



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTO SÍSMICO EN SISTEMAS DE
AGUA POTABLE URBANOS**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

ESTEBAN DAVID ALBERTO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

M.I. SERGIO MACUIL ROBLES



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/065/16

Señor
ESTEBAN DAVID ALBERTO HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. SERGIO MACUIL ROBLES, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"IMPACTO SÍSMICO EN SISTEMAS DE AGUA POTABLE URBANOS"

INTRODUCCIÓN

- I. ANTECEDENTES
- II. IMPACTO DE SISMOS RECIENTES EN EL SISTEMA DE AGUA
- III. ANÁLISIS SÍSMICO EN REDES DE AGUA
- IV. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN TUBERÍAS
- V. CASO DE ESTUDIO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 8 de agosto del 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

RESUMEN

Los sistemas de líneas vitales (energía, agua, transporte, y telecomunicaciones) son los sistemas más importantes con los que cuenta una ciudad moderna. Su interrupción después de un desastre natural no sólo provocaría grandes pérdidas económicas, sino que también podría causar pérdidas de vidas humanas. El sistema de agua potable, es uno de los más importantes porque el agua es esencial para los humanos y para sus actividades diarias. Durante un evento sísmico es esencial que este sistema pueda continuar su funcionamiento para limitar la cantidad de daño posterior, por ejemplo, en caso de incendios, y para que la zona afectada pueda volver a condiciones normales.

Este trabajo está enfocado a presentar un marco de referencia del análisis sísmico de la red de agua potable. Se expone el comportamiento de los sistemas de abastecimiento de agua ante distintos terremotos recientes alrededor del mundo y las lecciones aprendidas de dichos eventos. Se introducen los procedimientos para la cuantificación del daño en los componentes de un sistema de abastecimiento esperado por terremotos, con el objetivo de mitigar la vulnerabilidad, especialmente en las tuberías. Se presentan diferentes metodologías para evaluar el comportamiento sísmico de los elementos de un sistema considerando su interconectividad y operación. Para ilustrar algunas de estas metodologías, se presentan ejemplos de análisis en Japón, uno de los países con la cultura sísmica más desarrollada del mundo. Finalmente, se rescatan los fundamentos más importantes y se proporcionan recomendaciones para mejorar la resiliencia de la red de agua en la Ciudad de México.

CONTENIDO

1.	Antecedentes	1
1.1.	Descripción de la infraestructura de abastecimiento de agua potable	2
1.1.1.	Captación.....	2
1.1.2.	Conducción.....	3
1.1.3.	Tratamiento	3
1.1.4.	Regularización.....	3
1.1.5.	Línea de alimentación	3
1.1.6.	Red de distribución.....	3
1.2.	Riesgo sísmico	4
1.2.1.	Peligrosidad sísmica	4
1.2.2.	Vulnerabilidad sísmica	7
1.3.	Importancia de la resiliencia de líneas de vida en caso de desastres naturales	8
1.4.	Objetivo y alcances	9
2.	Impacto de sismos recientes en el sistema de agua	12
2.1.	México 1985.....	13
2.2.	Chile 2010	15
2.3.	Nueva Zelanda 2010 y 2011.....	17
2.3.1.	Terremoto de Canterbury (2010).....	17
2.3.2.	Terremoto de Christchurch (2011)	19
2.4.	Japón 2011	21
3.	Análisis sísmico en redes de agua	24
3.1.	Antecedentes de análisis sísmico en tuberías enterradas.....	25
3.1.1.	Aceleración máxima del suelo	25

