



## CAPÍTULO 4

# EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA

## Introducción

Este capítulo discute cómo evaluar la vulnerabilidad del sistema a fin de determinar si podrá cumplir con los objetivos del comportamiento (como se sugiere en el cuadro 1) en casos de terremotos moderados o de base operativa (TBO) y terremotos severos o de diseño (TDD). Tomando como base la información del capítulo anterior, los responsables y operadores de los sistemas deben ser capaces de cuantificar el comportamiento de los componentes de su sistema en categorías de vulnerabilidad alta, media y baja.

En general, se debe evaluar cada componente antes de evaluar el sistema en general, como se describió en el capítulo 1. Las secciones previas de esta publicación se centraron en la definición de los objetivos del sistema, la evaluación de las amenazas y la vulnerabilidad de los componentes.

Las siguientes partes de este capítulo tratan sobre la evaluación del sistema de acuerdo con su función, tales como fuente y conducción; dichas funciones luego se relacionan con los objetivos del comportamiento del sistema. Asimismo, se considera el uso de información sobre amenazas sísmicas para la evaluación del sistema, seguido de técnicas de evaluación mediante un modelo computarizado. Finalmente, se discute la mitigación a través de una propuesta integrada.

## Evaluación por función

Después de evaluar los componentes del sistema, el siguiente paso del análisis de vulnerabilidad es evaluar las funciones específicas requeridas para poder operar como una unidad. Estas funciones incluyen la fuente, conducción, tratamiento, bombeo, almacenamiento y distribución.

### Fuente

Después de evaluar la vulnerabilidad de cada fuente, agrúpelas y estudie la confiabilidad global de las fuentes del sistema. ¿Todas las fuentes son vulnerables al mismo mecanismo de daño? ¿Se cuenta con fuentes alternas o si una de estas fuentes falla, el sistema quedaría fuera de servicio? ¿Existe flexibilidad en el uso de fuentes independientes una de la otra, o las fuentes son interdependientes?

Por ejemplo, en Limón, Costa Rica, los deslizamientos incrementaron la turbiedad de una fuente de agua superficial hasta 2400 NTU, lo cual hizo que se pudiera utilizar solo de manera intermitente. Para

complementar la fuente de agua, la ciudad reactivó pozos que habían sido clausurados en años anteriores. Recientemente se ha creado una fuente alternativa de agua subterránea en otra área para complementar el suministro. Si estas fuentes alternativas hubieran estado disponibles al momento del sismo, hubieran podido ser usadas inmediatamente para restaurar la operación del sistema. Para poder usar el suministro de agua superficial, se redujo la capacidad de carga en los procesos unitarios de la planta y se modificó la selección y dosificación de coagulantes.

### Conducción

Después de evaluar cada línea de conducción, considere la capacidad global del sistema para transportar agua desde la fuente hasta los reservorios terminales y el sistema de distribución. ¿El sistema de conducción depende de una sola tubería o existen múltiples tuberías que conectan la fuente al sistema de distribución? ¿Las tuberías de conducción se encuentran alineadas en el mismo corredor y expuestas a amenazas sísmicas comunes, o son independientes? Si existieran líneas de conducción que no se encuentran en operación, ¿qué porción del sistema puede ser abastecido con las líneas restantes? ¿Cuál es la demanda real en áreas en servicio? Puede ser aceptable operar el sistema bajo la demanda usual en la temporada de invierno hasta que se restaure el sistema. Luego de ocurrido un desastre, se pueden implementar medidas de emergencia para el racionamiento del agua.

### Tratamiento

La capacidad de tratamiento se debe evaluar de acuerdo con el nivel de tratamiento (calidad) y la capacidad hidráulica (cantidad) de la planta de tratamiento. Puede haber cuatro categorías de operación:

- tratamiento completo con capacidad hidráulica completa
- tratamiento completo con capacidad hidráulica parcial
- tratamiento parcial con capacidad hidráulica completa
- tratamiento parcial con capacidad hidráulica parcial.

