
Evaluación de la vulnerabilidad del sistema

Introducción

Este capítulo discute cómo evaluar la vulnerabilidad del sistema a fin de determinar si un sistema podrá cumplir con los objetivos del comportamiento (como se sugiere en el cuadro 1-1) 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 propietarios 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 del sistema 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 a 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 en el análisis de la vulnerabilidad es evaluar las funciones específicas que el sistema debe tener para operar como una unidad. Estas funciones incluyen 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 diferentes fuentes independientes una de la otra o las fuentes son interdependientes?

Por ejemplo, en Limón, Costa Rica, los deslizamientos incrementaron la turbiedad de un suministro de agua superficial no tratada hasta en 2400 NTU, lo cual hizo que se pudiera utilizar sólo de manera intermitente. Para complementar su suministro, la ciudad reactivó pozos que habían sido clausurados en años anteriores. Recientemente se creó una fuente alternativa de aguas subterráneas 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, la ciudad redujo la capacidad de carga en los procesos unitarios de la planta y 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 una de las líneas de conducción no se encuentra en operación, ¿qué porción del sistema puede ser abastecido con las líneas restantes que sí se encuentran en servicio? ¿Cuál es la demanda real en áreas en servicio? Puede ser aceptable operar el sistema bajo la demanda que se produce en temporada de invierno hasta que se restaure el sistema. Luego de ocurrido un desastre, se pueden implementar medidas de emergencia para el racionamiento de agua.

Tratamiento

La capacidad de tratamiento se debe evaluar desde la perspectiva del nivel de tratamiento (calidad) y la capacidad hidráulica (cantidad) de la planta de tratamiento. Puede haber cuatro categorías de operación:

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

Considere qué nivel de tratamiento mínimo se requeriría para cumplir con los objetivos de operación. Por ejemplo, puede que los procesos unitarios para la remoción de trazas contaminantes, que sólo tienen efectos de largo plazo sobre la salud, no necesiten permanecer en operación durante periodos cortos después de un sismo. Asimismo, se podrían emplear alternativas de operación menos eficientes y más costosas durante periodos 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 a capacidades de carga menores después de que el floculador y el clarificador resultaran dañados. Antes de que se produzca un sismo, se deben estudiar estrategias de tratamiento alternativas.

Bombeo

Agrupe las capacidades de 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 estaciones de bombeo permanezcan 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 a diferencia de su capacidad de conducción. ¿Qué cantidad de sobre-almacenamiento está disponible en cada área de servicio o zona de presión? ¿Cada área de servicio tiene dosificadores múltiples ya sea de una instalación de almacenamiento en la zona o en una zona más alta? ¿Cuántas instalaciones de almacenamiento aguas abajo de las líneas de conducción son altamente vulnerables y tomarían un periodo largo en reparar? 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 periodo 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 según 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 por computadora.

Funciones requeridas para cumplir con los objetivos de comportamiento sísmico

Los objetivos del comportamiento del sistema descritos en el capítulo 1 se centraron en los requisitos del sistema para satisfacer las demandas para la extinción de incendios, la calidad del agua y los niveles de demanda necesarios para periodos después de un sismo. Cada uno de estos requisitos del sistema está relacionado con la evaluación funcional del sistema en esta sección. 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 casos de extinción de incendios se pueden centrar en los componentes del sistema de almacenamiento y distribución.

La calidad del agua depende de las características del agua en 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 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 al implementar 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 del sistema requeridos para suministrar la demanda exigida por los objetivos del comportamiento del sistema.

Uso de la información sobre amenazas

La información sobre amenazas es crucial en la evaluación sísmica de los componentes del sistema y el 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. Esta información luego 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 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, B.C.; 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 que sean 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, la computadora primero usa las relaciones de atenuación de la intensidad sísmica para estimar la vibración en cada ubicación en el área de estudio. La figura 4-1 muestra un mapa de la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) para un escenario de 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 4-2 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 4-3 y 4-4 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 esta información, la computadora puede elaborar un modelo hidráulico del sistema usando un modelo modificado de análisis de redes tal como KYPIPE. El modelo incluye demandas debido a fugas y rupturas de tuberías, y toma en cuenta las presiones del sistema 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 4-5 muestra el mapa de presiones del sistema para el sismo de magnitud 7,5 en Seattle.

