales futuros; de esta forma se estaría previniendo a las autoridades respectivas acerca de la proporción de los daños, de manera que se pueda conocer en términos generales el costo que podría tener la reparación de la red.

5.1 Descripción de la RPDAP

La red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del DF consta de más de 600 km de tuberías fabricadas principalmente de asbesto cemento, hierro fundido y concreto. Las tuberías tienen una gran variedad de diámetros, principalmente de 20, 32, 36, 48 y 72 pulgadas. La ubicación espacial de la red y su distribución de diámetros se describe en la tabla 5.1 y figuras 5.1 y 5.2.

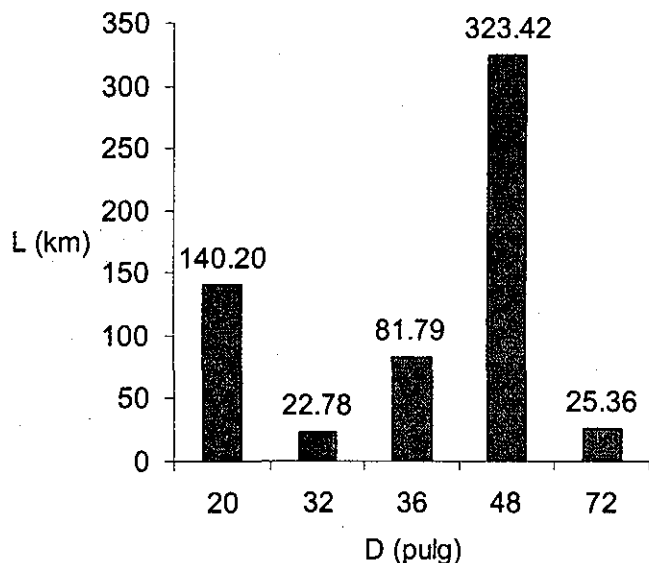


Figura 5.1 Distribución de diámetros de la RPDAP

Tabla 5.1 Distribución de diámetros de la RPDAP

D (pulg)	L (km)
20.00	140.20
24.00	0.85
29.21	5.98
32.00	22.78
36.00	81.79
42.00	0.85
48.00	323.42
48.59	0.49
50.08	0.69
51.23	1.38
72.00	25.36
TOTAL:	603.77

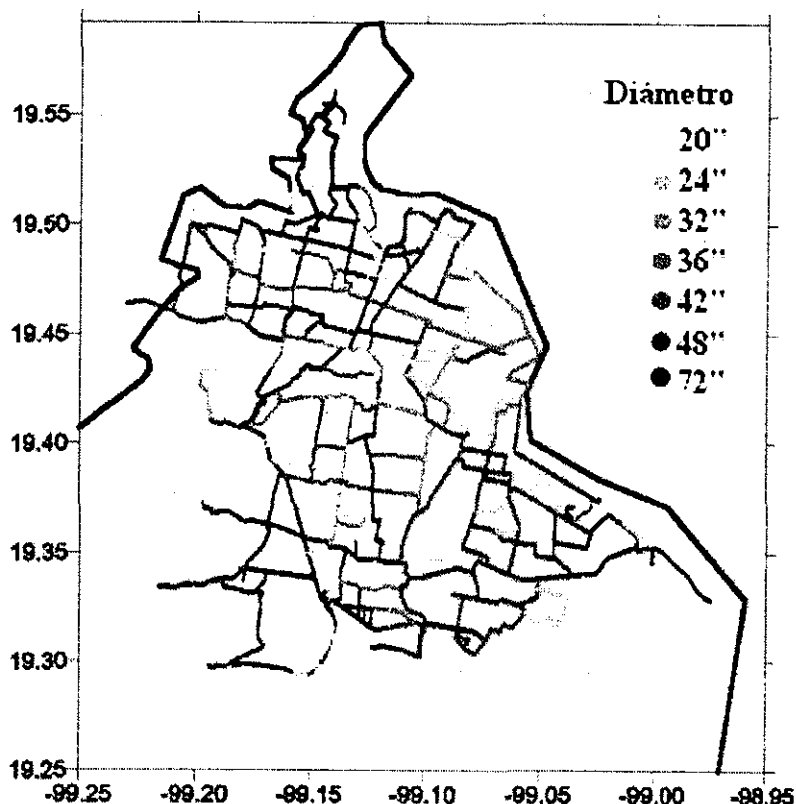


Figura 5.2 Red primaria de distribución de agua potable del DF

La RPDAP se encuentra principalmente ubicada en la zona de lago del Distrito Federal, donde los depósitos de arcillas amplifican las ondas sísmicas y hacen que los movimientos diferenciales del suelo afecten las tuberías. Esto se observó en el sismo de 1985 donde la red sufrió daños sin precedentes en la historia.

La anterior figura muestra la distribución espacial de la RPDA y la línea límite del Distrito Federal. La red cubre un área de más de 460 km² y abastece de agua a la mayor parte de la ciudad. En la gráfica también se señala en escala de grises la distribución de los diámetros de tuberías.

5.2 Descripción de los daños causados por el sismo de 1985

El informe técnico de Ayala y O'Rourke (1989) contiene la descripción detallada de los daños causados por el sismo de 1985 en el sistema de distribución de agua potable del Distrito Federal. Incluye además los daños causados en el Estado de México, el área epicentral del sismo y también en estructuras enterradas como la red de drenaje y el sistema de transporte Metro. Lo más relevante presentado en este informe acerca del efecto del sismo de 1985 en la RPDAP del Distrito Federal se describe a continuación.

- Después del sismo, entre 3 y 3.5 millones de personas quedaron sin agua, esto equivale al 30% de los 18 millones de habitantes.
- Una parte de los daños registrados en las tuberías fue debido a que algunos habitantes rompieron las válvulas y tuberías para abastecerse del agua que luego del sismo aún permanecía dentro del sistema.
- Casi dos meses después del sismo se pudo reestablecer casi en su totalidad el servicio de distribución de agua.
- Las formas de reparar las tuberías consistían principalmente en el uso de montaduras de acero, mangas de reparación y abrazaderas.

- En tuberías de gran diámetro se usaban tuberías divididas en 2 longitudinalmente y luego atornilladas, en forma de camisón.
- Los daños se concentraron en zonas con período fundamental de 2 segundos o mayor, con profundidades de estratos blandos de arcilla entre 30 y 70 m.
- En los análisis posteriores al sismo se determinó que no hubo evidencia de licuación. Esto es debido a que el suelo está constituido principalmente por roca volcánica o arcilla blanda. Tampoco se observaron daños causados por deslizamientos, ni fallas. Esto indica que el efecto producido por las ondas sísmicas fue la principal causa de los daños en el sistema de distribución de agua.
- En cuanto a los edificios de las plantas de purificación, estaciones de bombeo y otras dependencias no se presentaron mayores daños.
- Es posible que la temporada de lluvias anterior al sismo haya contribuido al aumento en el número de fallas de las tuberías. El nivel del agua en el momento del sismo era de 1.5 m bajo la superficie.
- 2/3 partes de los daños ocurrieron por insuficiencia de flexibilidad en las juntas de las conexiones.
- La subsidencia contribuyó al incremento de los daños, sobretodo en la zona de San Isidro donde se registraron 6 fugas en tan solo 500 m de tubería.
- En la zona de Tlahuac las grandes amplitudes de desplazamiento y cambios bruscos entre sitios cercanos, produjeron gran daño en las tuberías cimentadas en esa zona.
- Los principales daños observados ocurrieron en tuberías de asbesto cemento y concreto, con diámetros de 20" y mayores. Las principales fallas observadas fueron: rotura transversal de tuberías, aplastamiento, desacople en uniones y fractura de accesorios.
- Gran parte de las fugas de hierro fundido se debieron al avanzado estado de corrosión.
- Otro factor que pudo favorecer el gran número de fallas es el deterioro acumulado por eventos sísmicos pasados.
- Las fallas se localizan en la región de suelo lacustre de los lagos de Texcoco y Chalco, conocida como la zona de lago.
- La relación de daño tiende a disminuir a medida que el diámetro aumenta.
- El daño fue mayor en zonas donde el suelo es blando que en las que el suelo es duro.
- La subsidencia sería la segunda razón más importante luego de la propagación de ondas sísmicas, causante del daño en las redes de distribución de agua en el D.F.
- No hubo evidencia de deformación permanente del suelo excepto la subsidencia.
- Los registros sugieren la presencia de ondas superficiales en la zona de lago.

La distribución espacial de los daños de 1985 descrita por Ayala y O'Rourke (1989) se presenta en la gráfica siguiente. Los puntos mostrados son proporcionales al diámetro de la tubería que presentó la falla (entre 20 y 48 pulgadas). No hubo fugas en tuberías de 72" de diámetro. La figura 5.3 muestra los puntos de concentración de daños de las 159 fugas utilizadas en el cálculo de la relación de vulnerabilidad desarrollada en el capítulo 5.

En otro informe, O'Rourke y Ayala (1993) complementaron los datos obtenidos por Barenberg, (1988), para obtener un catálogo más amplio con respecto al efecto de la propagación de ondas en el daño de tuberías enterradas. Los datos completos se presentan en el apéndice D. La tabla 5.2 incluye únicamente datos mexicanos. Estos datos corresponden a daños en tuberías de asbesto cemento, concreto, hierro fundido y concreto preesforzado para tuberías de gran diámetro.

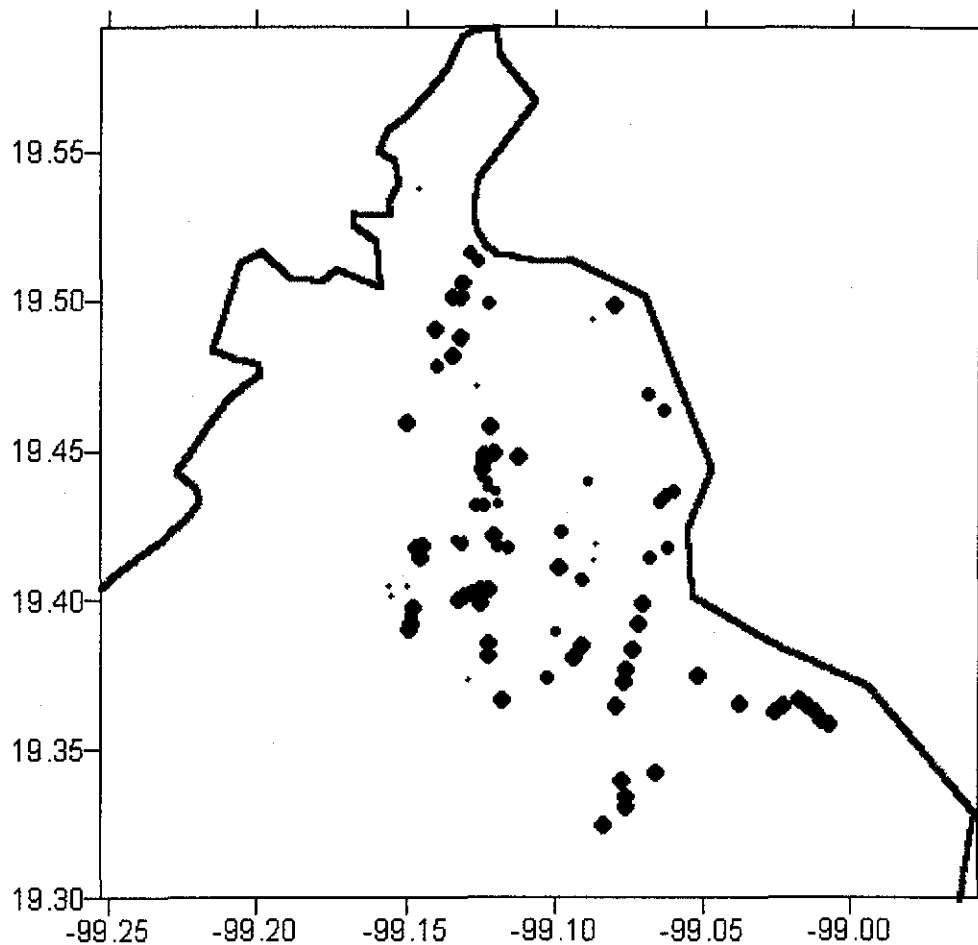


Figura 5.3 Ubicación espacial de los daños registrados en el sismo de 1985

Tabla 5.2 Datos de daño en sitios mexicanos O'Rourke y Ayala (1993)

V (cm/s)	NR (rep/km)	Año	Sitio	Material	Diámetro
11	0.01	1985	Zona de Lomas	AC, CO, CI	20", 48"
12	0.07	1985	Zona de Trans.	AC, CO, CI	20", 48"
25	0.17	1989	Tláhuac	PCCP	72"
48	0.45	1985	Zona de Lago	AC, CO, CI	20", 48"
54	1.5	1989	Tláhuac	PCCP	72 "

AC = Asbesto cemento

CO = Concreto

CI = Hierro fundido

PCCP = Concreto presforzado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

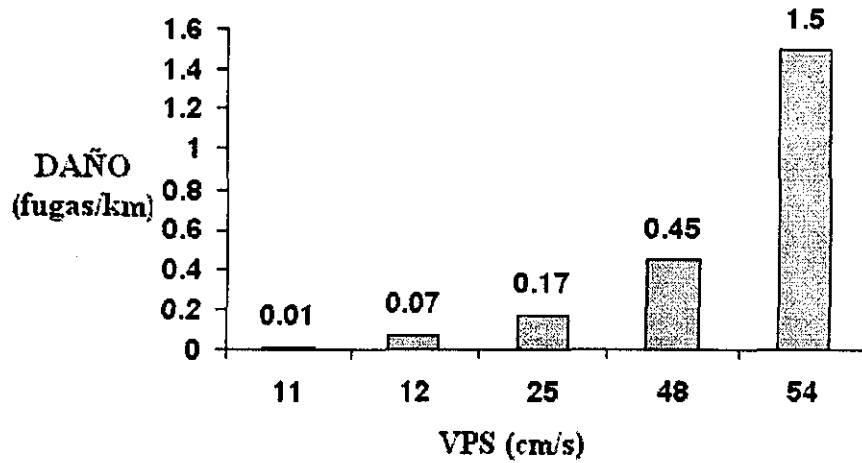


Figura 5.4 Variación del daño con la velocidad pico del suelo (VPS)
O'Rourke y Ayala (1993)

Los datos graficados corresponden a las relaciones de daño para diversas zonas del Distrito Federal. Los valores fueron obtenidos al dividir el número de fugas registrado entre la longitud de la red de tuberías para diversas zonas del Distrito Federal. En la gráfica siguiente se hace una comparación entre estas tasas de daños y las estimadas por la REVS propuesta para los niveles de velocidad respectivos.