3.1.2.	Intensidad modificada de Mercalli	27
3.1.3.	Velocidad máxima del suelo	28
3.2.	Condiciones generales de diseño en tuberías	30
3.2.1.	Peligros sísmicos	32
3.2.2.	Análisis de peligro sísmico	33
3.2.3.	Diseño general de tuberías	34
3.3.	Daños en tuberías	34
3.3.1.	Respuesta sísmica en tuberías	35
3.3.2.	Fallas en tuberías continuas.....	36
3.3.3.	Fallas en tuberías segmentadas.....	39
3.4.	Tipos y niveles de análisis.....	41
3.4.1.	Estudios generales para la vulnerabilidad de sistemas de agua potable	42
3.4.2.	Estudio de escenarios sin análisis de operatividad	43
3.4.3.	Estudio de escenarios con análisis de operatividad.....	44
3.4.4.	Estudios de planes de mitigación y priorización	45
3.4.5.	Estudios de interconexión o interdependencia entre líneas de vida	47
4.	Metodología de análisis y evaluación de riesgo sísmico en tuberías	50
4.1.	Curvas de vulnerabilidad y fragilidad de los componentes del sistema	50
4.1.1.	Funciones de fragilidad	51
4.1.2.	Funciones de vulnerabilidad.....	52
4.1.3.	Consideraciones para curvas de vulnerabilidad en la Ciudad de México	55
4.2.	Estudio de escenarios sin análisis de conectividad entre elementos	56
4.2.1.	Caso de estudio: escenario de daños en San Francisco	58
4.3.	Estudio de escenarios con análisis de conectividad entre elementos	60
4.3.1.	Enfoque de estudios de Kameda et al. sobre conectividad.....	61

4.3.2.	Análisis de fiabilidad del sistema.....	64
5.	Caso de estudio	67
5.1.	Uso de curvas de vulnerabilidad	67
5.2.	Uso de índices de desempeño.....	69
5.3.	Seguridad sísmica de un sistema de distribución de agua en Tokio, Japón	71
6.	Conclusiones	84
	REFERENCIAS	86

DEDICATORIA

A mi mamá, por el amor y el apoyo que me ha dado toda mi vida y ser un ejemplo de que la grandeza se puede alcanzar, pero es algo muy difícil de obtener. Porque si algún día llego a estar en lo más alto será gracias a ella.

A mi hermana Fer, por darle sentido a mi concepto de dedicación.

A mi hermana Yolis, por darme alegría y sabiduría cada instante que comparto con ella.

A toda mi familia que dedicó horas de su tiempo en mi carrera, por siempre demostrarme su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme esta profesión.

A la Facultad de Ingeniería, por albergarme estos años y brindarme conocimientos que no aprenderé en ningún otro lugar.

A M.I. Sergio Macuil Robles, por el tiempo que invirtió en mí y por confiar en mí al permitirme desarrollar la tesis en este tema.

A mi hermana la Dra. Yolanda Alberto Hernández, por ser la cotutora de esta tesis, por todo el apoyo técnico, información, consejos y correcciones objetivas que me dio para la elaboración de este trabajo y por el tiempo que invirtió en mí.

1. ANTECEDENTES

Las líneas de vida o líneas vitales proporcionan los recursos y servicios necesarios para el bienestar económico y la seguridad de comunidades modernas. Frecuentemente están agrupadas en 6 sistemas principales: la red eléctrica, de combustibles líquidos y gaseosos, telecomunicaciones, transporte, aguas residuales y abastecimiento de agua (O'Rourke 2010).

Cuando ocurre un desastre natural, el correcto funcionamiento de las líneas de vida es esencial para la respuesta de emergencia y la restauración después del evento, por lo tanto, las líneas de vida son indispensables dentro de una comunidad resiliente. La Organización de las Naciones Unidas, en su Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (International Strategy for Disaster Reduction, United Nations and ISDR 2004) adoptó el concepto de resiliencia refiriéndose específicamente a los desastres naturales y lo define como:

“La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad de resistir o cambiar de tal forma que se pudiera obtener un nivel aceptable en funcionalidad y estructura. Esto se determina por el grado en el cual, el sistema social, es capaz de reorganizarse y la habilidad de aprendizaje y de adaptación, incluyendo la capacidad de recuperación por un desastre.”

Por otra parte, Miranda (2014) señala que la resiliencia sísmica comprende por un lado el índice del impacto de un terremoto en la sociedad y por el otro, la capacidad de recuperarse del desastre.