Considere el nivel de tratamiento mínimo que se requeriría para cumplir con los objetivos de la operación. Por ejemplo, puede que los procesos unitarios para la remoción de trazas contaminantes, que solo tienen efectos de largo plazo sobre la salud, no necesiten permanecer en operación durante períodos cortos después de un sismo. Asimismo, se podrían emplear alternativas de operación menos eficientes y más costosas durante períodos cortos de tiempo. En Limón, el personal de operaciones pudo operar su planta de tratamiento a la mitad de su capacidad usando una alta dosis de polímeros hasta que la turbiedad disminuyó. En la planta de tratamiento de Rinconada, después del terremoto de Loma Prieta, los operadores optaron por la filtración directa con capacidades de carga menores después de que el floculador y el clarificador resultaran dañados. Las estrategias alternativas de tratamiento se deben estudiar antes de que se produzca un sismo.

### Bombeo

Agrupe las capacidades del bombeo según la función. ¿Existe una estación de bombeo con vulnerabilidad baja que pueda abastecer a cada área de servicio? La energía eléctrica es crucial para que la mayoría de las estaciones de bombeo permanezca en operación; sin embargo, la confiabilidad de la energía eléctrica comercial es cuestionable. ¿Existen grupos electrógenos disponibles para operar las estaciones de bombeo críticas? ¿Han sido puestos a prueba con frecuencia bajo carga?

## Almacenamiento

Agrupe las instalaciones de almacenamiento según el área de servicio. Para suministrar el flujo requerido para la extinción de incendios, los sistemas generalmente dependen del almacenamiento en el sistema más que la capacidad de conducción. ¿Qué cantidad de almacenamiento de reserva dispone cada área de servicio o zona de presión? ¿Cada área de servicio tiene conexión múltiple, ya sea a una instalación de almacenamiento en la zona o a una zona más alta? ¿Cuántas instalaciones de almacenamiento aguas abajo de las líneas de conducción son altamente vulnerables y tomarían un período largo de reparación? En una comunidad grande en California, un proveedor está construyendo un reservorio grande aguas abajo de la falla de San Andrés a fin de que la comunidad tenga agua durante el período en que se esté reparando la línea de conducción. Generalmente, en un sistema de distribución habrá pocos componentes redundantes disponibles aparte de las tuberías.

La evaluación de la función se puede llevar a cabo en un taller que cuente con la participación del personal de operaciones del sistema e ingenieros familiarizados con la vulnerabilidad sísmica de los componentes del sistema. Otra posibilidad es que la evaluación de las tuberías se realice usando un modelo computarizado.

## Funciones requeridas para cumplir los objetivos del comportamiento sísmico

Los objetivos del comportamiento del sistema descritos en el capítulo 1 se centraron en los requisitos para satisfacer las demandas para la extinción de incendios, la calidad del agua y los niveles de demanda necesarios después de un sismo. En esta sección, cada uno de estos requisitos está relacionado con la evaluación funcional del sistema. Los objetivos generales del comportamiento del sistema son más difíciles de relacionar con los componentes específicos del sistema y, por tanto, no se discutirán en esta sección.

La disponibilidad de flujo para la extinción de incendios generalmente depende del agua almacenada dentro del sistema y de la capacidad del sistema de distribución para llevar agua al incendio. No depende de la fuente ni del sistema de conducción. Por tanto, los requisitos más estrictos para la extinción de incendios se pueden centrar en los componentes del sistema de almacenamiento y distribución.

La calidad del agua depende de las características de la fuente, el funcionamiento adecuado de la planta de tratamiento y la contaminación en el sistema de distribución. La vulnerabilidad de los procesos unitarios de la planta de tratamiento se puede controlar y se pueden implementar mejoras en caso de que se requieran. La contaminación del sistema de distribución con aguas subterráneas o filtración de aguas residuales es más difícil de controlar si se pierde la presión del sistema.

La demanda global del sistema se puede controlar hasta cierto punto mediante la implementación de un programa de racionamiento de emergencia. Por el lado del suministro, éste dependerá de la fuente y de que el sistema de conducción reparta el agua. Se puede realizar una evaluación de los componentes requeridos del sistema para suministrar la demanda exigida por los objetivos del comportamiento del sistema.