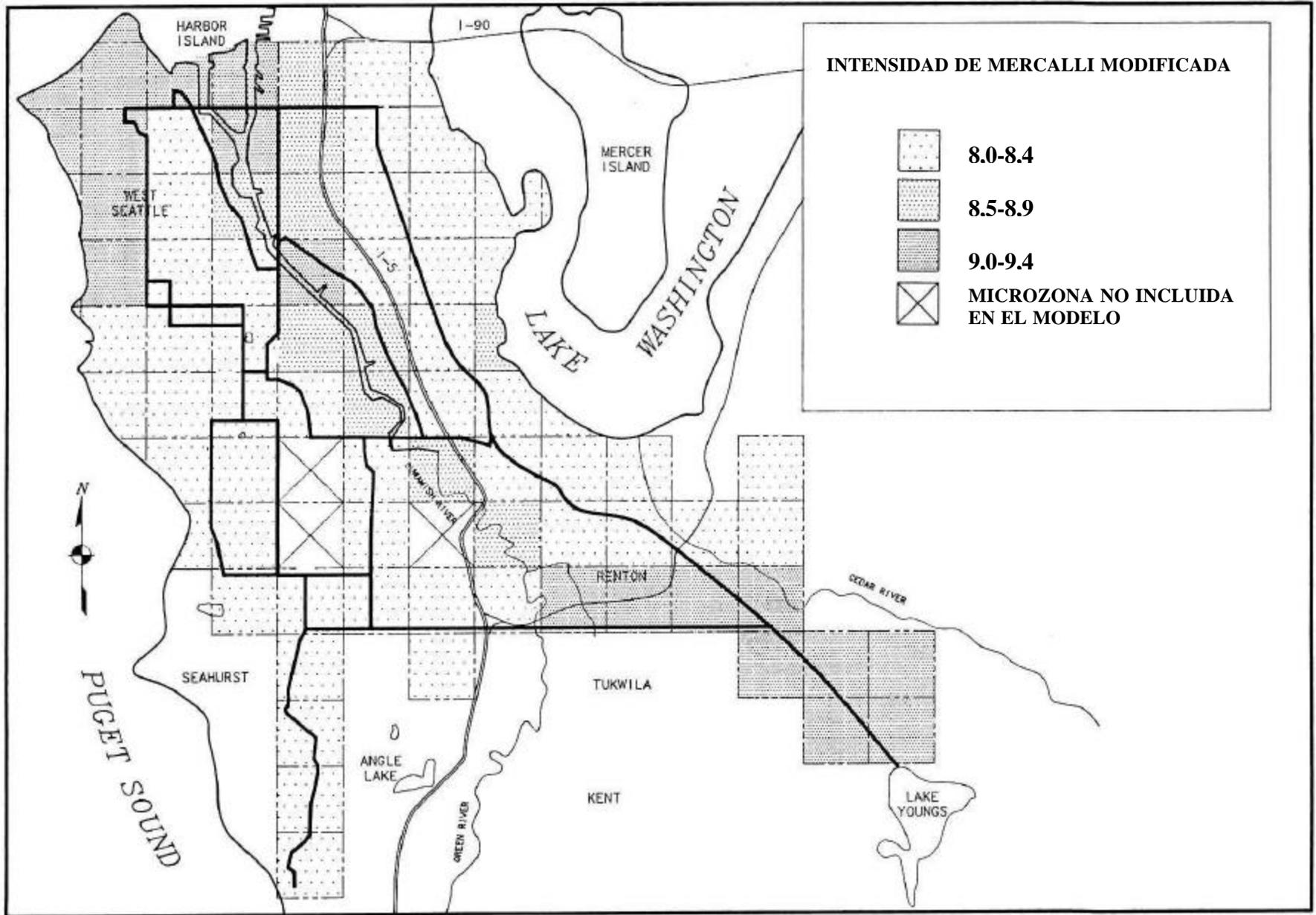
Se han elaborado modelos para estimar el tiempo requerido para poner el sistema nuevamente en funcionamiento que se basan en estimados empíricos de los tiempos de reparación para el daño esperado. También se han hecho estimados preliminares sobre el impacto económico que este daño tendría en la comunidad.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