Un ejemplo claro de la importancia de las líneas vitales en la resiliencia de las comunidades urbanas fue el terremoto de Kobe en 1995, que cobró más de 6000 vidas y afectó más de 170,000 edificios. Se registraron cerca de 5000 daños a lo largo de 7685 km de tuberías, que interrumpieron el suministro de agua potable provocando que muchos estallidos de incendio no pudieran ser contrarrestados y el fuego se extendiera quemando más áreas (Okimura et al. 1996).

Otro caso fue el huracán Sandy, ya que el corte en la línea de electricidad provocó que las tarjetas de crédito fueran inútiles por lo que los conductores no fueron capaces de recargar sus tanques de combustible en varias estaciones de gasolina (Hurricane Sandy Rebuilding Task Force 2013).

Debido a que la ingeniería de líneas de vida es un campo muy extenso, esta tesis sólo se enfoca en el análisis sísmico de los sistemas de abastecimiento de agua, específicamente los urbanos.

1.1. Descripción de la infraestructura de abastecimiento de agua potable

El sistema de agua potable es una de las líneas de vida esenciales y para ser resiliente debe apoyarse en dos pilares igualmente importantes: 1) métodos eficientes de monitoreo, reparación o reemplazo de estructuras antiguas y 2) herramientas efectivas para modelación del deterioro de la red y para evaluar proactivamente el riesgo de falla de los componentes y desarrollar medidas de prevención.

El sistema de agua potable se compone generalmente de (1) captación, (2) línea de conducción, (3) tratamiento de la potabilización, (4) regularización, (5) línea de alimentación, y (6) red de distribución. Estos componentes se describen brevemente más adelante. Cabe mencionar que un sistema de agua potable es, a su vez, un subsistema del sistema hidráulico urbano. Este escrito se enfocara en los sistemas de agua potable por lo que se excluye el sistema de alcantarillado (César-Valdez 1994).

1.1.1. Captación

Es la parte inicial del sistema hidráulico y consiste en las obras donde se capta el agua para poder abastecer a la población. Las obras pueden ser bocatomas, pozos o galerías filtrantes y en conjunto deben obtener la cantidad de agua necesaria para la comunidad. Para definir cuál será la fuente de captación a emplear, es indispensable conocer el tipo de disponibilidad del agua en la tierra.

1.1.2. Conducción

La denominada “línea de conducción” es la parte del sistema constituida por el conjunto de conductos, obras de arte y accesorios destinados a transportar el agua procedente de la fuente de abastecimiento, desde el lugar de la captación hasta un punto que puede ser un tanque de regularización, un cárcamo para una segunda conducción, o una planta potabilizadora. Si la fuente está muy alejada de la zona de consumo las dificultades que presentan estas obras son mayores.

1.1.3. Tratamiento

Se refiere a todos los procesos físicos, mecánicos y químicos que harán que el agua adquiera las características necesarias para que sea apta para el consumo. Los tres objetivos principales de una planta de potabilización son lograr que el agua sea: segura para consumo humano, estéticamente aceptable y económica.

1.1.4. Regularización

La regularización tiene por objeto transformar el régimen de alimentación de agua de la fuente que generalmente es constante al régimen de demanda que es variable en todos los casos, esto se debe al consumo de la población que va variando en el transcurso del día.

1.1.5. Línea de alimentación

Es el conjunto de tuberías que sirven para conducir el agua desde el tanque de regularización hasta la red de distribución.

1.1.6. Red de distribución

Es el sistema de tuberías que entrega el agua a los propios consumidores. Más de la mitad de la inversión total en un sistema de abastecimiento de agua corresponde a la distribución del agua para consumo humano.

El sistema debe mantener presiones adecuadas para los usos residenciales, comerciales e industriales normales, al igual que ha de proporcionar el abastecimiento requerido para otro tipo de servicios, como la protección contra incendio (CONAGUA 2007).