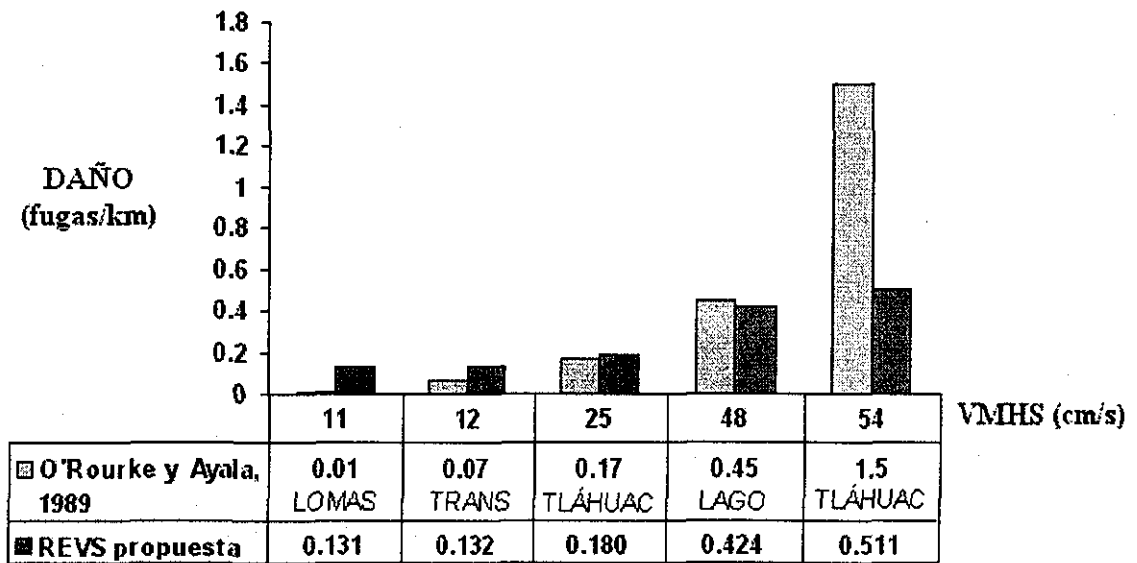


Figura 5.5 Comparación entre las tasas de daño de O'Rourke y Ayala (1989)
y los obtenidos con la REVS propuesta

La mayor diferencia de valores se presenta para la zona Tláhuac con una relación de daño de 1.5 fugas/km para una velocidad de 54 cm/s, mientras que el valor obtenido con la REVS propuesta es de tan solo 0.511 fugas/km.

La zona de Tláhuac se encuentra en la parte sur del DF y no está incluida en los 603.77 km de red utilizados en el cálculo de la REVS, debido a que pertenece a un sistema de distribución de agua alterno que abastece la zona sur de la ciudad. La zona de Tláhuac se caracteriza por tener grandes amplitudes en el movimiento del

suelo a causa de la propagación de ondas sísmicas, lo que la hace una zona de alto riesgo sísmico para las estructuras enterradas. En esta zona es recomendable hacer un estudio en pequeña escala para estimar la relación entre el daño y la velocidad, ya que el patrón de movimientos de esta zona es diferente al de la zona donde se encuentra la RPDAP; esto se aprecia por la gran diferencia en la estimación del daño. Una conclusión importante es que esta zona (Tiáhuac) sería, en términos generales, tres veces más vulnerable que la RPDAP, para velocidades cercanas a 54 cm/s y tiene similar vulnerabilidad para velocidades de 25 cm/s.

La diferencia en las otras zonas se debe a que los valores para las zonas de lomas, transición y lago son promedios de daño, mientras que la REVS calcula puntualmente el valor del daño independientemente de la zona en consideración, tomando como parámetro la velocidad máxima del suelo en ese punto. De acuerdo a los mapas de velocidad máxima del suelo mostrados en el capítulo 3 se puede concluir que la velocidad no es constante para cada zona en particular, lo cual se observa principalmente en la zona de lago.

5.3 Comparación de los daños de 1985 con los obtenidos usando otros modelos de REVS

Con el propósito de conocer que tanta susceptibilidad de recibir daño por causas sísmicas es la RPDAP con respecto a otros sistemas de distribución de agua, se calculó el daño que causaría un sismo como el de 1985 utilizando relaciones de vulnerabilidad calculadas por otros autores. Para realizar la comparación se utilizaron las REVS descritas en la sección 4.2 y cuyas gráficas se muestran en la figura 5.6. En la expresión de ALA (2001) se aplicó como coeficiente K el valor 1.4. Este coeficiente es el equivalente a la red de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^{NT} K_i \cdot L_i}{L_{TOTAL}}$$

donde NT es el número total de tramos de la red, K_i representa el coeficiente respectivo a ese tramo de acuerdo al material, L_i es la longitud del tramo y L_{TOTAL} es la longitud total de la red.

La REVS para el sismo de Loma Prieta (Eidinger, 1988) calcula valores inferiores de daño con respecto a la REVS propuesta; sin embargo, la tasa de daño es igual cuando la velocidad es 170 cm/s (0.937 fugas/km).

Las REVS propuestas por ALA y por O'Rourke y Jeon estiman valores de fugas pequeños en comparación a la REVS propuesta.

La tabla 5.3 muestra el número de fugas calculado con las REVS utilizadas en la comparación. Se aprecia que el número de fugas en las tres REVS es inferior al número de fugas registrado en la red para el sismo de 1985 (159).

Para conocer cuantas veces más susceptible de recibir daño es la RPDAP con respecto a otros sistemas, se calculó la relación entre el número de fugas registrado (159) y el obtenido con cada una de las REVS. La figura 5.7 muestra los valores de daño relativo.

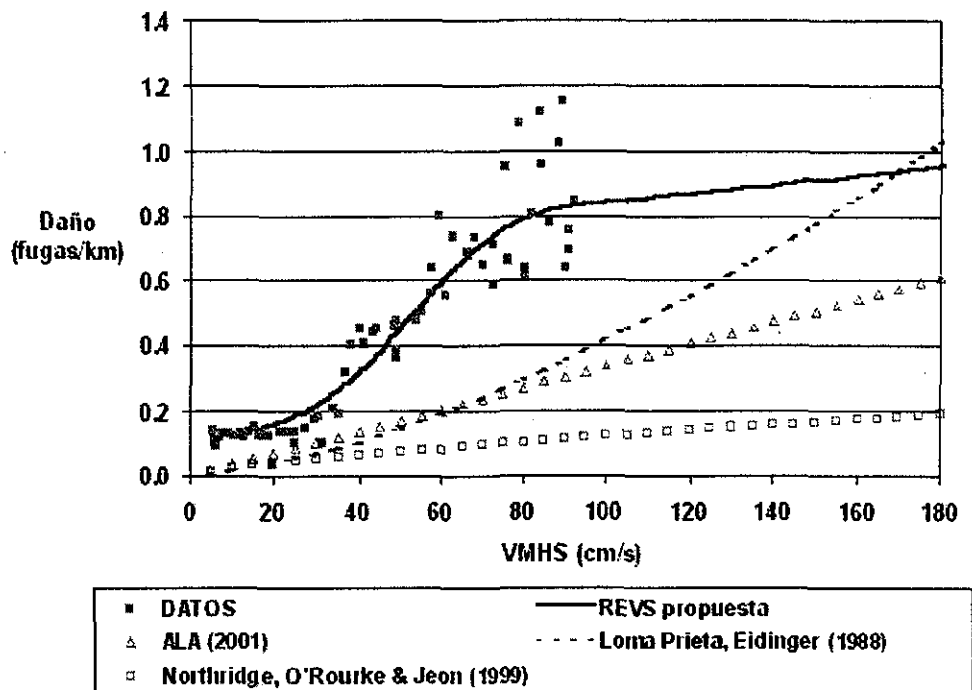


Figura 5.6 Comparación entre la REVS propuesta y otras

Tabla 5.3 Número de fugas obtenido usando otras REVS

Sección	REVS	Fugas
4.2.1	ALA (2001)	60
4.2.2	Loma Prieta, Eidinger (1998)	43
4.2.3	Northridge, O'Rourke y Jeon (1999)	28

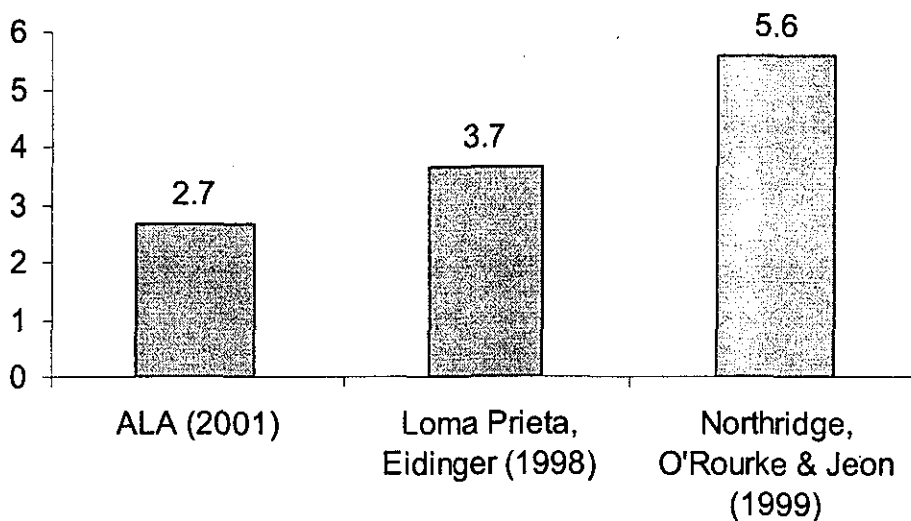


Figura 5.7 Relación entre los daños calculados con otras REVS y el causado por el sismo de 1985

Se observa que la RPDAP es 3.7 veces más susceptible de recibir daño a causa de sismos que el sistema de distribución de agua EBMUD (East Bay Municipal Utility District) afectado por el sismo de Loma Prieta (1989). Por otra parte, la RPDAP es 5.6 veces más susceptible que la red de tuberías LADWP (Los Angeles Department of Water and Power) afectada por el sismo de Northridge (1994).

Debido a que la REVS presentada por ALA (2001) es la que contiene mayor número de datos de daños en tuberías enterradas podría considerarse que los daños causados por ondas sísmicas en la RPDAP son 2.7 veces el promedio presentado en varios sistemas de distribución de agua del mundo.

5.4 Mapas de vulnerabilidad sísmica relativa (MVSR)

Los mapas de vulnerabilidad sísmica relativa para tuberías enterradas corresponden a la distribución espacial del daño en la zona donde se encuentra un sistema de distribución de agua. En esta tesis, corresponden a la aplicación de una relación de vulnerabilidad sísmica en un mapa de velocidades máximas y normalizado de forma que las zonas de máxima vulnerabilidad sísmica tengan un valor de 1 y las zonas con mínima o nula vulnerabilidad sísmica tengan un valor de 0.

En esta sección únicamente se presenta el MVSR calculado con el mapa de velocidades para el sismo de 1985 (sección 3.4.1), puesto que los datos usados para la obtención de la REVS calculada en el capítulo 4 fueron ocasionados por este evento.

La forma planteada de obtener los MVSR es empírica; una forma más aproximada a la realidad sería analizando tanto las deformaciones relativas del suelo, como la configuración geométrica y de materiales de la red. Esta solución es muy compleja puesto que requeriría una gran cantidad de datos tanto del suelo como de las tuberías, y está fuera del alcance de esta tesis.

5.4.1 Aspectos generales

Los mapas de vulnerabilidad sísmica relativa (MVSR) permiten identificar las zonas en las cuales las tuberías son más vulnerables de tener fugas. Además, es posible predecir en cuáles sectores de la red puede haber concentración de daños.

Una aplicación práctica de los MVSR es la microzonificación sísmica de las redes de distribución de agua, pues de esta forma se puede clasificar los tramos de tuberías de acuerdo a su nivel de vulnerabilidad.

Debido a que los MVSR están normalizados respecto al valor máximo de daño, son aproximadamente los mismos cuando cada sismo en estudio excita el suelo con el mismo patrón de movimiento. Esto indica que pueden existir diferentes MVSR dependiendo del origen del sismo. Por ejemplo, es posible que un sismo causado por la subducción de una placa produzca un MVSR diferente al que origina un sismo de origen intraplaca, sin embargo, esto no se ha comprobado aún.

5.4.2 MVSR para el sismo del 19 de septiembre de 1985

La figura 5.8 corresponde al MVSR calculado con la distribución de velocidades máximas para el sismo del 19 de septiembre de 1985 y la REVS propuesta en el capítulo cuatro. Se observa que la zona de lomas el daño es inferior a 0.2 y en las zonas de transición y lago este valor aumenta hasta llegar a 1. Es importante indicar que este mapa es aplicable en tuberías enterradas; por tal motivo, en la figura 5.9 se muestra un esquema donde en una escala de grises se indica el nivel de vulnerabilidad relativa de cada tramo de la RPDAP. En ese esquema, los tramos oscuros indican las partes de la red donde pueden haber alta concentración de daños.

Al conocer las zonas de concentración de daños se pueden desarrollar planes de contingencia ante una emergencia sísmica de forma que el servicio de entrega de agua se reestablezca en el menor tiempo a mayor número de usuarios.