Prioridades de mitigación e implementación a través de una propuesta integrada

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

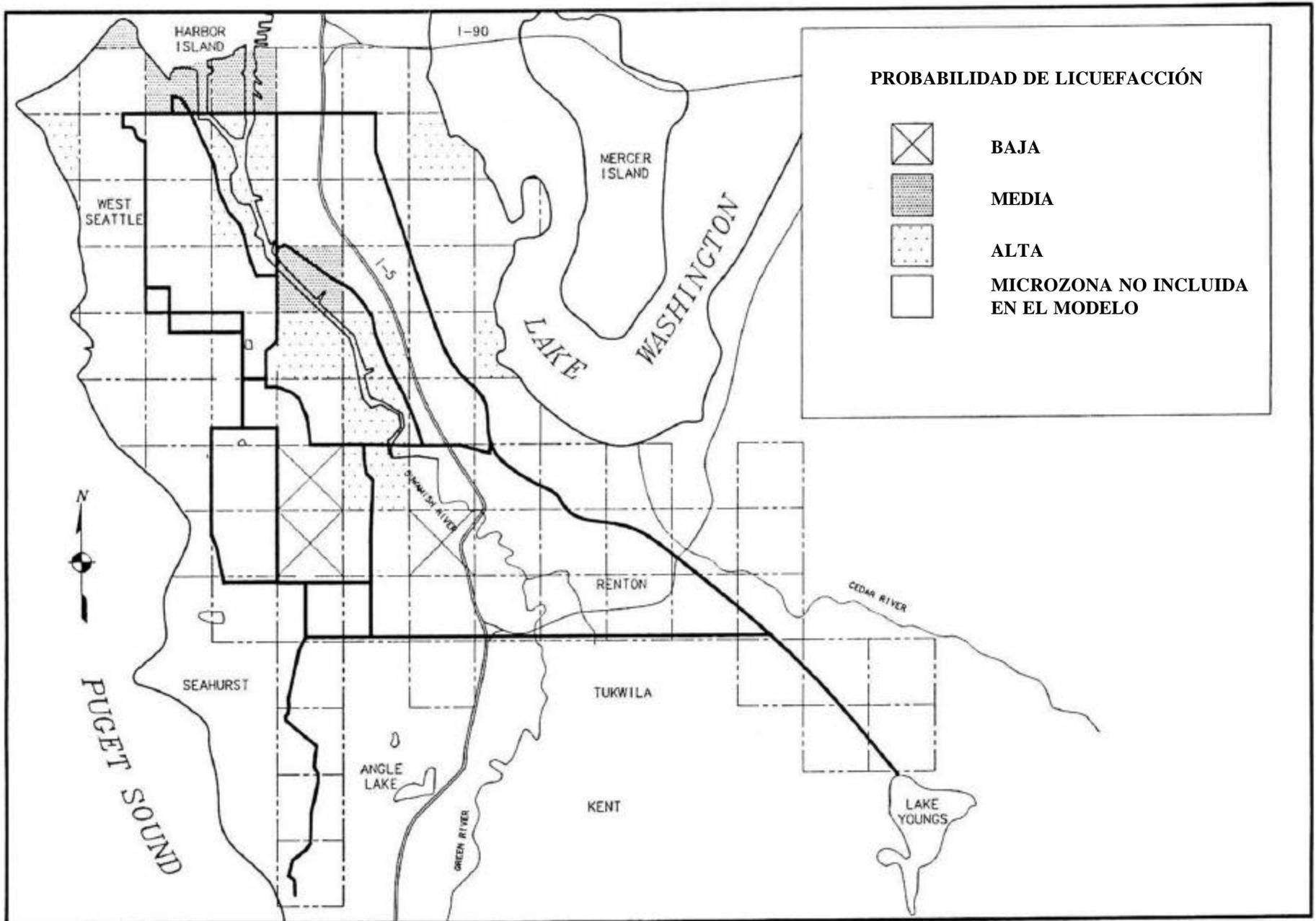
Esta información luego se debe combinar con otra información sobre planificación, inversión en mejoramiento y mantenimiento para elaborar un programa integrado que incorpore medidas de mitigación sísmica. La información sobre planificación puede identificar aspectos de calidad del agua relacionados con 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 tuberías nuevas se reducirían una vez incorporados a un proyecto vial). Asimismo, se puede implementar un programa de reemplazo de aquellas tuberías que requieren un alto mantenimiento.