1.2. Riesgo sísmico

El riesgo sísmico conlleva dos aspectos de acuerdo a Muñoz (1989), el primero es el aspecto científico o investigación, que a su vez se deriva en otros dos tipos de estudios: 1) la probabilidad de un terremoto específico, esto es ampliamente estudiado por los sismólogos, y 2) la probabilidad de que una estructura se comporte de cierta forma bajo un terremoto dado, este es el enfoque del ingeniero. El segundo aspecto del riesgo sísmico es el económico.

Dado que el concepto de riesgo sísmico es muy amplio, la UNESCO en 1980 propone relacionar estos aspectos mediante una expresión mostrada a continuación:

$$\text{Risk(Riesgo)} = \text{Hazard(Peligrosidad)} \times \text{Vulnerability(Vulnerabilidad)} \\ \times \text{value at cost(costo)}$$

Si hacemos una revisión en la literatura del concepto de riesgo sísmico en esta expresión hay algunas variaciones según los autores, pero, hay dos términos predominantes; por un lado, el concepto de Peligrosidad sísmica que tiene que ver con condiciones del sitio, y por el otro el de Vulnerabilidad que está relacionada con el comportamiento sísmico de los elementos.

Con estos conceptos ya podemos hacer una definición, en términos generales, de lo que es riesgo sísmico. (Menoni et al. 1997) definen al riesgo sísmico como la probabilidad de pérdidas, directa o indirectamente provocadas por los terremotos.

1.2.1. Peligrosidad sísmica

Muñoz (1989) define la peligrosidad sísmica como la probabilidad de que el parámetro que mide el movimiento del suelo, al ocurrir un terremoto, exceda un umbral dado dentro de un período de tiempo de interés.

Por lo que para conocer la peligrosidad sísmica de un lugar es necesario conocer los parámetros que describen la severidad del sismo, estos principalmente son la magnitud y la intensidad, que se describen a continuación.

Magnitud

La magnitud de un sismo está relacionada con la energía sísmica liberada en el foco del terremoto. En 1935 Richter propuso este parámetro y se definió originalmente que estuviera dada en función de la amplitud de onda sísmica máxima registrada por el sismógrafo a 100km de distancia del epicentro.

Esta definición se aplicó a terremotos de la costa de California, y no se aclaraba el tipo de onda a medir, solo establecía que se tomara la amplitud máxima del registro. Si la metodología se aplicaba a terremotos de una zona con características similares a las del sur de California no había problema, pero cuando se aplicó a terremotos de distintas zonas se observó que, aunque la energía liberada fuera la misma en un terremoto superficial y en un terremoto profundo, los registros serán distintos (Muñoz 1989).

La definición de Richter fue arbitraria, ya que los movimientos a cualquier distancia considerable del epicentro frecuentemente están fuertemente influidos por la geología local y otros factores (Díaz-Rodríguez 2005).

Actualmente el uso de la magnitud ha evolucionado de esta definición proporcionada por Richter, se fueron resolviendo algunos de los problemas como los ya mencionados y fueron surgiendo otras escalas de magnitudes como magnitudes a partir de ondas internas (P), m_b o magnitud de ondas superficiales, M_s .

Intensidad

La intensidad de un sismo está relacionada con la energía que recibe un punto cualquiera, este parámetro relaciona los posibles efectos en edificios, personas y en el mismo terreno con la energía que se liberó en el foco.

La intensidad se mide en forma cualitativa por la respuesta, o los resultados ocasionado por los daños del sismo, las intensidades bajas dependen de lo que percibió la población, las

medias de la respuesta de las estructuras y finalmente las altas describen lo ocurrido cuando los daños son considerables.

Puede medirse por diversos parámetros, pero estos parámetros son de especial importancia para un ingeniero sísmico: la aceleración y velocidad máxima del terreno (Díaz-Rodríguez 2005).