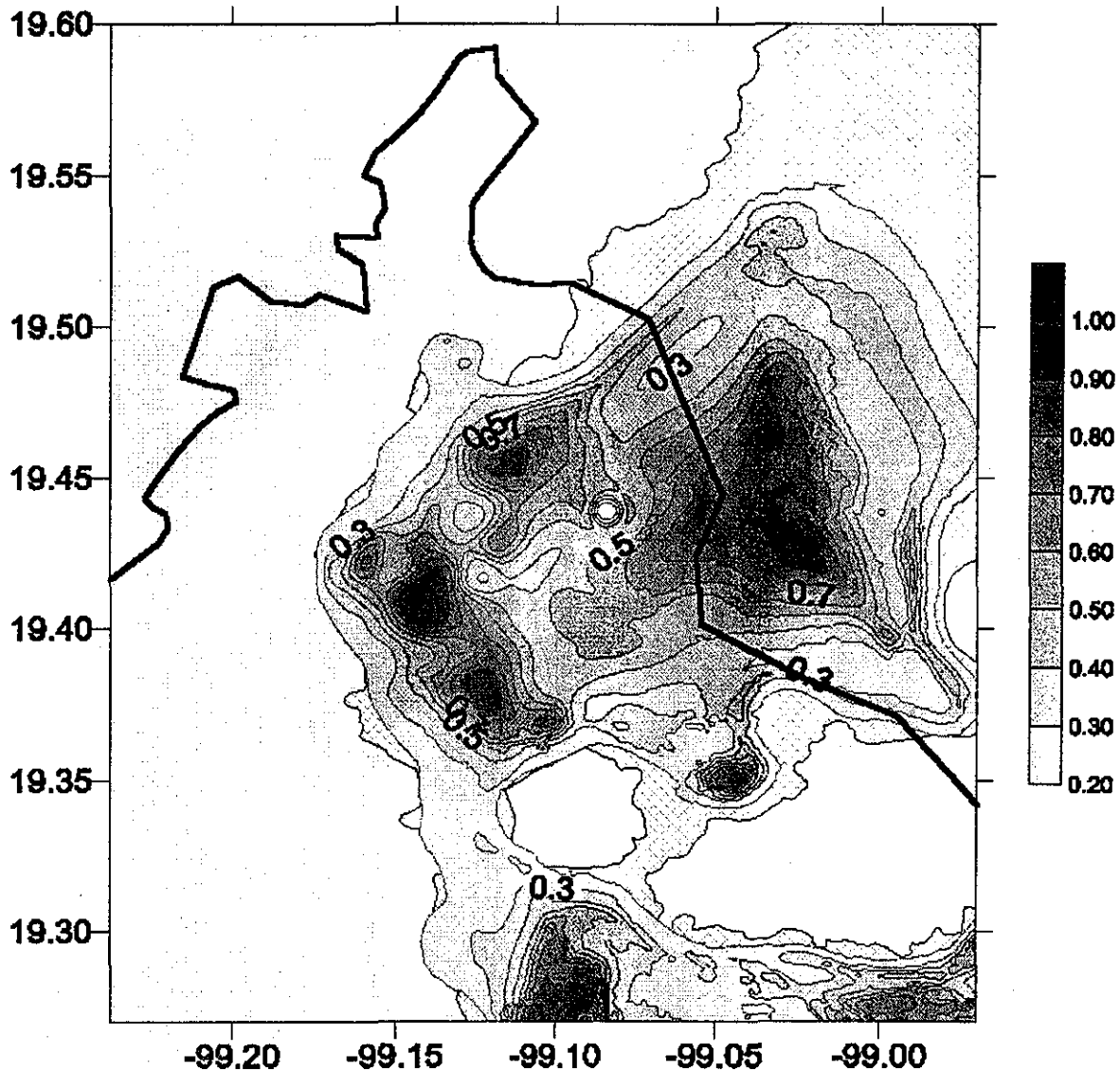


Figura 5.8 Mapa de vulnerabilidad sísmica relativa para tuberías enterradas (sismo del 19 de septiembre de 1985)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

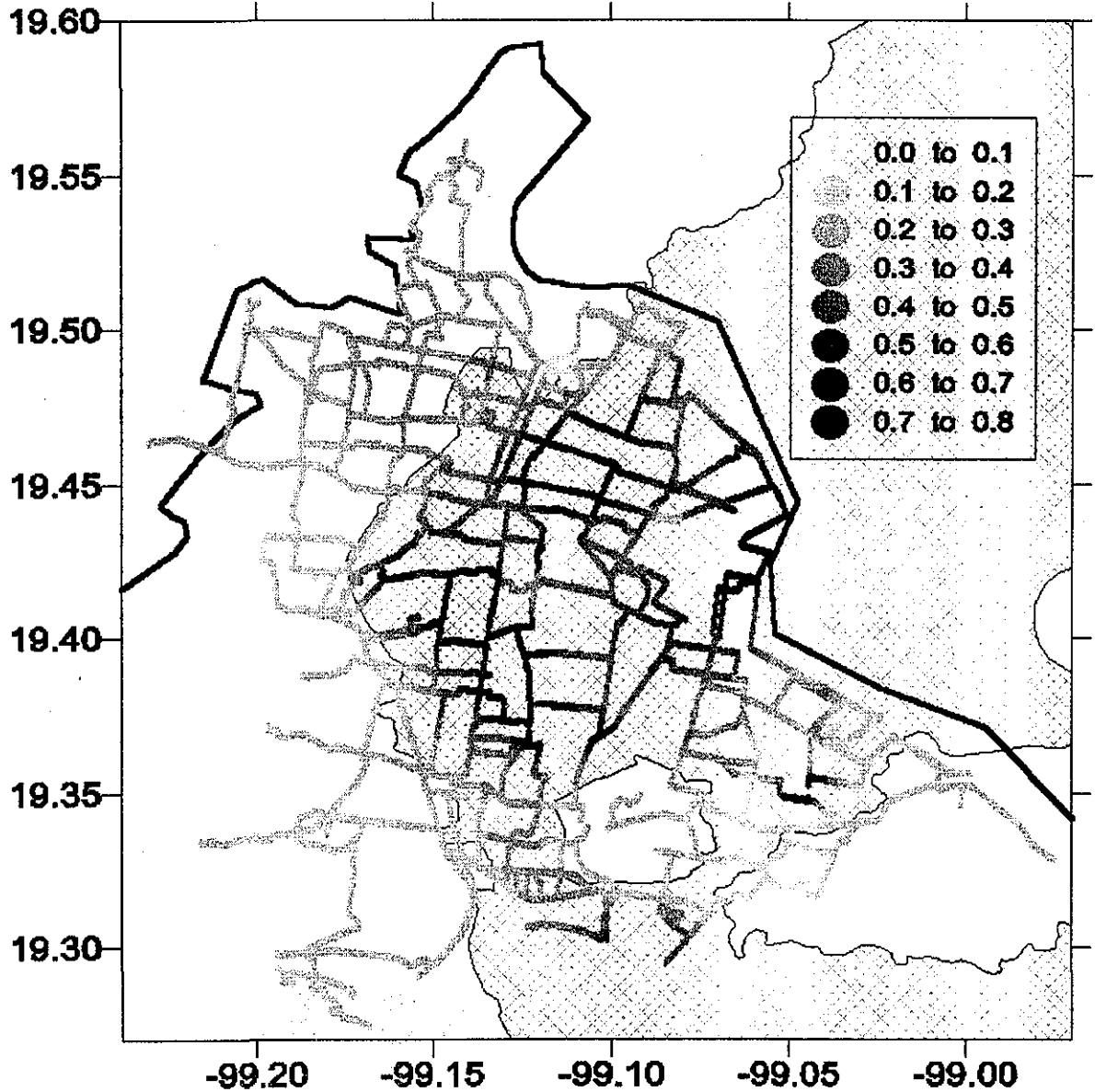


Figura 5.9: Mapa de vulnerabilidad sísmica relativa de la RPDAP

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La tabla 5.4 y la figura 5.10 muestran la distribución de vulnerabilidad sísmica relativa V_{sr} con respecto a la longitud de la red. Se aprecia que más del 50% de la red tiene V_{sr} entre 0.1 y 0.2. Otra observación es que no hay tramos de la red en la zona más desfavorable del Distrito Federal, donde V_{sr} toma valores superiores a 0.9.

Tabla 5.4 Distribución de vulnerabilidad sísmica relativa V_{sr}

V_{sr}	L (km)	%
0 - 0.1	3.6	0.6
0.1 - 0.2	329.3	54.5
0.2 - 0.3	81.8	13.6
0.3 - 0.4	64.7	10.7
0.4 - 0.5	54.9	9.1
0.5 - 0.6	31.2	5.2
0.6 - 0.7	23.9	4.0
0.7 - 0.8	11.5	1.9
0.8 - 0.9	3.0	0.5
0.9 - 1	0.0	0.0

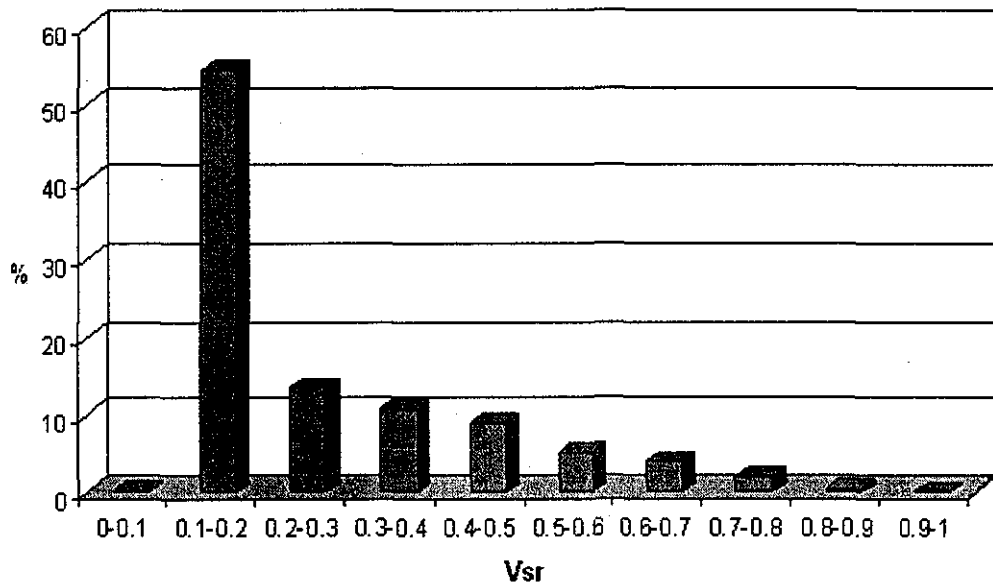


Figura 5.10 Distribución de vulnerabilidad sísmica relativa V_{sr}

El valor promedio (o esperanza) de V_{sr} es 0.267.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

5.5 Estimación de daños usando la REVS propuesta

Uno de los propósitos del cálculo de una REVS es la estimación del número total de fugas ante un evento sísmico futuro. Al multiplicar el número estimado de fugas y el valor esperado (o valor promedio) de la reparación de cada fuga se puede estimar la esperanza (o valor promedio) del costo total de reparación.

De aquí en adelante el término "fuga" será reemplazado por "reparación" debido a que se está haciendo una estimación del daño ante sismos postulados. De esta forma se está haciendo énfasis en el número de "reparaciones" necesarias para reestablecer completamente el servicio de entrega de agua luego de la ocurrencia del sismo.

En esta sección se describen las consideraciones generales que se tuvieron en cuenta para la estimación del número total de reparaciones para cada uno de los escenarios sísmicos calculados. En la parte final, se muestran las curvas de daño total que permiten saber el número total de reparaciones para sismos postulados de magnitudes entre 6.5 y 8.4, y distancias focales entre 250 y 450 km, (Ordaz *et al*, 1994, Ordaz *et al*, 1995).

5.5.1 Consideraciones generales

La aplicación de la REVS para el cálculo del número de fugas se hace en cada tramo de la red; entre más pequeña es la longitud de los tramos, más preciso es el cálculo.

Los mapas de velocidad del capítulo 3 fueron desarrollados con una malla de valores cada 200 metros y el cálculo de la velocidad para el punto medio de cada tramo de tubería se realizó a través de una interpolación de valores de acuerdo a la siguiente expresión.

$$V_m = V_1 \left(1 - \frac{X_1}{X}\right) \left(1 - \frac{Y_1}{Y}\right) + V_2 \left(\frac{X_1}{X}\right) \left(1 - \frac{Y_1}{Y}\right) + V_3 \left(1 - \frac{X_1}{X}\right) \left(\frac{Y_1}{Y}\right) + V_4 \left(\frac{X_1}{X}\right) \left(\frac{Y_1}{Y}\right)$$

V_1 , V_2 , V_3 y V_4 son los valores de velocidad para cada esquina del rectángulo donde se encuentre el punto medio del tramo de tubería, X e Y son las dimensiones del rectángulo que en este caso son 200 m, X_1 e Y_1 son las distancias desde el punto medio de la tubería a la esquina V_1 en los ejes x e y , V_m es el valor de la velocidad en el punto medio del tramo.

Con el fin de tener una buena precisión en el cálculo, la red fue subdividida en tramos cuya longitud máxima fuera 50 m.

Conociendo el valor de V_m y aplicando la REVS se calculó el valor del daño D para cada tramo de la red. Conociendo D para cada tramo de la red, el número total estimado de reparaciones se calculó con la siguiente expresión.

$$NR = \sum_{i=1}^{NT} D_i \cdot L_i$$

NT es el número de tramos de la red. D_i es el valor del daño asociado al punto central del tramo i de la red. L_i es la longitud de cada tramo. NR es el número total estimado de reparaciones en la red de tuberías causado por el sismo en consideración.

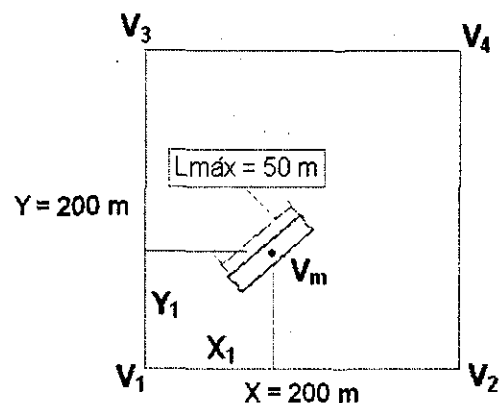


Figura 5.11

5.5.2 Curvas de daño sísmico total

Al aplicar el procedimiento descrito en la sección anterior a los eventos sísmicos postulados se calculó el número de reparaciones de acuerdo mostrado en la tabla 5.5. Los valores calculados fueron redondeados sin cifras decimales de forma que los valores de reparaciones fueran enteros. La figura 5.12 muestra la gráfica de los puntos de la tabla. Se observa que para magnitudes superiores a 7.6 hay una tendencia exponencial muy marcada en todos los puntos; a diferencia del resto de valores, que en conjunto no tienen una tendencia clara.