## Uso de la información sobre amenazas

La información sobre amenazas es crucial para la evaluación sísmica de los componentes y del sistema en su totalidad. Para realizar una evaluación razonable, se requiere información específica sobre la vibración del terreno, la susceptibilidad a la licuefacción y la vulnerabilidad a los deslizamientos. El mapeo de amenazas es un factor crítico cuando se evalúan las tuberías. Particularmente, la vulnerabilidad de las tuberías está estrechamente relacionada con la susceptibilidad a la licuefacción y el flujo lateral.

Una alternativa típica es sobreponer la información del mapa de amenazas sobre los planos de tuberías para identificar las áreas vulnerables. Luego, esta información se compara con la vulnerabilidad específica del material de la tubería (como se discutió en el capítulo 3) para hacer una evaluación de la vulnerabilidad de la tubería.

La vulnerabilidad a la licuefacción se puede analizar un poco más si se estima la deformación permanente del suelo (DPS) del material licuable y el impacto en la estructura de las tuberías enterradas. La metodología de Youd brinda un mecanismo para estimar la deformación permanente del suelo. O'Rourke (1992) presenta un método para calcular el efecto de los niveles variantes de la deformación permanente del suelo sobre las tuberías. Esta propuesta ha sido usada para proyectos de evaluación de tuberías en Vancouver, Canadá; en el distrito municipal de servicios públicos de East Bay, San Francisco, California; y en San Diego, California.

## Técnicas de evaluación a través de un sistema computarizado

Se han desarrollado modelos computarizados que pueden relacionar información sobre amenazas sísmicas, vulnerabilidad de los componentes del sistema de agua y operación del sistema de agua. El uso de una interfase del sistema de información geográfica (GIS), particularmente para realizar un inventario del sistema de tuberías y elaborar mapas de amenazas, es una opción muy eficiente.

Generalmente, los sistemas computarizados están diseñados para modelar escenarios de daños sísmicos representativos de varios terremotos. Por ejemplo, se pueden elaborar modelos de sismos de diferentes fuentes, sismos de subducción, sismos intraplacas y sismos corticales, cada uno de un tamaño y ubicación determinados.

Una vez que se tenga la ubicación, profundidad y longitud de la falla, el programa usa primero las relaciones de atenuación de la intensidad sísmica para estimar la vibración en cada ubicación del área de estudio. La figura 95 muestra un mapa de la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) para un sismo de magnitud 7,5, de una parte de Seattle, Washington (Kennedy, Jenks, Chilton 1990b). Luego, se calcula la amplificación sísmica en el sitio y se determina el nivel de vibración en la superficie terrestre para cada sitio.

Posteriormente, se ingresa la información sobre la susceptibilidad a la licuefacción como tamaño del grano, densidad y nivel freático. El modelo estimará la probabilidad de licuefacción basado en la información sobre susceptibilidad a la licuefacción y vibración del terreno. La figura 96 muestra un mapa de la susceptibilidad a la licuefacción para una parte del sistema de agua de Seattle.

La información sobre tuberías y la vulnerabilidad asociada se ingresa en formato GIS. Las relaciones de daños para la vibración del terreno, licuefacción y deslizamiento se ingresan basadas en la información sobre daños recopilada de sismos pasados, geometría de las tuberías y análisis estructurales. Las figuras 97 y 98 muestran las relaciones de daños a las tuberías debido a la vibración y a la licuefacción, respectivamente. El modelo luego estima la cantidad de daños a cada segmento de la tubería.

Con esa información, la computadora puede elaborar un modelo hidráulico del sistema usando un modelo modificado de análisis de redes. El modelo incluye demandas debido a fugas y rupturas de tuberías y toma en cuenta las presiones cuando distribuye las "demandas" del sistema. El modelo considerará la conectividad del sistema (es decir, si cada nodo está conectado a nodos adyacentes) y calculará las presiones hidráulicas resultantes. La figura 99 muestra el mapa de presiones del sistema para el sismo de magnitud 7,5 en Seattle.

Se han elaborado modelos para estimar el tiempo requerido para poner el sistema nuevamente en funcionamiento, los que se basan en estimados empíricos de los tiempos de reparación para el daño esperado. También se han hecho estimados preliminares sobre el impacto económico que este daño tendría en la comunidad. Esta información se puede usar para justificar los programas de mitigación de sismos.