Con esta 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 sísmica.



Fuente: Kennedy/Jenks/Chilton (1990b)

Figura 4-1 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 4-2 Mapa que muestra la susceptibilidad a la licuefacción de la parte sur de Seattle, para un sismo de magnitud 7,5.

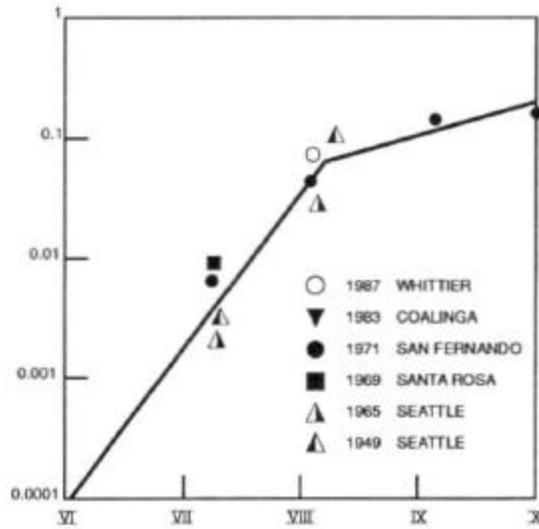
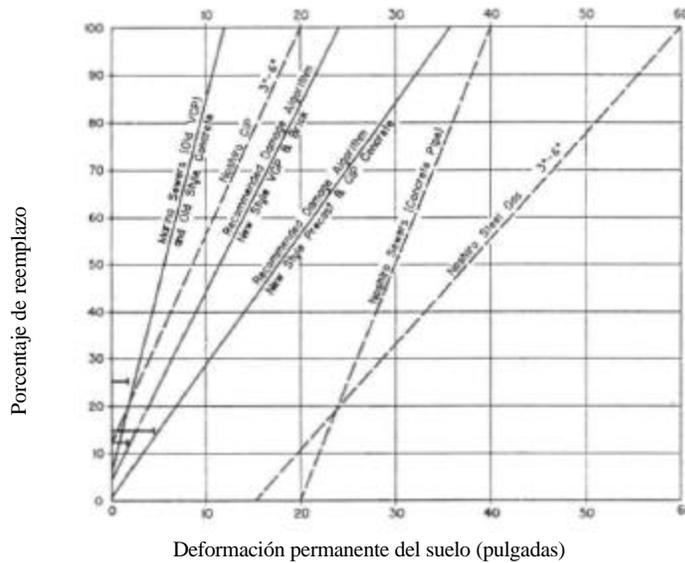


Figura 4-3 Algoritmo para la identificación de daños a tuberías debido a la vibración del terreno que muestra reparaciones por 1000 pies (305 m) en función de la MM.