Tabla 5.5 Número de reparaciones estimado con la REVS propuesta

MAGNITUD	DISTANCIA FOCAL				
	R = 250 km	R = 300 km	R = 350 km	R = 400 km	R = 450 km
6.6	1	0	0	0	0
6.7	4	1	0	0	0
6.8	10	3	1	0	0
6.9	18	7	2	1	0
7	27	15	7	2	1
7.1	38	24	13	7	3
7.2	47	35	23	14	7
7.3	54	42	33	23	14
7.4	59	50	40	33	23
7.5	66	57	47	39	32
7.6	76	63	54	45	38
7.8	102	89	70	60	51
8	141	115	98	87	68
8.2	208	165	134	113	99
8.4	289	240	198	163	136

Al realizar un ajuste entre todos los puntos con magnitudes superiores a 7.6 se obtuvo la siguiente expresión y su respectivo valor R^2

$$NR = 0.00075 \cdot e^{1.6295 \cdot m} \cdot e^{-0.00344 \cdot R} \quad R^2 = 0.996$$

El valor de R^2 muestra que el ajuste de los puntos de la gráfica es muy bueno, lo que permite simplificar el cálculo en la estimación del número de reparaciones para magnitudes superiores a 7.6 e inferiores a 8.4, como en la estimación de reparaciones para sismos de magnitud superior a 8.4.

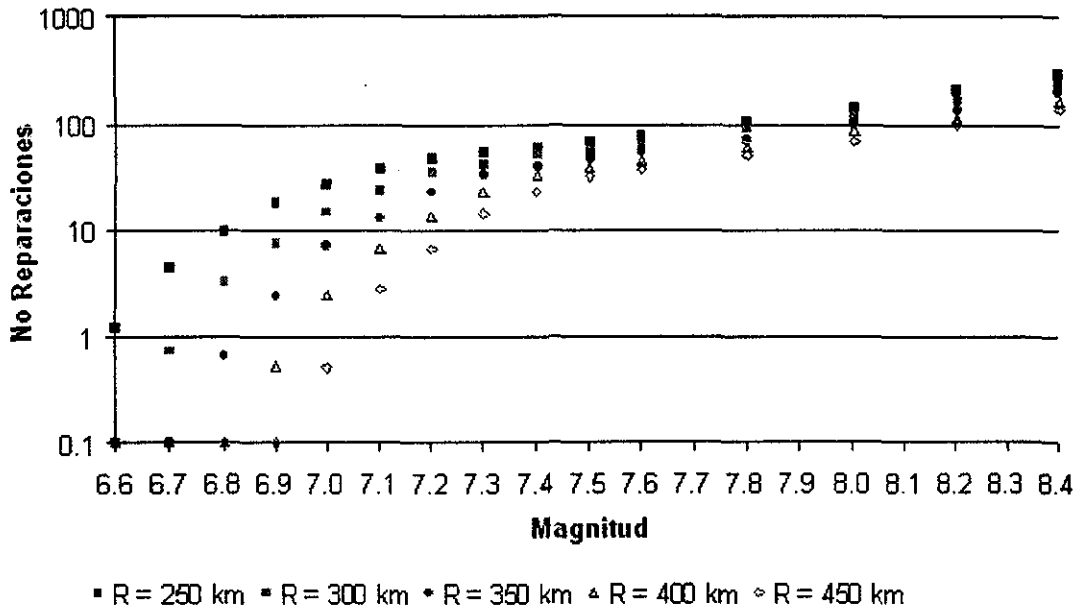


Figura 5.12 Estimación del número de reparaciones para sismos postulados

Debido a que no se aprecia una tendencia clara de los valores para magnitudes menores a 7.6, no se realizó ningún ajuste de ecuaciones. Además, la tabla de datos muestra los valores de reparaciones para las magnitudes de interés (con una cifra decimal).

La figura 5.13 muestra la variación del número estimado de reparaciones, los valores para magnitudes inferiores a 7.6 fueron tomados de la tabla 5.5, para magnitudes superiores se utilizó la ecuación ajustada.

El evento de 1985, con magnitud 8.1 y distancia focal 295 km causó 159 fugas en la RPDAP; al ubicar estos datos en la figura 5.13 se observa que se aproxima al valor predicho. Esto asegura el buen ajuste que tienen esta familia de curvas.

Los intervalos de confianza para la estimación del número de fugas se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$NR(m, R) \cdot K_i < NR(m, R)_\alpha < NR(m, R) \cdot K_s$$

$NR(m, R)_\alpha$ es el número de fugas con una confianza α . La tabla 5.6 muestra los factores K_i y K_s . Estos factores son los mismos usados en el cálculo de los intervalos de confianza de la relación de vulnerabilidad propuesta (sección 4.6).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

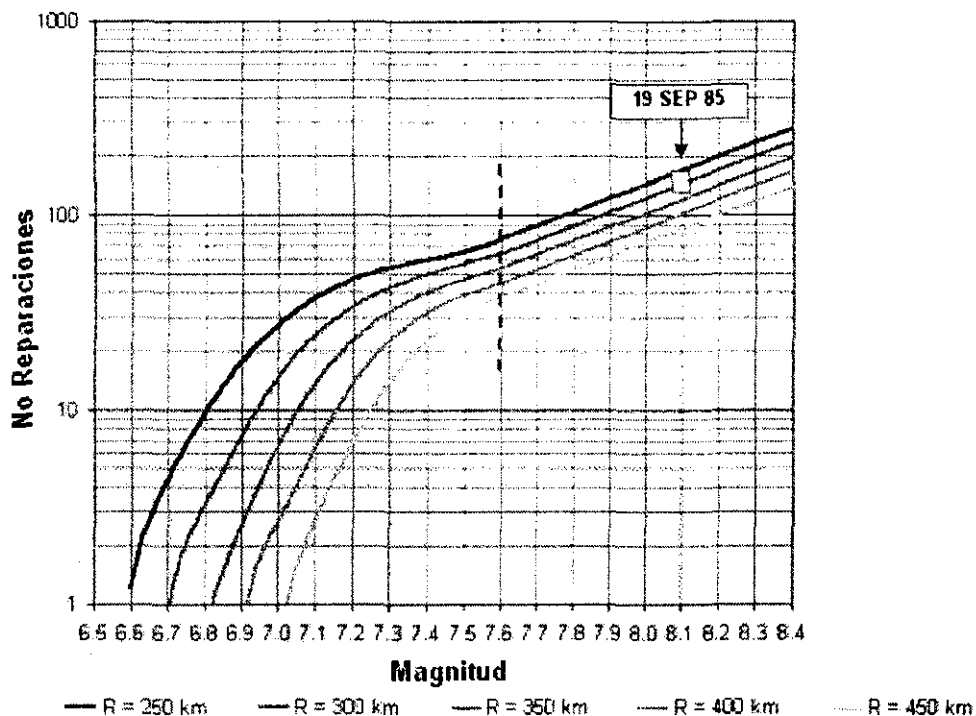


Figura 5.13 Curvas de daño sísmico total

Tabla 5.6 Factores para el cálculo de los intervalos de confianza

α	K_i	K_s
0.80	1.207	0.828
0.8413 (σ)	1.251	0.800
0.85	1.261	0.793
0.90	1.332	0.751
0.95	1.445	0.692
0.9772 (2σ)	1.564	0.639
0.99	1.683	0.594
0.9987 (3σ)	1.956	0.511

El concepto de nivel de daño saturado mencionado en la sección 4.7 también se aplica en las curvas de daño sísmico, pues al aumentar la magnitud del sismo hay un límite en el número de reparaciones. Este límite puede estar definido por el colapso total de la red o por el costo total instalación de una nueva red, según el criterio adoptado. Sin embargo, está fuera del alcance de esta tesis definir un valor adecuado de daño saturado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6 CONCLUSIONES

La primera conclusión que se puede sacar de esta tesis es que la velocidad máxima horizontal (VMHS) del suelo se relaciona mejor con los daños registrados en la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del Distrito Federal causados por el sismo del 19 de septiembre de 1985, que la aceleración máxima horizontal del suelo (Apéndice E). Esto concuerda con la actual tendencia de relacionar los daños con ese parámetro sísmico (la VMHS). También hay que indicar, que es posible calcular los daños usando la aceleración máxima, con el inconveniente de tener intervalos de confianza muy grandes, que no convienen en el cálculo de daños y, por consiguiente, de costos.

A continuación se comenta los principales aportes que el desarrollo de esta tesis permitió realizar. Estos abarcan todos los pasos realizados desde la estimación de velocidades máximas en el Distrito Federal hasta la estimación de daños ante posibles sismos futuros.

Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para el Distrito Federal: los mapas de velocidad máxima horizontal del suelo mostrados en las secciones 3.4 y 3.5 son importantes, no sólo en la estimación de daños en tuberías enterradas, sino en el análisis de daños en otras estructuras cuyo parámetro sísmico relacionado sea la velocidad máxima del suelo. Un ejemplo de este tipo de estructuras, puede ser: puentes largos, cuya relación de dimensiones (largo/ancho) sea muy grande. La razón para afirmar lo anterior es que, por lo general, el daño sísmico en estructuras muy esbeltas (como las tuberías y los puentes largos), está relacionado con los desplazamientos relativos entre apoyos, y estos, a su vez, son directamente proporcionales a la velocidad máxima del suelo, a través de la ecuación desarrollada por Newmark (1967), vista en la sección 2.3.

Con respecto a la precisión de los mapas, es importante indicar que, a pesar de la escasez de datos la estimación de los valores de VMHS es buena, tanto para los sismos analizados, como para los sismos postulados. Sin embargo, sería ideal tener valores iguales a los obtenidos, a partir de registros sísmicos, para cada sitio del Distrito Federal, de forma que el error de la estimación fuera nulo. Para lograr esto, es indispensable tener un catálogo amplio de sismos bien registrados y poder hacer la corrección de la estimación en función, no sólo del período y de la magnitud, sino también de la distancia focal.

En estos mapas, se comprueba que, efectivamente en las zonas de lago y transición se presenta amplificación del movimiento del suelo en comparación con la zona de lomas. Y adicionalmente, en los sitios donde hay evidencia de amplificación también hay registros de fugas a causa del sismo de 1985.

Método simplificado para estimar la velocidad máxima del suelo en sismos postulados: el método propuesto es la generalización de los sismos postulados creados por Ordaz *et al* 1989 y Ordaz *et al* 1994, para cada sitio del Distrito Federal y permite, a través de tres mapas y una ecuación, calcular la velocidad máxima esperada del suelo ante un sismo futuro de una determinada magnitud y distancia focal. La precisión del método propuesto es muy buena con respecto a los valores obtenidos mediante el modelo original.

Este método refleja el comportamiento sísmico de cada sitio del Distrito Federal. Se observa que, en general, cada sitio tiene una forma particular de moverse ante eventos de diferentes intensidades sísmicas. Si esto no fuera cierto, las tres constantes calculadas no variarían espacialmente en la superficie de la ciudad.

Relación empírica de vulnerabilidad sísmica (REVS) para la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del Distrito Federal: la REVS propuesta permite hacer una estimación adecuada del número de fugas que se pueden presentar en la RPDAP ante niveles de VMHS hasta de 95 cm/s. Esto se puede afirmar ya que se observó que las fugas registradas se presentaron en un amplio intervalo de valores de VMHS (entre 6.11 y 95.05 cm/s, ver tabla 4.8). Otra ventaja de la REVS es que se calculó de forma objetiva, al promediar las curvas obtenidas para diferentes intervalos (Apéndice C), sin asumir que alguna de ellas fuera la adecuada para la estimación de daños.

La REVS propuesta se ajusta aproximadamente a los datos de daños calculados con el sismo postulado para el evento de 1985, puesto que el valor total de fugas fue cercano al registrado para ese sismo (figura 5.13).

La REVS, para valores de VMHS inferiores a 30 cm/s, proporciona valores de daño superiores a los datos calculados (usados en el ajuste). Esto se consideró adecuado, ya que es improbable que la tasa de daño sea constante, como así sugieren éstos datos (figura 4.7).

La forma de comprobar si realmente el daño es constante para velocidades máximas del suelo inferiores a 30 cm/s es utilizando daños en la red para sismos pequeños y realizando el mismo cálculo descrito en la sección 4.4. Lamentablemente los únicos datos de daño disponibles para la elaboración de esta tesis, fueron los correspondientes al sismo de 1985.

Debido a lo anterior, se sugiere que, debido al tamaño del sismo de 1985, la REVS propuesta es muy confiable para velocidades máximas del suelo superiores a 30 cm/s. Para valores inferiores, es posible que la tasa de daño predicha sea superior a la real. Se prefirió que fuera así, para evitar subestimar el número de reparaciones estimado de la red ante sismos postulados.

Como conclusión, se puede afirmar que la REVS propuesta no es una expresión exacta, sino que puede ser actualizada por la información de daños en la red, a medida que suceden los eventos sísmicos. La evolución de la REVS, a medida que es complementada por nueva información, puede proporcionar información relacionada con: el mejoramiento o empeoramiento del comportamiento sísmico de la red; evaluación de nuevos criterios de diseño sísmico de tuberías enterradas; mejorar la estimación de daños ante los diferentes niveles de velocidad del suelo; etc.

Comparación de la vulnerabilidad sísmica de la RPDAP con otros sistemas de distribución de agua: la comparación de daños en la RPDAP con respecto a otros sistemas de distribución de agua, mostrado en la sección 5.3 permite sensibilizarnos más con respecto al desempeño sísmico de la red. Realmente es complicado saber, a simple vista, si los valores de fugas son muchos o pocos, con respecto al desempeño sísmico de la red. Al utilizar otras relaciones de vulnerabilidad para calcular los daños, se está simulando lo que pasaría en otras redes si estuvieran sometidas al evento sísmico de 1985 y se localizaran en el suelo del Distrito Federal.