Aceleración pico del suelo

Es la medida más común que se usa para referirse al movimiento del suelo, también se refieren a ella como aceleración horizontal pico y se obtiene por medio de acelerógrafos, que es un instrumento muy útil para la ingeniería sísmica y que registra la historia de las aceleraciones del terreno, de un lugar determinado de la estructura o, de algún sitio de interés en particular. Este parámetro se ha usado frecuentemente para la descripción del movimiento del suelo por la relación que guarda con las fuerzas inerciales. Los movimientos del suelo con altas aceleraciones pico usualmente, no en general, son más destructivos que los movimientos con aceleraciones pico más bajas. Las aceleraciones pico grandes que duren periodos de tiempo causan daños no severos a algunas estructuras, porque la aceleración pico ocurrió en frecuencias muy altas (Kramer 1996). En general esta medida es muy útil pero como veremos más adelante no es un buen parámetro para relacionar el movimiento del suelo con el daño en las tuberías enterradas.

Velocidad pico del suelo

Es otro parámetro muy útil para la descripción del movimiento del suelo al igual que la aceleración pico del suelo. Pero ya que la velocidad es menos sensible a las altas frecuencias del movimiento del suelo, es más probable que la velocidad pico tenga una mejor precisión al describir la amplitud del movimiento del suelo en frecuencias intermedias que la aceleración pico. Para estructuras o instalaciones que se cargan en este rango de frecuencias intermedias, la velocidad podría dar información más precisa del potencial de daños que la aceleración pico.

1.2.2. Vulnerabilidad sísmica

Una definición cualitativa de la vulnerabilidad sísmica bastante usada, según (Sandi et al. 2007)¹, es: “*La propensión de alguna categoría de elementos en riesgo de sufrir efectos adversos causados por terremotos potenciales*”. Esta definición es muy general, pero a su vez permite entender el concepto de vulnerabilidad por sismos en los cuales se tienen que definir correctamente:

1. Elementos que están en riesgo por sismo
2. Acción sísmica y cuantificación de su severidad
3. Potenciales terremotos y cuantificación de su severidad

Sin embargo, los efectos de los terremotos varían mucho, así que, para lidiar con esa aleatoriedad la vulnerabilidad debe describirse en términos probabilistas.

Cualquier estructura tiene vulnerabilidad sísmica ya que es una propiedad intrínseca independiente de la peligrosidad sísmica de la zona en que se encuentre la estructura en cuestión, por lo que una estructura puede ser muy vulnerable y localizarse en una zona con baja peligrosidad sísmica, y con esto, no estar en riesgo aparentemente. Los elementos que estén en riesgo pueden tener una localización única y bien definida como un edificio, o pueden estar representados como sistemas distribuidos en una región, las líneas vitales son un ejemplo de este último. Finalmente el estudio de la vulnerabilidad sísmica depende del alcance que se tenga como objetivo, ya que puede ser tan exhaustivo como se necesite (Sandi 1986)².

Pero en los sistemas de líneas de vida hay tres características que diferencian y distinguen sus vulnerabilidades hacia los terremotos y otros tipos de desastre naturales de edificaciones individuales y de otras instalaciones locales comunes. Estas son: (1) la interdependencia, (2) la complejidad y (3) la colocación y la distribución geográfica (O'Rourke 1998).

¹ Sandi et al., Seismic vulnerability assessment. Methodological elements and applications to the case of Romania, 2007.

² Sandi H., Vulnerability and Risk Analysis for Individual Structures and for Systems, 1986.

1.3. Importancia de la resiliencia de líneas de vida en caso de desastres naturales

Como se mencionó anteriormente, la resiliencia de una comunidad, en pocas palabras, es la capacidad de dicha comunidad de volver a su estado de operatividad después de ser sometida a un evento con efectos adversos, principalmente desastres naturales. Y como parte de esa capacidad de respuesta se necesita asegurar la infraestructura crítica que provee servicios vitales tal como agua, energía, vías de transporte, telecomunicaciones, etc. Este proceso se tiene que hacer en un tiempo relativamente corto.

Las líneas vitales son sistemas esenciales que proveen a los habitantes y los negocios de una comunidad por toda la ciudad. Sin estos sistemas las comunidades urbanas no serían capaces de proporcionar seguridad ni salud pública.