## Prioridades de mitigación e implementación a través de una propuesta integrada

Basados en la evaluación del sistema, se pueden identificar los componentes deficientes desde el punto de vista sísmico y se pueden priorizar de acuerdo con su importancia para la operación del sistema.

Luego, esta información se debe combinar con los datos sobre planificación, inversión en mejoramiento y mantenimiento para elaborar un programa integrado que incorpore medidas de mitigación de sismos. La información sobre planificación puede identificar aspectos de calidad del agua relacionados con la interconexión de múltiples fuentes. Adicionalmente, se pueden identificar las demandas crecientes del sistema que requieren la adición de una nueva fuente o línea de conducción. Se pueden planificar proyectos de repavimentación para segmentos específicos de carreteras (los costos de construcción de nuevas conducciones se verían reducidos cuando fueran incorporados a un proyecto vial). Asimismo, se puede implementar un programa de reemplazo de las tuberías que requieran un alto mantenimiento.

Con esa información se puede elaborar un plan de mejoramiento integral que aborde los aspectos de crecimiento y mantenimiento, a la vez que incorpore medidas de mitigación de sismos.

Fuente: Kennedy, Jenks, Chilton (1990b)

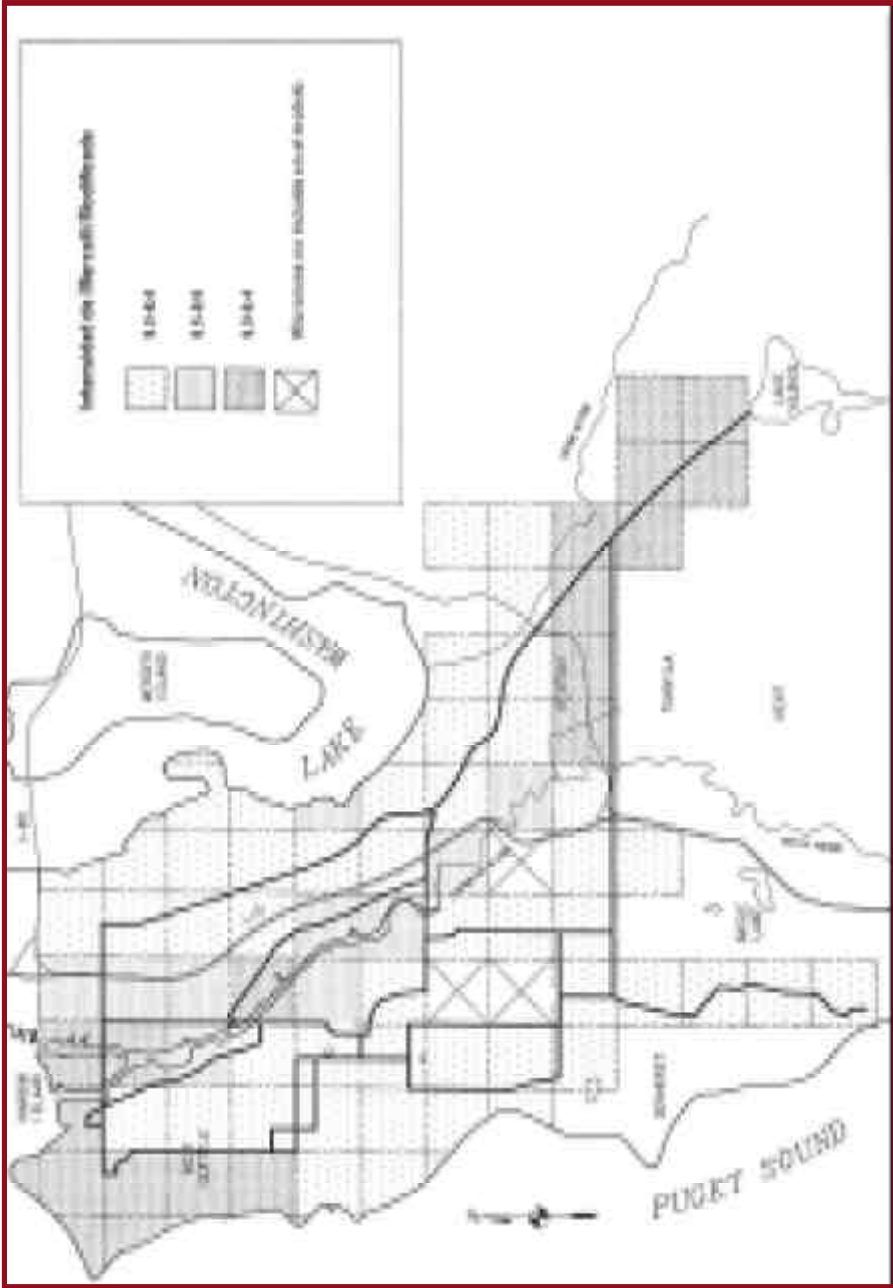


Figura 95. Mapa de la Intensidad de Mercalli Modificada para la parte sur de Seattle, Washington, para un sismo de magnitud 7.5.

Fuente: Kennedy, Jenks, Chilton (1990b)