Al comparar la RPDAP del DF con los sistemas EBMUD (East Bay Municipal Utility District) y LADWP (Los Angeles Department of Water and Power); se concluye que la RPDAP es 3.7 y 5.6 veces más susceptible de recibir daño por causas sísmicas que estos sistemas, respectivamente. Por otra parte, la comparación con los daños obtenidos con la relación de vulnerabilidad ALA (2001) permite concluir que, en términos generales, el daño en la RPDAP puede ser 2.7 veces más grande que el promedio de daño registrado en otros sistemas de distribución de agua.

Mapa de vulnerabilidad sísmica relativa para la RPDAP del DF: este mapa, mostrado en la sección 5.4.2, corresponde a una microzonificación preliminar que permite conocer las zonas de posible concentración de daños. En general, se recomienda que los mapas de vulnerabilidad sísmica sean complementados con datos acerca del suelo y la forma como se propagan las ondas sísmicas a través de él. A pesar de esto, el mapa mostrado, es una herramienta útil para desarrollar planes de contingencia ante una emergencia sísmica, de forma que el servicio de entrega de agua se reestablezca cuanto antes a mayor número de usuarios.

Un dato importante que se puede obtener de este análisis es que la RPDAP tiene una vulnerabilidad sísmica relativa ponderada V_{sr} de 0.267, con respecto a la vulnerabilidad en el sitio más desfavorable del Distrito Federal (V_{sr} igual a 1).

Curvas de daño para sismos postulados: las curvas de daño, vistas en la sección 5.5.2, permiten estimar el número de reparaciones para sismos futuros de subducción. Debido a que estas curvas están basadas en los daños causados por el sismo de 1985, es importante indicar que para sismos como este (de gran magnitud) la confiabilidad del cálculo es mayor que para sismos pequeños. Realmente es difícil indicar cuál es el límite entre el cálculo preciso y el que no lo es; sin embargo, es conveniente que para sismos con magnitud inferior a 7.6, la estimación del número de fugas sea leída directamente de la tabla 5.5; y para magnitudes superiores, se recomienda usar la ecuación ajustada (sección 5.5.2).

Al observar las curvas de daño (figura 5.13), se puede concluir que el número de fugas para magnitudes superiores e iguales a 7.6 aumenta exponencialmente con la magnitud y disminuye en la misma medida con la distancia focal.

Para magnitudes inferiores a 7.6, no hay una tendencia exponencial clara; por tanto, no se puede generalizar una ecuación para todas las magnitudes y distancias focales. La tabla 6.1 resume las magnitudes y distancias focales en las cuales empiezan a presentarse fugas.

Tabla 6.1 Magnitudes y distancias focales que pueden iniciar fugas en la RPDAP

Distancia focal (km)	Magnitud
250	6.6
300	6.7
350	6.8
400	6.9
450	7.0

Una conclusión importante es que para magnitudes superiores a 6.6 es posible que se empiecen a generar fugas (considerando distancias focales superiores a 250 km). El problema se agrava si las fugas ocurren en tuberías de diámetro muy grande (48 o 72"), pues una sola de ellas podría dejar gran parte de la ciudad sin abastecimiento de agua.

Una utilidad práctica de las curvas de daño mostradas es la estimación del costo de reparación de la red luego de la ocurrencia de un sismo. Para el cálculo, se multiplica el número de fugas estimado con las curvas y el valor promedio (o la esperanza) del valor unitario de reparación.

Recomendaciones para investigaciones futuras

Para darle continuidad a esta tesis, y lograr los tres pasos más importantes en la administración efectiva de daños, a tuberías enterradas de distribución de agua, mencionados en la sección 1.1, se recomienda seguir las líneas de investigación orientadas hacia los siguientes aspectos:

- Actualizar y completar la relación de vulnerabilidad propuesta. Al vincular nuevos datos de daño causados por sismos diferentes al ocurrido en 1985 se podría hacer una mejor estimación del daño ante sismos postulados. Esto puede ser posible si entidades como la DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica) proporcionan información respecto a la localización de fugas y el evento sísmico que las produjo.

- Realizar una microzonificación de la red, basada no solo en la información presentada en esta tesis (Por ejemplo, el mapa de vulnerabilidad sísmica relativa mostrado en la sección 5.4.2), sino en información relacionada con la deformación y curvatura del suelo del Distrito Federal a causa durante sismos. Una forma de estimar la deformación y curvatura del suelo es utilizando las ecuaciones de Newmark (1967, sección 2.3), los mapas de velocidad máxima del suelo (secciones 3.4 y 3.5) y estimar la velocidad de propagación de ondas sísmicas durante los eventos sísmicos que se consideren en el análisis.
- Mejorar la estimación de los posibles costos de reparación de la red. Esto es posible al calcular el valor esperado del costo total de reparación teniendo en cuenta el costo asociado a cada tramo de tubería y al tipo de suelo donde esta se ubica. Este costo es función del diámetro, material, tipo de conexión, tipo de suelo, etc.
- Desarrollar criterios de diseño sísmico acordes a la microzonificación sísmica de la red, de forma que cada tramo de tuberías, al ser reparado, pueda mejorar su desempeño sísmico y reducir el número de fallas ante sismos futuros.

Finalmente, la metodología de cálculo de la REVS propuesta puede ser usada para estimar las relaciones de vulnerabilidad sísmica de otros sistemas de distribución de agua. Además, es posible que la REVS propuesta pueda usarse en la estimación del posible daño causado por sismos en otros sistemas de distribución de agua que sean similares a la RPDAP.

REFERENCIAS

- AMERICAN LIFELINES ALLIANCE ALA (2001). "Seismic Fragility Formulations For Water Systems", www.americanlifelinesalliance.org. abril.
- Ayala, G. y O'Rourke, M.J., (1989) "Effects of the 1985 Michoacan Earthquake on Water Systems and other Buried Lifelines in México". Tecnical Report NCEER-89-0009, State University of New York, Búfalo, marzo.
- Ballantyne, D. B., Berg, E., Kennedy, J., Reneau, R., y Wu, D., (1990) "Earthquake Loss Estimation Modeling of the Seattle Water System". Report to U.S. Geological Survey, Grant 14-08-0001- G1526, octubre.
- Barenberg, M.D., (1988) "Correlation of Pipeline Damage with Ground Motion" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 6, junio.
- Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes (1993). "Catálogo de estaciones acelerográficas 1960-1992". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. México.
- Canavos G. (1987) "Probabilidad y estadística": aplicaciones y métodos., Ed. Mc Graw Hill. México.
- Castro R, Singh S.K. y Mena E. (1988) "An empirical model to predict Fourier amplitude spectra of horizontal ground motion". Earthquake Spectra, 4, 675-686.
- Eguchi, R.T., Legg, M.R., Taylor, C.E., Philipson, L.L. y Wiggins, J.H. (1983) "Earthquake Performance of Water and Natural Gas Supply System", J. H. Wiggins Company. NSF Grant PFR-8005083, Report 83-1396-5, Julio.
- Eidinger, J. (1998) "Lifelines. Water Distribution System, in The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989", Performance of the Built Environment-Lifelines. US Geological Survey Professional Paper 1552-A, pp A63-A80, A. Schiff Ed., diciembre.
- Eidinger, J., Maison, B. Lee, D. y Lau, R. (1995) "EBMUD Water Distribution Damage in the 1989 Loma Prieta Earthquake." 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE, ASCE, San Francisco.
- Esteva L (1970) "Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería" Serie Azul del Instituto de Ingeniería, 246.
- Insenberg J., (1981) "Social and economic impact of earthquakes on utility lifelines" American Society of Civil Engineers. EUA.
- Katayama, T., Kubo, K., y Sito, N., (1975) "Earthquake Damage to Water and Gas Distribution Systems" Proceedings—US National Conference on Earthquake Engineering. EERI.
- Kubo, K. (1979) "Behavior of Underground Water Pipes During an Earthquake", Fifth world conference on earthquake engineering. Roma.
- Lancaster P. y Salkauskas K. (1986). "Curve and surface fitting. An introduction" Academic Press, Londres.

- López, J. R. (1992) "Vulnerabilidad y Servicialidad de los sistemas de distribución de agua ante sismo", DEPTI - UNAM, México.
- McGuire R. K. (1978) "A simple model for estimating Fourier amplitude spectra of horizontal ground acceleration" BSSA, 68, 803-822.
- Newmark, N.M. (1967) "Problems in Wave Propagation in Soil and Rocks", Proceedings of International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Albuquerque, NM, pp 7-26.
- OPS-OMS, (2000) CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Ordaz, M., Perez Rocha, L.E., Reinoso, E., Montoya, C. y Arboleda, J. (1996-2002) "Programa Z", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- O'Rourke M.J. (1996) "Response of Buried Pipelines to Wave Propagation", NCEER Bulletin Julio.
- O'Rourke, M.J., y Ayala, G., (1993) "Pipeline Damage to Wave Propagation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 9.
- O'Rourke, M.J., Bloom, M.C., y Dobry, R. (1982) "Apparent Propagation Velocity of Body Waves", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 283-294.
- O'Rourke, M.J., Castro, G. y Hossain, I., (1984) "Horizontal Soil Strain due to Seismic Waves", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No 9, septiembre, pp 1173-1187.
- O'Rourke y Liu, X. (1999) "Response of buried pipelines subject to earthquake effects" MCCER Monograph No. 3. State University of New York, Búfalo, marzo. (249 pp.)
- O'Rourke, T.D., y Jeon, S.S. (1999) "Factors Affecting the Earthquake Damage of Water Distribution Systems," in Optimizing Post-Earthquake Lifeline System Reliability, TCLEE Monograph No. 16, ASCE.
- Ordaz, M. (1994) "Espectros de Sitio y Temblores de Diseño en el Distrito Federal" Programa Z, proyecto 6534, patrocinado por el Departamento del Distrito Federal.
- Ordaz, M, Reinoso, E., Singh, S.K., Vera, E. y Jara, J.M. (1989). "Espectros de respuesta en diversos sitios del Valle ante temblores postulados en la brecha de Guerrero", Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, México, A187-A198.
- Ordaz, M. y Singh, S.K. (1992). "Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City", Bull Seism Soc Am, 82, 24-43.
- Ordaz, M, Singh, S.K. y Arciniega, A. (1994) "Bayesian Attenuation regressions: an application to México City" Geophys J Int, 177, 335-344.
- Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh S.K. (1995) "A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes", BSSA Vol 85, No 6, pp 1635-1647.
- Ordaz, M. (2001) "Programa Degtra", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Pelto, C.R., Elkins, T.A. y Boyd, H.A. (1988) "Automatic contouring of irregularly spaced data" Geophysics, 33, 424-430.
- Singh, S.K. y Ordaz, M. (1994). "Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual" Cuadernos de Investigación 18, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

APÉNDICE A

FACTORES K PARA LA RELACIÓN DE VULNERABILIDAD DE LA AMERICAN LIFELINES ALLIANCE A.L.A.,2001

MATERIAL	TIPO DE UNION	SUELO	DIAMETRO	K
Hierro colado	Cemento	Todos	4 a 12"	1.0
Hierro colado	Cemento	Corrosivos	4 a 12"	1.4
Hierro colado	Cemento	No corrosivos	4 a 12"	0.7
Hierro colado	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.8
Acero soldado	Soldadura en arco	Todos	4 a 12"	0.6
Acero soldado	Soldadura en arco	Corrosivo	4 a 12"	0.9
Acero soldado	Soldadura en arco	No corrosivo	4 a 12"	0.3
Acero soldado	Soldadura en arco	Todos	≥ 16"	0.15
Acero soldado	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.7
Acero soldado	Atornillado	Todos	4 a 12"	1.3
Acero soldado	Remachado	Todos	4 a 12"	1.3
Asbesto cemento	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5
Asbesto cemento	Cemento	Todos	4 a 12"	1.0
Concreto con cilindro de acero	Soldadura en arco	Todos	≥ 16"	0.7
Concreto con cilindro de acero	Cemento	Todos	≥ 16"	1.0
Concreto con cilindro de acero	Empaque de hule	Todos	≥ 16"	0.8
PVC	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5
Hierro dúctil	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5

En la tabla de factores K no se incluyen valores para tuberías de asbesto cemento de gran diámetro. Debido a que este tipo de tuberías es usado en la red primaria de distribución de agua potable (RPDAP) del DF, objeto de esta tesis, es necesario determinar valores apropiados de K provenientes de otras fuentes de información; esto es posible gracias a que los factores recomendados por ALA (2001) son valores asociados a comportamientos relativos de las tuberías; por lo cual, es posible determinar fracciones que representen el comportamiento de tipos de tuberías no incluidos con respecto a otros que si estén considerados en las tablas dadas.

Con este propósito, el valor de K estimado para las tuberías de asbesto cemento de gran diámetro (ahora denominado K_{acg}) se pueden obtener a partir de la tabla desarrollada por Eidinger y Avila (1999), que se presenta en el apéndice B. Estos factores K_e pueden ser usados con este propósito debido a que, al igual que los obtenidos por ALA (2001) fueron determinados por evidencia empírica y por comparación entre el daño de diferentes tipos de tuberías.

Según el apéndice B, se puede observar que el valor de K_{acg} es 2.0. La relación K_{acg} con respecto a otros valores de K_e son:

MATERIAL	TIPO DE JUNTA	DIAMETRO	K_e	CALIDAD	K_{acg}/K_e
Acero soldado	Soldadura en arco	$\geq 16''$	0.15	B	13.33
Asbesto cemento	Cemento	4 a 12''	1.0	B	2.0
Concreto con cilindro de acero	Soldadura en arco	$\geq 16''$	1.0	D	2.0
Concreto con cilindro de acero	Cemento	$\geq 16''$	2.0	D	1.0
Concreto con cilindro de acero	Empaque de hule	$\geq 16''$	1.2	D	1.66

K_{acg}/K_e indica cuántas veces más grande es el daño de la tubería de asbesto cemento de gran diámetro con respecto a los otros tipos de tubería. Multiplicando estos resultados por los valores de K de la tabla original de ALA (2001) obtenemos valores equivalentes de K_{acg} . Esto se resume en la siguiente tabla.