Las líneas vitales tienen un conjunto de características que las distinguen de los otros sectores y servicios que proporcionados. Estos son las características principales que definen a las líneas vitales:

- Provee un servicios o bienes necesarios que sostienen a negocios, instalaciones del gobierno y hogares
- Las líneas vitales entregan servicios de uso común a la población todos los días, y su interrupción puede generar situaciones que pongan en peligro a la población
- Se componen de redes físicas y electrónicas complejas que se interconectan con múltiples sectores
- La interrupción de una línea de vida tiene la particular característica de que puede poner en riesgo el buen funcionamiento de otra línea de vida

Por ultimo las líneas vitales se agrupan en cuatro grupos principales que tienen que ver con energía, agua, transporte y comunicación, pero según distintas agencias hay otras más (NAC 2014)³.

En la resiliencia enfocada al contexto sísmico (Bruneau et al. 2004) resalta cuatro características fundamentales, que son:

³ National Association of Counties, Improving Lifelines: Protecting Critical Infrastructure for Resilient Counties, 2014.

1. Resistencia: es la capacidad que tienen los sistemas u otros elementos de resistir una demanda sísmica dada sin sufrir mucha degradación o la pérdida de la funcionalidad de dicho elemento.
2. Redundancia: tiene que ver con los elementos dentro de un sistema que pueden ser sustituidos para cumplir con los requisitos de funcionalidad en el caso en que haya interrupciones, degradaciones o pérdida de funcionalidad.
3. Estrategia: se refiere la capacidad de identificación de problemas, establecimiento de prioridades, o uso de recursos cuando haya situaciones que amenacen el sistema, esta característica puede ser vista como algo que se puede usar antes y después del evento sísmico.
4. Rapidez: es la capacidad de resolver las prioridades en lapsos de tiempo cortos con el fin de registrar las menores pérdidas posibles y evitar una latente interrupción del sistema.

Las líneas vitales auxilian de tres formas a la resiliencia de la comunidad ante desastres naturales, estas son: (1) Respuesta de emergencia, (2) Reparación rápida a corto plazo para seguir teniendo las funciones básicas de la comunidad en el aspecto económico y social, (3) Reparación a largo plazo de todas las funciones que se interrumpieron durante el evento (SPUR 2009).

1.4. Objetivo y alcances

El objetivo principal de este trabajo es hacer conciencia, en el campo de la ingeniería mexicana, sobre la importancia de los sistemas de líneas vitales (*lifelines*) en la estructura de una comunidad urbana y con esto enfocarnos hacia un tema que envuelve los sistemas de líneas vitales, que queda fuera de los alcances de esta tesis, que es la resiliencia ante riesgos naturales y otro de los objetivos es hacer una revisión bibliográfica sobre las metodologías que se usan actualmente para evaluar sísmicamente los *lifelines* (únicamente los sistemas de agua potable urbanos), con esto se tienen que describir muchos conceptos necesarios para el estudio de *lifelines* a lo largo de este trabajo.

Se expondrán brevemente las metodologías que se usan actualmente por las agencias de seguridad para la evaluación sísmica de los sistemas de abastecimiento de agua potable, estos estudios se dividen en cinco tipos de niveles, solo se expondrán los primeros tres ampliamente, ya que la complejidad de los últimos dos es poco conveniente tratarlos

extensivamente en este trabajo. También se debe aclarar que el objetivo de este trabajo no es adentrarse en el aspecto geo-sísmico que recae sobre este tipo de estudios sino dar un enfoque global de lo que una agencia de riesgos debe de considerar, dado que este tipo de estudios conlleva todo un trabajo ampliamente multidisciplinario, principalmente del campo de las ingenierías.

En el capítulo de antecedentes se mencionan brevemente los componentes de un sistema de abastecimiento y se responden estos puntos que son las bases de este trabajo, qué es el riesgo sísmico, qué es la resiliencia, qué son los *lifelines* y cómo se relacionan con la resiliencia.