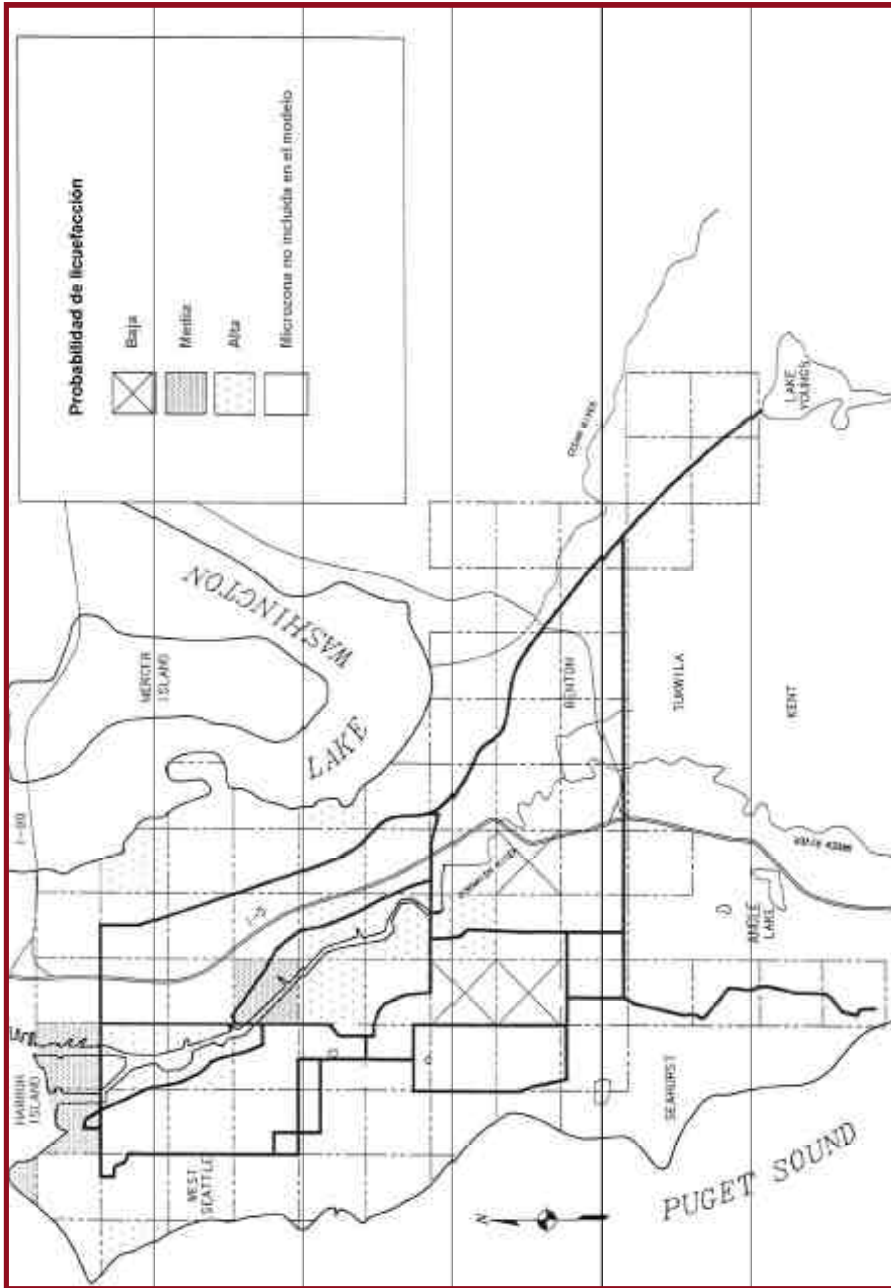


Figura 96. Mapa que muestra la susceptibilidad a la licuefacción de la parte sur de Seattle, para un sismo de magnitud 7,5.



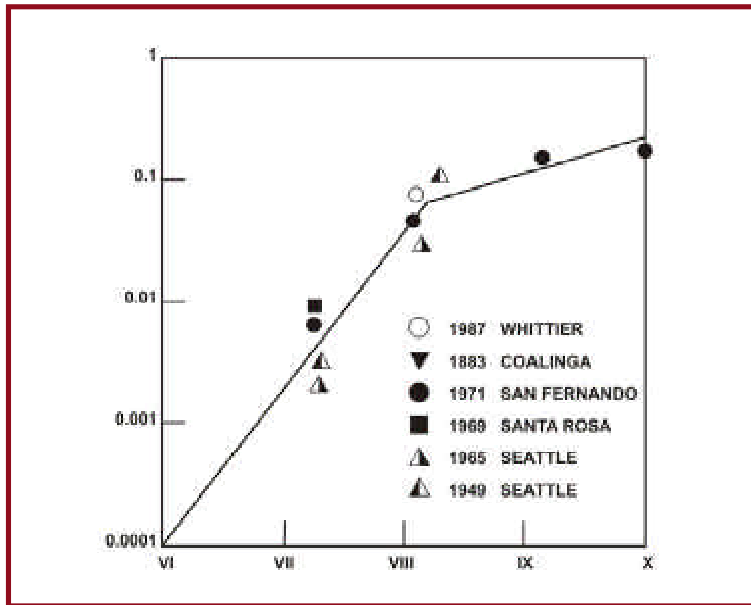


Figura 97. Algoritmo para la identificación de daños a tuberías debido a la vibración del terreno que muestra reparaciones por 1.000 pies (305 m) en función de la MM.