MATERIAL	TIPO DE JUNTA	DIAMETRO	CALIDAD	K_{acg}/K_e	K	K_{acg}
Acero soldado	Soldadura en arco	$\geq 16''$	B	13.33	0.15	2.0
Asbesto cemento	Cemento	4 a 12''	B	2.0	1.0	2.0
Concreto con cilindro de acero	Soldadura en arco	$\geq 16''$	D	2.0	0.7	1.4
Concreto con cilindro de acero	Cemento	$\geq 16''$	D	1.0	1.0	1.0
Concreto con cilindro de acero	Empaque de hule	$\geq 16''$	D	1.66	0.8	1.328

De la tabla anterior se concluye que el mejor valor para el factor K en tuberías de asbesto cemento de diámetro grande (K_{acg}) es 2.0, puesto que fue el valor estimado para los niveles de mejor calidad (B).

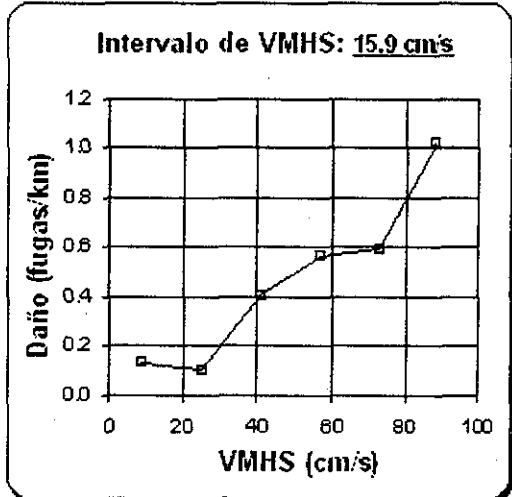
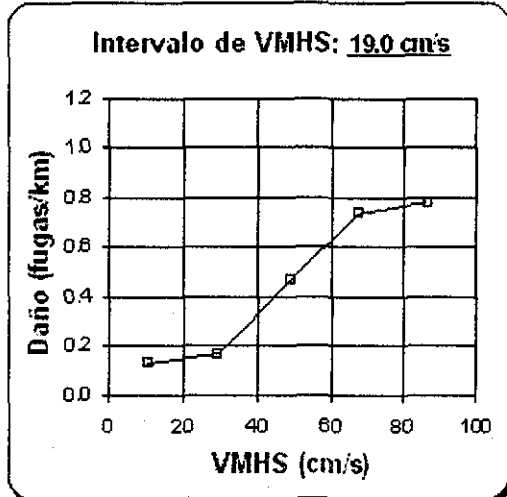
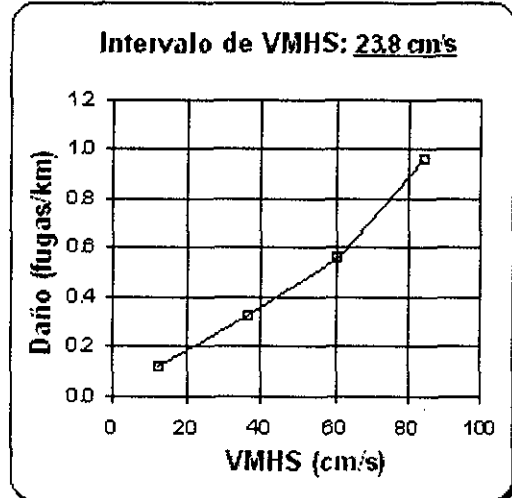
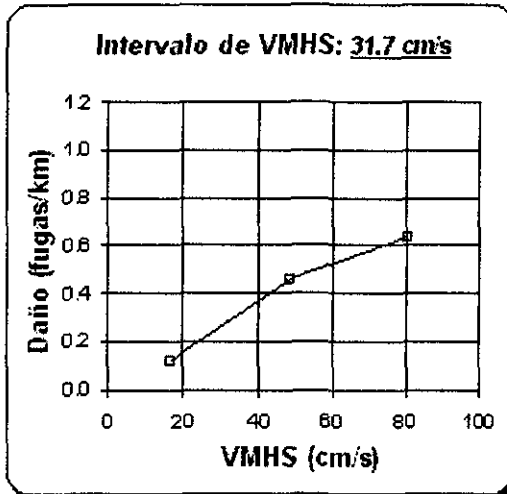
APÉNDICE B

FACTORES DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO RELATIVO (EIDINGER y AVILA, 1999)

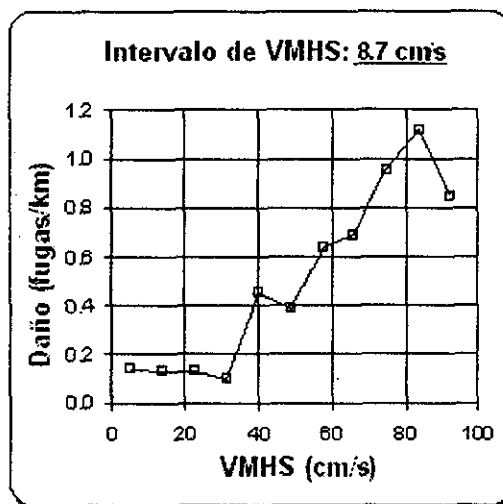
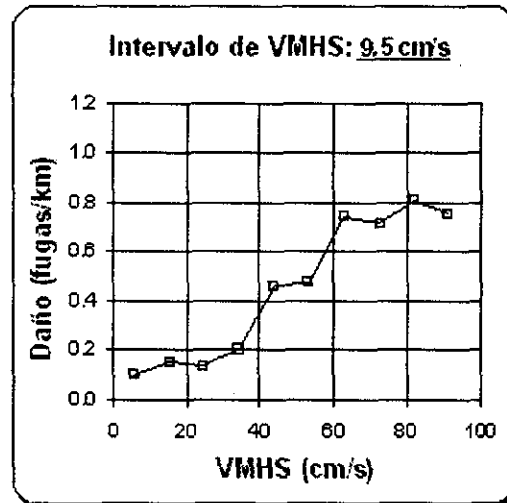
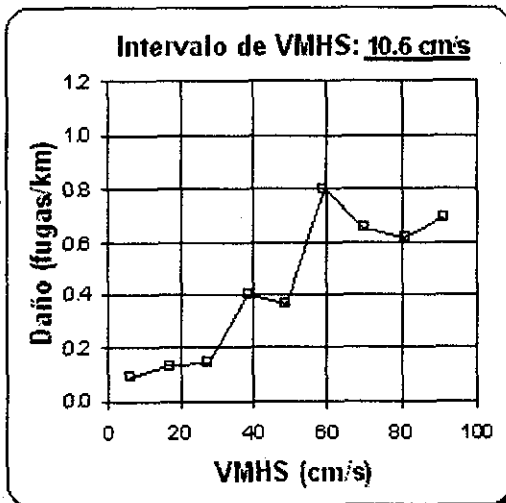
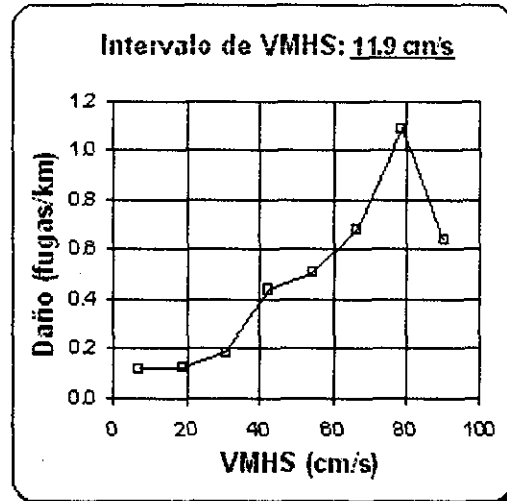
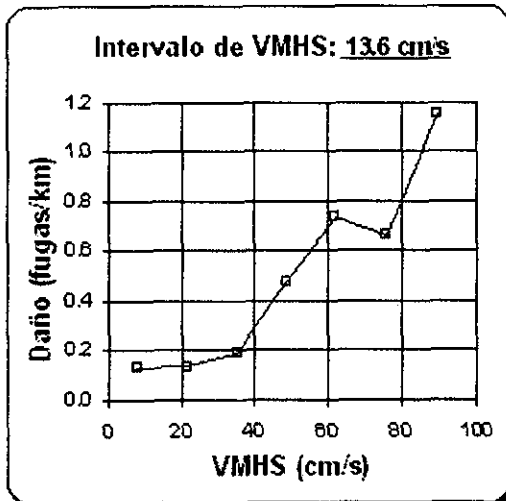
MATERIAL	TIPO DE UNION	SUELO	DIAMETRO	KE	CALIDAD
Hierro colado	Cemento	Todos	4 a 12"	0.8	B
Hierro colado	Cemento	Corrosivos	4 a 12"	1.1	C
Hierro colado	Cemento	No corrosivos	4 a 12"	0.5	B
Hierro colado	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5	D
Acero soldado	Soldadura en arco	Todos	4 a 12"	0.5	C
Acero soldado	Soldadura en arco	Corrosivo	4 a 12"	0.8	D
Acero soldado	Soldadura en arco	No corrosivo	4 a 12"	0.3	B
Acero soldado	Soldadura en arco	Todos	≥ 16"	0.15	B
Acero soldado	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.7	D
Asbesto cemento	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5	C
Asbesto cemento	Cemento	Todos	4 a 12"	1.0	B
Asbesto cemento	Cemento	Todos	≥ 16"	2.0	D
Concreto con Cilindro de acero	Soldadura en arco	Todos	≥ 16"	1.0	D
Concreto con Cilindro de acero	Cemento	Todos	≥ 16"	2.0	D
Concreto con Cilindro de acero	Empaque de hule	Todos	≥ 16"	1.2	D
PVC	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.5	C
Hierro dúctil	Empaque de hule	Todos	4 a 12"	0.3	C

APÉNDICE C

CURVAS DE DAÑO PARA DIFERENTES INTERVALOS DE VELOCIDAD MÁXIMA HORIZONTAL DEL SUELO (VMHS)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

INTERVALO DE VMHS: 31.7 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	16.85	44	363.97	0.121
2	48.55	99	214.55	0.463
3	80.25	16	25.25	0.635
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 23.8 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	12.9	37	310.36	0.120
2	36.7	60	188.67	0.319
3	60.5	53	95.30	0.558
4	84.3	9	9.44	0.956
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 19.0 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	10.5	33	259.70	0.128
2	29.5	26	154.52	0.169
3	48.5	66	143.15	0.464
4	67.5	30	41.25	0.733
5	86.5	4	5.15	0.782
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 15.9 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	8.95	28	211.33	0.133
2	24.85	16	153.60	0.104
3	40.75	55	135.88	0.406
4	56.65	44	78.61	0.561
5	72.55	12	20.43	0.589
6	88.45	4	3.92	1.023
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 13.6 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	7.8	23	177.72	0.130
2	21.4	21	155.39	0.136
3	35	19	101.20	0.189
4	48.6	52	110.12	0.474
5	62.2	33	45.28	0.732
6	75.8	7	10.58	0.664
7	89.4	4	3.49	1.152
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 11.9 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	6.95	18	155.38	0.116
2	18.85	19	154.73	0.123
3	30.75	17	91.16	0.187
4	42.65	43	97.49	0.442
5	54.55	34	67.40	0.505
6	66.45	19	28.02	0.679
7	78.35	7	6.43	1.090
8	90.25	2	3.15	0.636
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 10.6 cm/s				
<i>No Intervalo</i>	<i>VMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	6.3	12	135.05	0.089
2	16.9	21	154.09	0.136
3	27.5	11	75.89	0.145
4	38.1	34	84.99	0.400
5	48.7	32	87.91	0.364
6	59.3	33	41.23	0.801
7	69.9	12	18.49	0.649
8	80.5	2	3.25	0.615
9	91.1	2	2.88	0.695

Suma:	159	603.77	
--------------	-----	--------	--

INTERVALO DE VMHS: 9.5 cm/s				
No Intervalo	VMHS promedio (cm/s)	No Fugas	Longitud (km)	Daño (fugas/km)
1	5.75	10	103.03	0.098
2	15.25	23	156.07	0.148
3	24.75	11	82.00	0.135
4	34.25	15	73.27	0.206
5	43.75	38	83.44	0.458
6	53.25	28	59.60	0.473
7	62.75	21	28.53	0.741
8	72.25	9	12.68	0.714
9	81.75	2	2.49	0.810
10	91.25	2	2.66	0.756
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE VMHS: 8.7 cm/s				
No Intervalo	VMHS promedio (cm/s)	No Fugas	Longitud (km)	Daño (fugas/km)
1	5.35	9	64.97	0.139
2	14.05	23	170.84	0.135
3	22.75	13	96.93	0.134
4	31.45	6	61.51	0.098
5	40.15	31	68.20	0.455
6	48.85	28	71.88	0.390
7	57.55	24	37.60	0.638
8	66.25	14	20.36	0.688
9	74.95	7	7.34	0.953
10	83.65	2	1.79	1.119
11	92.35	2	2.36	0.847
Suma:		159	603.77	

APÉNDICE D

TASAS MEDIAS DE DAÑO PARA SISMOS MEXICANOS Y OTROS O'Rourke y Ayala (1993)

SÍMBOLO	VELOCIDAD PICO DE SUELO (CM/S)	DAÑO (FUGAS/KM)	AÑO	SITIO	MATERIAL	DIÁMETRO
A	30	0.155	1971	San Fernando	CI	3-6"
B	15	0.028	1969	Santa Rosa	CI	3-6"
C	15	0.024	1971	San Fernando	CI	3-6"
D	7.5	0.007	1965	Puget Sound	CI	8-10"
E	30	0.786	1983	Coalinga	CI	3-6"
F	48	0.45	1985	Mex, Zona de Lago	AC, CONC, CI	20", 48"
G	12	0.07	1985	Mex, Zona de Trans.	AC, CONC, CI	20", 48"
H	11	0.01	1985	Mex, Zona de Lomas	AC, CONC, CI	20", 48"
I	54	1.5	1989	Mex, Tlahuac	PCCP	72 "
J	25	0.17	1989	Mex, Tlahuac	PCCP	72"
K	30	0.33	1983	Coalinga	AC	3-10"

APÉNDICE E

COMPARACIÓN ENTRE LAS RELACIONES DAÑO-VELOCIDAD MÁXIMA DEL SUELO Y DAÑO-ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO

El propósito de este apéndice es comprobar que la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS) tiene mejor correlación con los daños sísmicos registrados el 19 de septiembre de 1985 en la red primaria de distribución de agua potable del Distrito Federal que la aceleración máxima horizontal del suelo (AMHS).