En el capítulo dos se hace una revisión del impacto de los sismos sobre los sistemas urbanos de agua potable, esencialmente los más recientes, Chile (2010), Nueva Zelanda (2010 y 2011), Japón (2011) y se discute también el terremoto que afectó a la Ciudad de México en 1985.

Dentro del tercer capítulo se describirán los primeros métodos que se usaron en el análisis de tuberías ya construidas y como fueron evolucionando desde la década de los 70's hasta la primera década del nuevo milenio, también se discuten algunos criterios de diseño en tuberías para sismos, qué manuales se podrían consultar para la construcción de nuevas redes de abastecimiento y qué es lo que se analiza para el diseño sísmico en los sistemas de abastecimiento de agua potable, no solo en tuberías sino en otros componentes del sistema, sin embargo se discute más el aspecto de la red de tuberías considerando que son la mayor parte e inversión en un sistema de agua.

Se describirán la clasificación de las tuberías, que pueden ser continuas o segmentadas, una clasificación importante que sirve para el análisis sísmico en redes de abastecimiento y está relacionada con el tipo de material de la tubería y el tipo de junteo que se utilizó, y algunos de los principales modos de falla que se tienen después de un terremoto.

También se describen brevemente los niveles en los que se puede dividir los análisis sísmicos; éstos dependerán de la cantidad de información que se tenga del sistema y los tipos de resultados que se desean tener después del análisis, desde los estudios de vulnerabilidad con curvas de fragilidad o vulnerabilidad hasta los análisis más complejos, que tienen que ver con las interconexiones entre las distintas líneas vitales para conocer si hay alguna clase de dependencia que deba tomarse en cuenta.

Dentro de los análisis de escenarios se da un enfoque de la metodología de HAZUS, un manual técnico que sirve para la estimación de pérdidas a causa de los terremotos.

En el capítulo cuatro se describirán las curvas de vulnerabilidad y de fragilidad, y el uso que se les da a cada una de estas, junto con una breve descripción de cómo se obtienen; y se extienden el análisis de estudios de escenarios con y sin conectividad, que ya se describieron brevemente en el capítulo anterior.

El caso de estudio del capítulo cinco es sobre el uso de algunas de las metodologías que se describieron en el capítulo anterior; sin embargo, los casos que se ponen en este capítulo, son idealmente para ejemplificar, en donde se aplican metodologías particulares y se trata de abundar en los cálculos matemáticos.

2. IMPACTO DE SISMOS RECIENTES EN EL SISTEMA DE AGUA

A pesar de los avances que ha tenido la ingeniería, los terremotos, siguen causando daños a la infraestructura. Aunque el nivel de daño varía dependiendo de la ciudad, varios países se han visto afectados, no sólo aquellos en vías de desarrollo como ocurrió en Haití (12 de enero 2010) sino también países con infraestructura sismo-resistente tales como Chile (27 de febrero de 2010), Nueva Zelanda (4 de septiembre de 2010, 22 de febrero 2011), Japón (Kobe, 17 de enero 1995; Tohoku, 11 de marzo 2011; Kumamoto, 14 de abril 2016) entre otros. Los costos de sismos recientes y sus efectos pueden observarse en la **Tabla 1** (Miranda 2014).

Tabla 1. Pérdidas económicas en sismos recientes (Miranda 2014)

Sismo	País	Año	Pérdida (Bn.USD)	Pérdida en porcentaje del Producto Interno Bruto
Hyogo-ken-Nambu	Japón	1995	80	2.8
Northridge	Estados Unidos	1994	40	0.4
Maule	Chile	2010	30	15
Izmit	Turquía	1999	20	10
Loma Prieta	Estados Unidos	1989	8	0.2
Port au Prince	Haití	2010	7.8	120
Guatemala	Guatemala	1976	6.1	18
Michoacán	México	1985	5	3
Managua	Nicaragua	1972	2	40
San Salvador	El Salvador	1986	1.5	31

Una de las preocupaciones más grande que deja la secuela del sismo es el daño que provoca en las líneas vitales, puesto que, aunque su suspensión no es causante directa de pérdidas de vida en general, el impacto puede llegar a ser catastrófico debido a las consecuencias indirectas como la suspensión de labores, pérdidas económicas directas e indirectas etc.