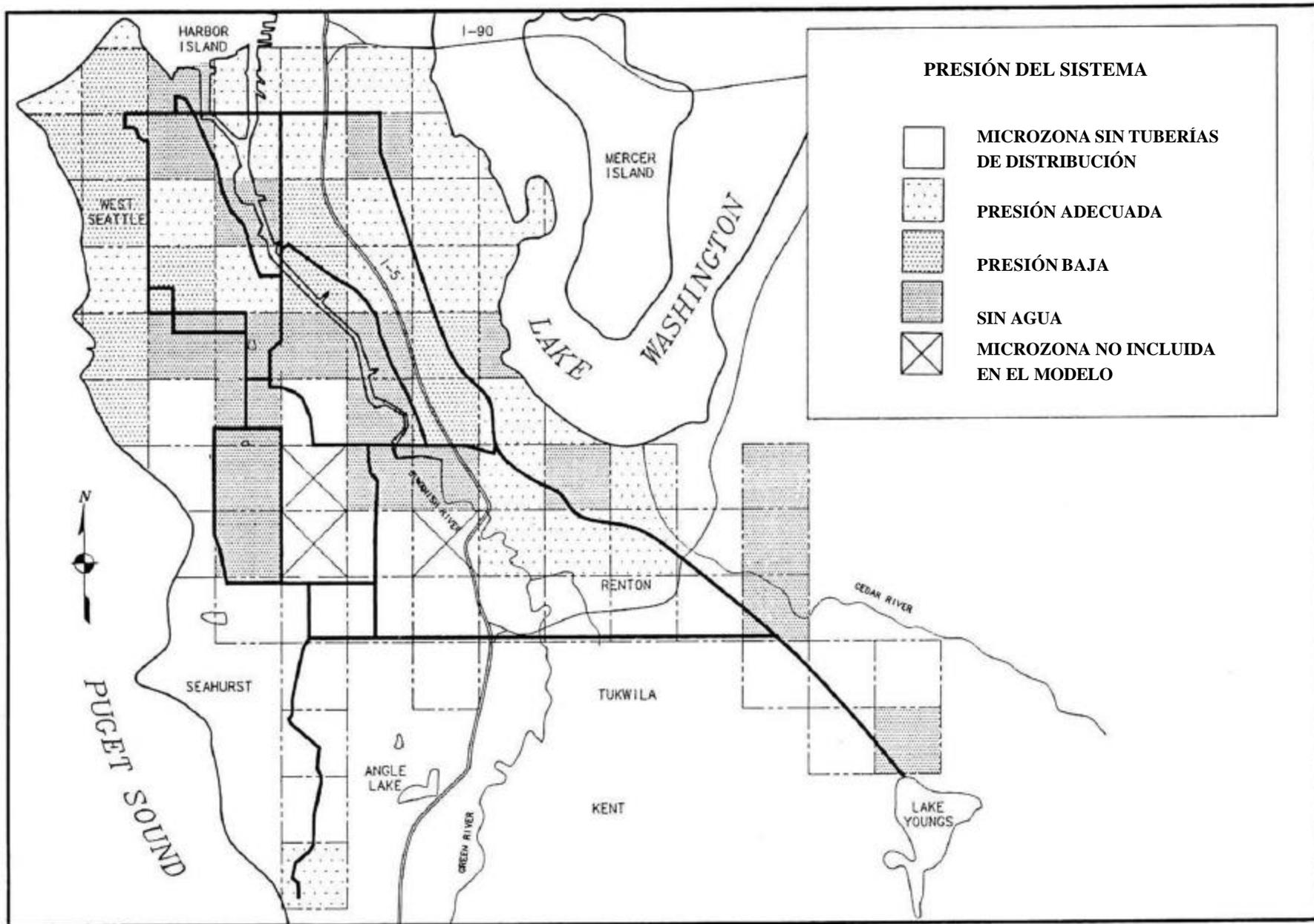


NOTAS:

1. Suposición – 1 rotura = 100 pies de tubería de reemplazo como se usó en el *San Francisco Clean Water Program* (Programa de Agua Limpia de San Francisco).
- A. Antiguo VCP de Santa Cruz – reemplazo necesario
- B. Eguchi – AC, Daño de la licuefacción (nota 1)
- C. Antiguo VCP de Santa Cruz – reemplazo conveniente.

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

Figura 4-4 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.



ir

Fuente: Kennedy/Jenks/Chilton (1990b)

Figura 4.5 Presión del sistema en la mitad sureña de Seattle después de un escenario de sismo de magnitud 7,5, elaborado usando un modelo de estimación de pérdidas.