Fuente: Harding Lawson Associates, et. al. (1991)

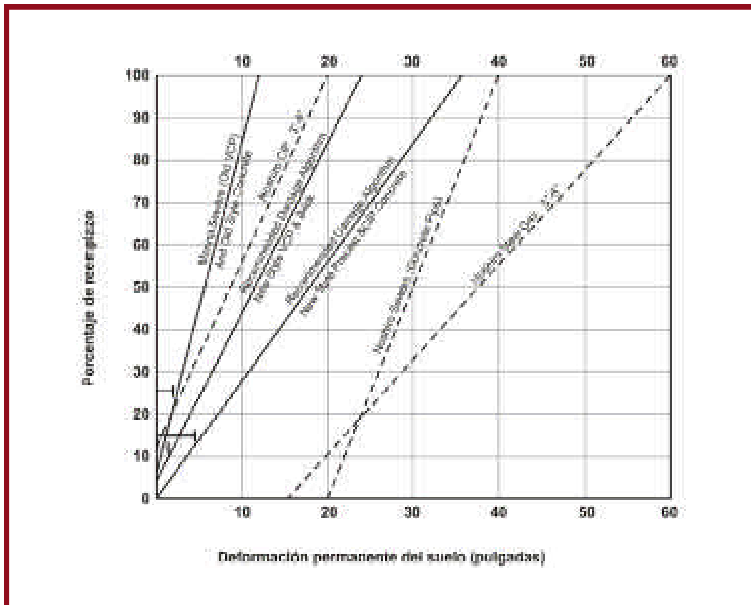


Figura 98. Algoritmo para la identificación de daños a tuberías debido a la licuefacción y al flujo lateral que muestra el porcentaje de reemplazo en función de la deformación permanente del suelo.