La figura E-1 muestra el mapa de aceleraciones calculadas para el sismo de 1985. Allí se observa que en la zona de lago se presentan grandes variaciones en los valores de AMHS.

Posteriormente se calculó la AMHS asociada a cada fuga y se desarrollaron curvas de daño para diferentes intervalos de aceleración, de forma similar al procedimiento seguido en la sección 4.4 para la obtención de la REVS en función de la VMHS.

En la figura E-2 se muestran las curvas de daño y sus respectivos valores. Es importante observar que para intervalos inferiores a 26.4 cm/s^2 los puntos se encuentran más dispersos. Otra observación es que para la curva con intervalo de 16.8 cm/s^2 no hay relación de daño cuando la aceleración media es 9.4 cm/s^2 , esto indica que en ese intervalo no hubo fugas.

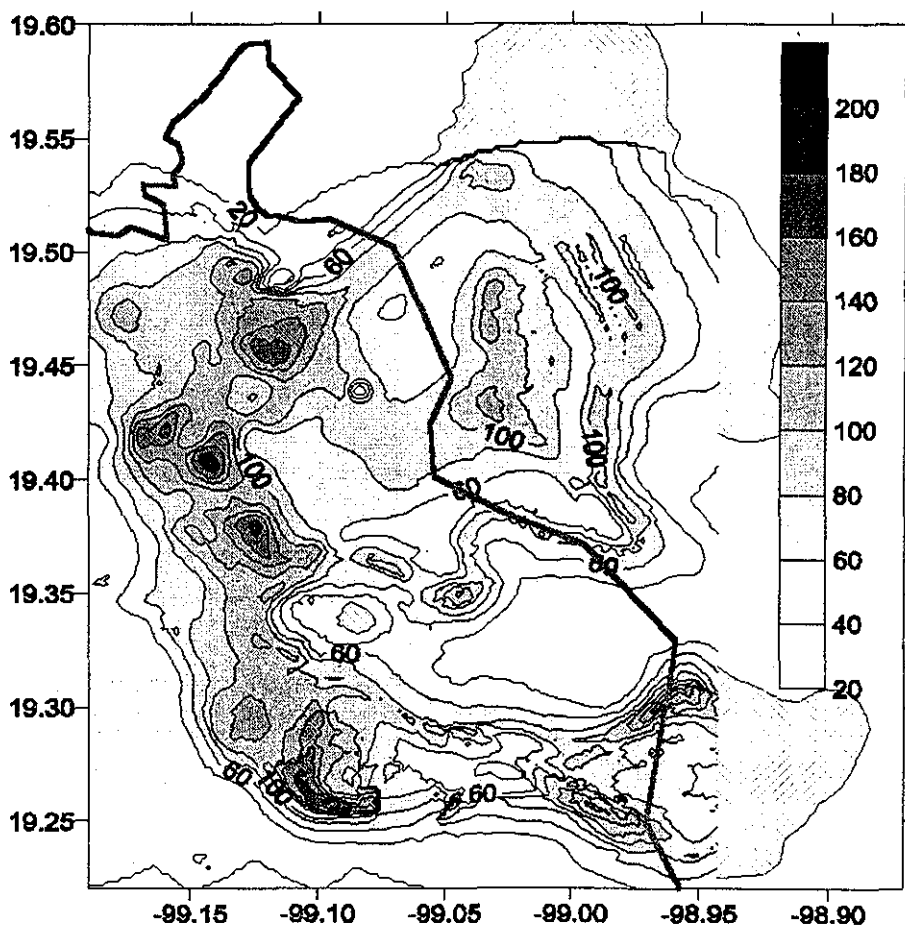


Figura E-1. Mapa de aceleración máxima del suelo para el evento del 19 de septiembre de 1985

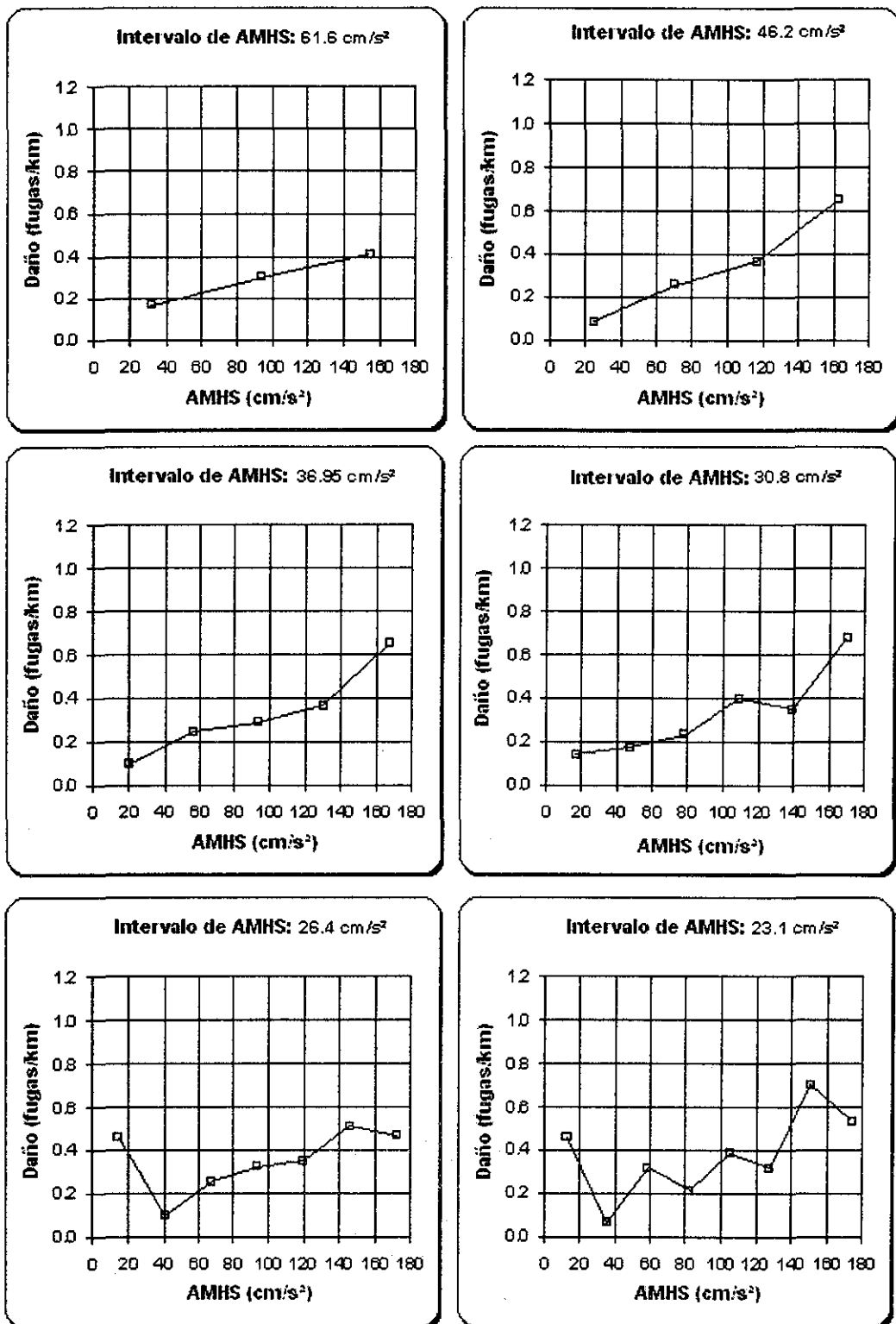


Figura E-2 Curvas de daño para diferentes intervalos de AMHS

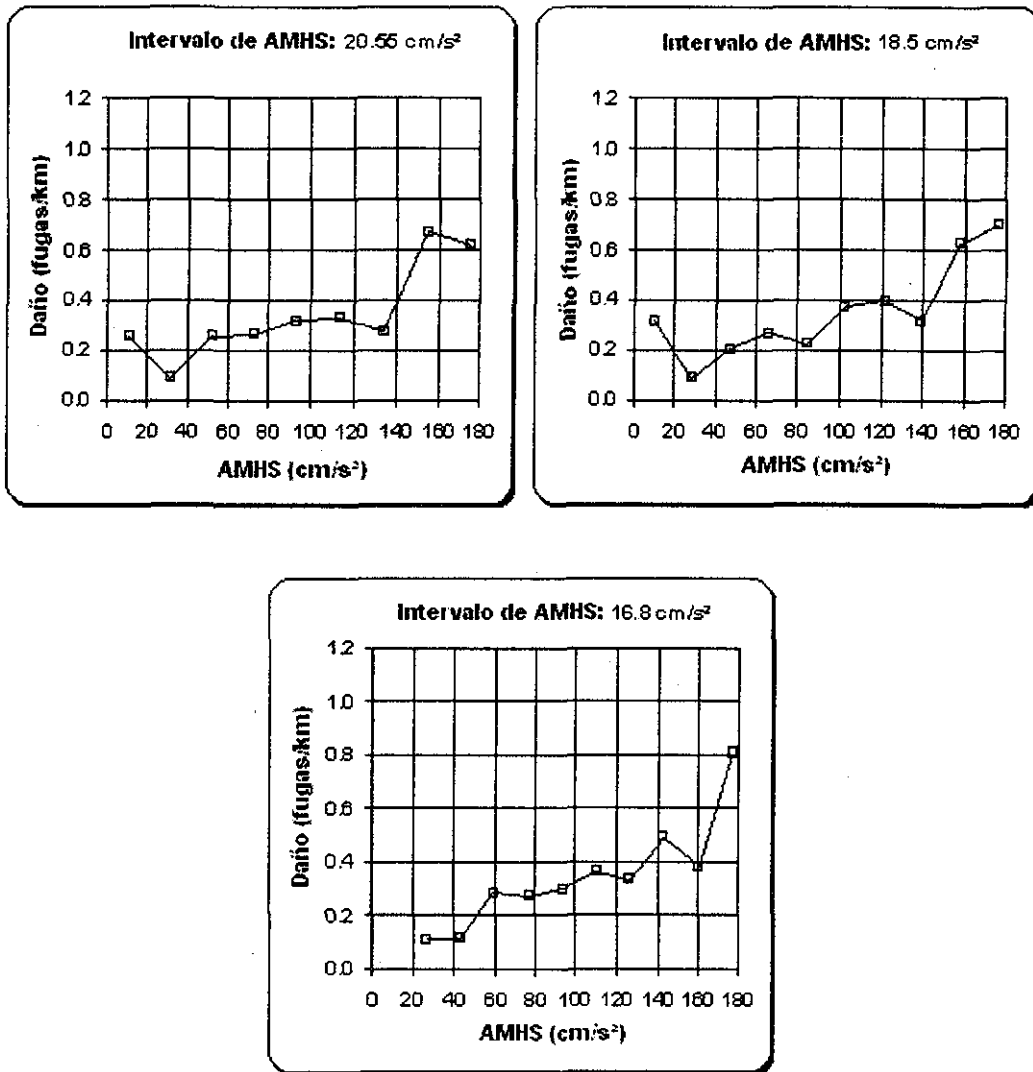


Figura E-2 (continuación)

INTERVALO DE AMHS: 61.6 cm/s ²				
No Intervalo	AMHS promedio (cm/s)	No Fugas	Longitud (km)	Daño (fugas/km)
1	31.8	33	199.96	0.165
2	93.4	105	352.90	0.297
3	155	21	50.92	0.411
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 46.2 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	24.1	12	140.59	0.085
2	70.3	72	278.72	0.258
3	116.5	59	160.08	0.367
4	162.7	16	24.38	0.654
<i>Suma:</i>		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 36.95 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	19.475	10	101.43	0.099
2	56.425	45	183.28	0.247
3	93.375	66	228.86	0.290
4	130.325	27	73.22	0.371
5	167.275	11	17.00	0.650
<i>Suma:</i>		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 30.8 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	16.4	9	63.49	0.141
2	47.2	24	136.72	0.175
3	78	51	218.72	0.233
4	108.8	54	134.15	0.402
5	139.6	14	40.34	0.346
6	170.4	7	10.35	0.675
<i>Suma:</i>		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 26.4 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	14.2	5	10.96	0.455
2	40.6	15	153.46	0.098
3	67	41	161.18	0.254
4	93.4	53	164.76	0.321
5	119.8	27	77.25	0.349
6	146.2	14	27.53	0.508
7	172.6	4	8.63	0.463
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 23.1 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	12.55	3	6.57	0.460
2	35.65	8	126.38	0.064
3	58.75	37	117.24	0.318
4	81.85	35	163.96	0.215
5	104.95	45	117.31	0.387
6	128.05	15	47.50	0.318
7	151.15	12	17.26	0.701
8	174.25	4	7.54	0.535
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 20.55 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	11.275	1	3.84	0.261
2	31.825	10	109.27	0.092
3	52.375	21	81.55	0.258
4	72.925	39	148.31	0.264
5	93.475	41	130.74	0.314
6	114.025	26	78.97	0.330
7	134.575	9	32.61	0.277
8	155.125	8	11.99	0.669
9	175.675	4	6.49	0.618
Suma:		159	603.77	

INTERVALO DE AMHS: 18.5 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	10.25	1	3.15	0.317
2	28.75	9	101.91	0.088
3	47.25	14	68.36	0.204
4	65.75	31	114.06	0.271
5	84.25	30	131.06	0.228
6	102.75	36	96.24	0.373
7	121.25	20	49.86	0.400
8	139.75	7	22.33	0.313
9	158.25	7	11.14	0.627
10	176.75	4	5.67	0.704
<i>Suma:</i>		159	603.77	