Fuente: Kennedy, Jenks, Chilton (1990b)

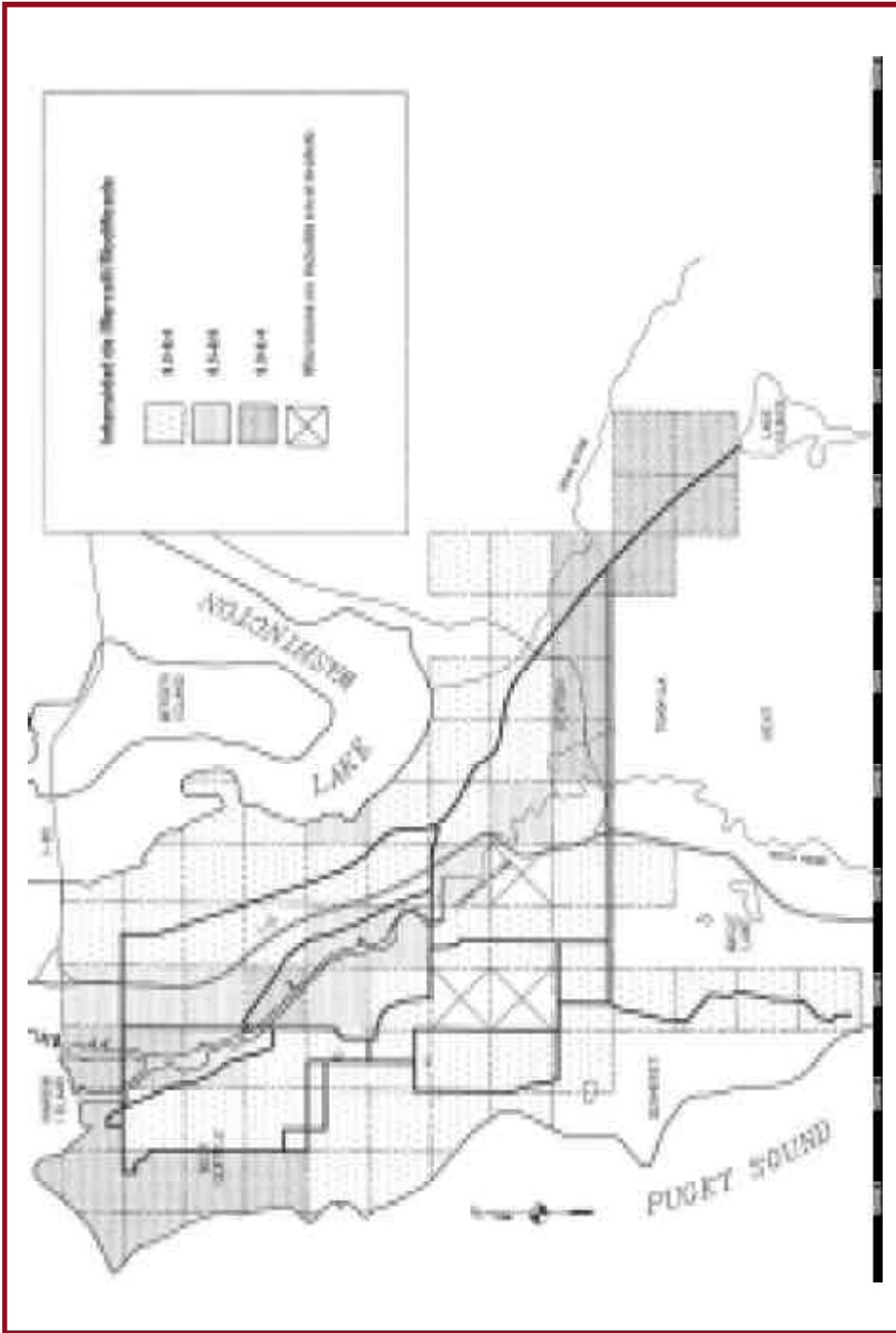


Figura 99. Presión del sistema en la mitad sureña de Seattle después de un escenario de sismo de magnitud 7.5, elaborado según el modelo de estimación de pérdidas.