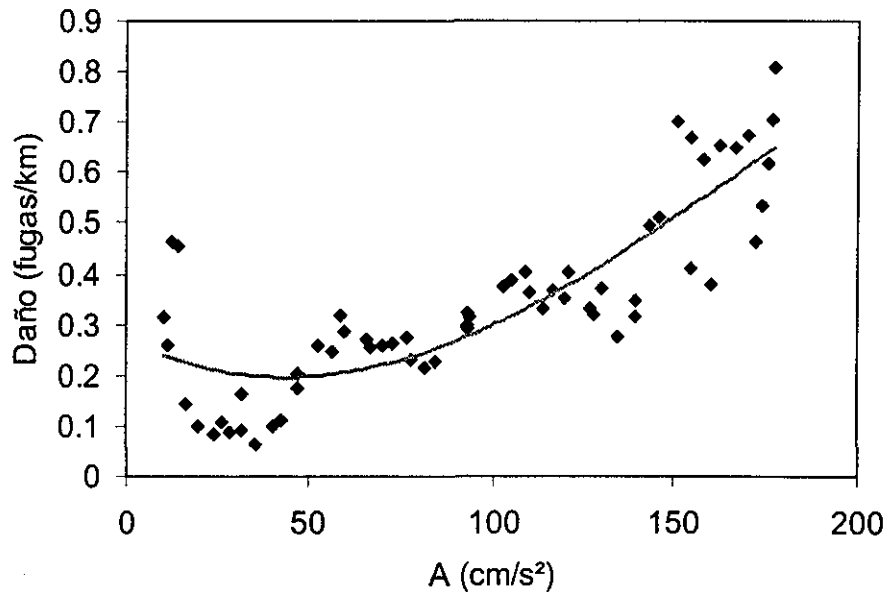
INTERVALO DE AMHS: 16.8 cm/s²				
<i>No Intervalo</i>	<i>AMHS promedio (cm/s)</i>	<i>No Fugas</i>	<i>Longitud (km)</i>	<i>Daño (fugas/km)</i>
1	9.4	0	4.12	0.000
2	26.2	9	82.71	0.108
3	43	8	70.63	0.113
4	59.8	23	80.33	0.285
5	76.6	33	120.30	0.273
6	93.4	32	107.51	0.296
7	110.2	27	74.20	0.362
8	127	11	33.03	0.331
9	143.8	9	18.16	0.493
10	160.6	3	7.86	0.380
11	177.4	4	4.93	0.808
<i>Suma:</i>		159	603.77	

Al observar las curvas de daño presentadas se concluye que tienen formas muy variadas y que aumenta la dispersión en todo el conjunto de datos a medida que el intervalo de velocidad se reduce. Al graficar todos los datos disponibles con el propósito de observar la tendencia general de los valores se aprecia que hay mucha dispersión, más que en la REVS propuesta.

Se realizaron cuatro ajustes con los datos de daño en función de la AMHS (en adelante se denota como A), las ecuaciones, valores R^2 y gráficas correspondientes se presentan a continuación.

Ajuste polinomial: de los 4 ajustes, es el que tiene más alto el valor de R^2 . Sin embargo, esta curva sugiere que el daño disminuye para aceleraciones inferiores a 50 cm/s^2 , lo cual es improbable.

$$D = -1.019E07A^3 + 0.00005A^2 - 0.0036A + 0.2704 \text{ con } R^2 = 0.7206$$



Ajuste con la función de distribución normal acumulada: en este ajuste, la forma de la ecuación es la misma que la usada en el cálculo de la relación de vulnerabilidad en función de la velocidad, propuesta en el capítulo 4.

$$D(V) = A + B \cdot \hat{n}(V; \mu, \sigma)$$

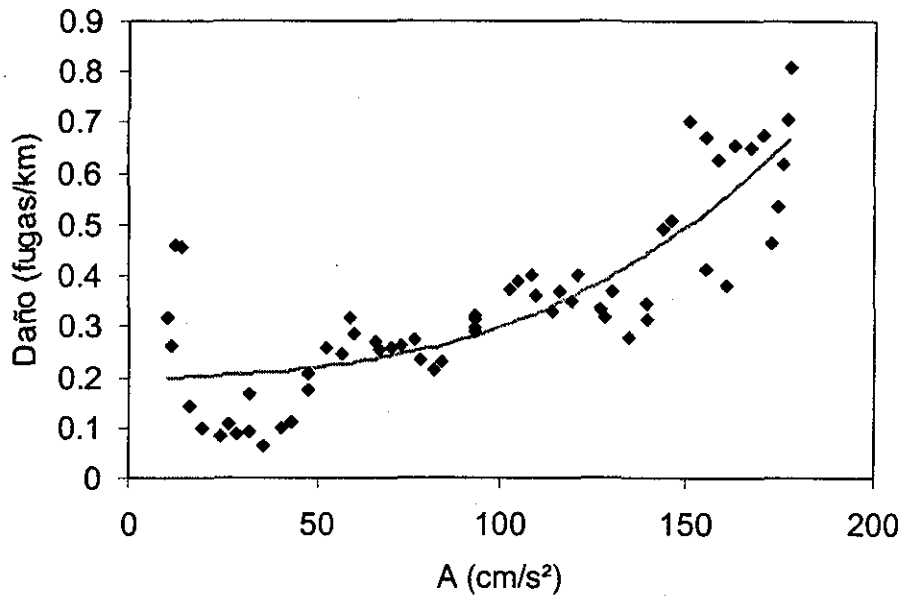
Donde \hat{n} es la función de distribución normal y se define de la siguiente forma:

$$\hat{n}(V; \mu, \sigma) = \int_{-\infty}^V \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(1/2)[(v-\mu)/\sigma]^2} dv$$

A, B, μ y σ tienen los siguientes valores:

A = 0.1915	B = 1.7789	$\mu = 228.7226$	$\sigma = 82.7462$
------------	------------	------------------	--------------------

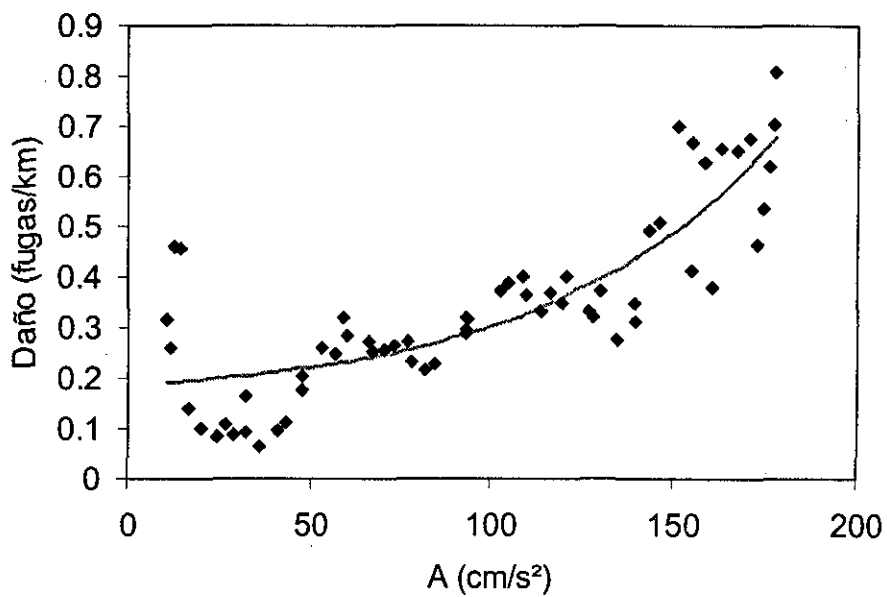
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



El valor de R^2 para este ajuste es de 0.7125

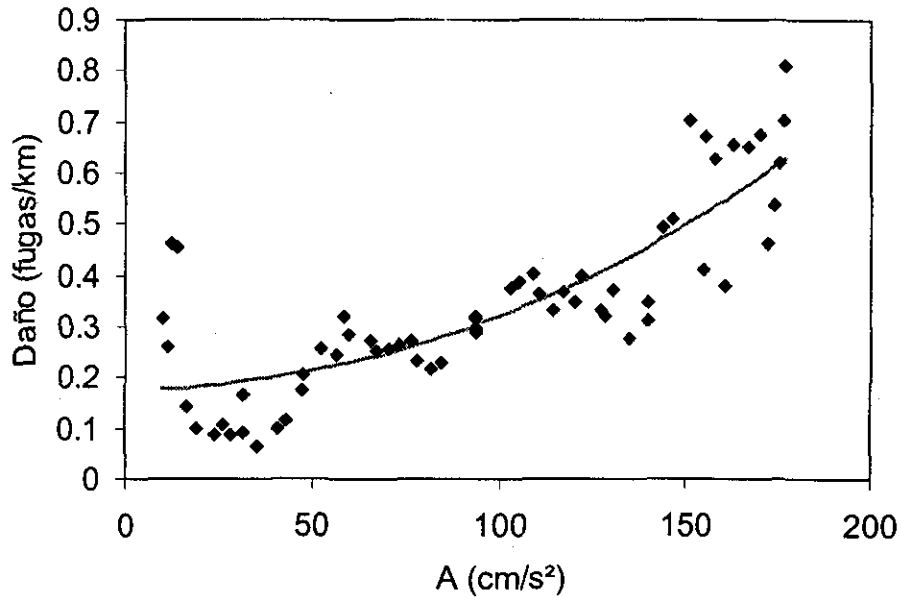
Ajuste exponencial: La ecuación, valor de R^2 y gráfica de este ajuste son:

$$D = 0.1606 + 0.0985 \cdot e^{(0.0168A - 1.322)} \quad \text{con } R^2 = 0.7119$$

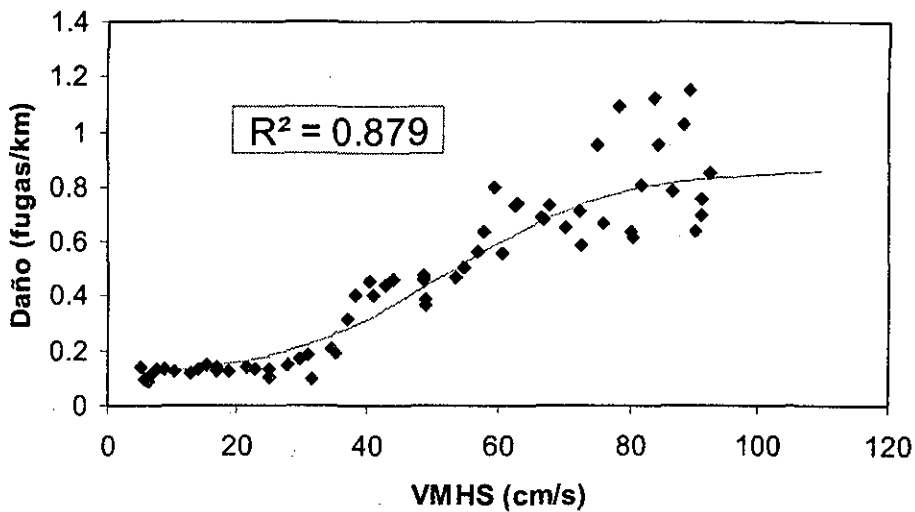


Ajuste potencial: La ecuación, valor de R^2 y gráfica correspondientes a este ajuste son:

$$D = 0.1703 + 4.735E(-06) \cdot (A + 15.397)^{2.182} \text{ con } R^2 = 0.7034$$



Al comparar los valores de R^2 para los cuatro ajustes con el obtenido en el ajuste de la REV \acute{S} propuesta ($R^2 = 0.879$) se concluye que definitivamente el mejor ajuste de los da \acute{n} os se obtiene al utilizar la velocidad m \acute{a} xima horizontal del suelo.



Otra forma de comprobar que la relación entre los da \acute{n} os y la velocidad m \acute{a} xima horizontal del suelo (VMHS) es mejor que la relación de los da \acute{n} os con la aceleración m \acute{a} xima del suelo (AMHS), es a trav \acute{e} s de la comparaci3n de la correlaci3n entre el da \acute{n} o y estos par \acute{a} metros s \acute{e} smicos.

La correlaci3n ρ entre dos variables x e y se define de la siguiente forma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y)$$

La condición para ρ es: $-1 \leq \rho_{X,Y} \leq 1$

$\rho_{X,Y}$ es el coeficiente de correlación entre X e Y. σ es la desviación estándar, μ es la media y n es el número de pares de datos. En las siguientes tablas se presenta el cálculo de la correlación entre el daño y los parámetros sísmicos: VMHS y AMHS.

RELACIÓN DAÑO-AMHS			
n = 62		μ	σ
AMHS	(cm/s ²)	94.7798	52.0373
Daño	(fugas/km)	0.3447	0.1759

Cov:	7.2138	ρ:	0.7879
-------------	--------	---------------------------	--------

RELACIÓN DAÑO-VMHS			
n = 63		μ	σ
VMHS	(cm/s)	48.6413	27.1728
Daño	(fugas/km)	0.4690	0.3048

Cov:	7.6445	ρ:	0.9231
-------------	--------	---------------------------	--------

El coeficiente de correlación de la relación daño-VMHS es mayor que el obtenido para daño-AMHS, esto confirma que es mejor utilizar la velocidad máxima del suelo en lugar de la aceleración máxima para el cálculo de una REVS que permita estimar el daño en la red de tuberías estudiada.

Resumen de daño promedio con respecto a la AMHS

AMHS	DAÑO	AMHS	DAÑO
(cm/s ²)	(fugas/km)	(cm/s ²)	(fugas/km)
9.400	0.000	93.400	0.296
10.250	0.317	93.475	0.314
11.275	0.261	102.750	0.373
12.550	0.460	104.950	0.387
14.200	0.455	108.800	0.402
16.400	0.141	110.200	0.362
19.475	0.099	114.025	0.330
24.100	0.085	116.500	0.367
26.200	0.108	119.800	0.349
28.750	0.088	121.250	0.400
31.800	0.165	127.000	0.331
31.825	0.092	128.050	0.318
35.650	0.064	130.325	0.371
40.600	0.098	134.575	0.277
43.000	0.113	139.600	0.346
47.200	0.175	139.750	0.313
47.250	0.204	143.800	0.493
52.375	0.258	146.200	0.508
56.425	0.247	151.150	0.701
58.750	0.318	155.000	0.411
59.800	0.285	155.125	0.669
65.750	0.271	158.250	0.627
67.000	0.254	160.600	0.380
70.300	0.258	162.700	0.654
72.925	0.264	167.275	0.650
76.600	0.273	170.400	0.675
78.000	0.233	172.600	0.463
81.850	0.215	174.250	0.535
84.250	0.228	175.675	0.618
93.375	0.290	176.750	0.704
93.400	0.297	177.400	0.808
93.400	0.321		