El daño al sistema de agua es uno de los principales problemas durante y después de un terremoto, ya que sin esta línea puede surgir la imposibilidad de uso en caso de desastres

secundarios, como incendios (San Francisco 1906, Tokio 1923, Kobe 1995), hambruna y epidemias.

A continuación, se describen terremotos recientes y como han afectado los sistemas de abastecimiento de agua potable de las ciudades cercanas a dichos eventos, estos terremotos son: Chile (2010), Nueva Zelanda (2010), Nueva Zelanda (2011), Gran Sendai (2011). Se revisa también la afectación en el sistema de agua potable de la zona metropolitana por el terremoto de Michoacán en 1985 porque fue el evento sísmico más devastador que ha vivido la Ciudad de México.

2.1. México 1985

El 19 de septiembre de 1985 a las 7:18 am (hora local) se produjo un terremoto en el estado mexicano de Michoacán, como resultado de la subducción de la placa de cocos a lo largo de la fosa Mesoamericana, debajo de la placa Norteamericana y de la placa del Caribe. El epicentro se localizó a 30km del pueblo de Lázaro Cárdenas y a 400km de la Ciudad de México aproximadamente, a una profundidad de 18km. El terremoto impactó la Ciudad de México a las 7:19 am (hora local). El *National Earthquake Information Service* (NEIR) determinó que la magnitud del terremoto (Ms) fue de 8.1, una de las zonas más afectadas fue la Zona Metropolitana, principalmente por la densidad poblacional de esa época y la cercanía a la zona epicentral del terremoto (Stone et al. 1987).

(Ayala and O'Rourke 1989) redactan en su reporte técnico, que:

El sistema de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México, junto con otras líneas vitales, fueron afectados por el terremoto de forma severa, ocasionando que aproximadamente 5.3 millones de personas se quedaran sin agua dentro de la zona metropolitana, esto fue a causa de daños mayores en las líneas de transmisión y distribución del sistema de agua de la ciudad, en cambio algunos pozos sufrieron daños menores y otras instalaciones del sistema, como represas y plantas de tratamiento, se reportaron sin daños. Los acueductos del sudeste del sistema fueron severamente dañados ocasionando que el flujo de $7.6 \text{ m}^3/\text{s}$ que proporcionaban a la red de distribución de la ciudad se interrumpiera temporalmente.

El plan de respuesta de emergencia se retrasó, a causa de que el edificio de la sede central de la agencia encargada de coordinarlo fue destruido por el terremoto, pese a esto, la respuesta del estado fue relativamente rápida considerando las condiciones de la ciudad. Con ayuda de una evaluación de daños en el sistema unas horas después del terremoto se detectaron que partes de la ciudad quedaron totalmente desabastecidas, e inmediatamente comenzaron a usarse tanques portátiles (proporcionados por el gobierno de los Estados Unidos) y pipas de agua para abastecer esas zonas. Las reparaciones se concentraron en los acueductos dañados y en las líneas de distribución principales del sistema, a finales de octubre los acueductos podían proporcionar 7.1 m³/s, pero las reparaciones en toda la red duraron algunos meses más.

En el Estado de México los daños también, al igual que en la Ciudad de México, fueron grandes en las redes de distribución. Y las autoridades también iniciaron su plan de emergencia después del terremoto, el sistema se restauró a sus condiciones antes del terremoto el 4 de noviembre. Las reparaciones incluyeron, al igual que en la Ciudad de México, daños causados por el terremoto, así como también, daños causados por los usuarios que rompieron tuberías y válvulas para obtener el agua restante que tenían los tubos. Cuando se suspendió la distribución de agua por medio de la red de abastecimiento las autoridades la comenzaron a distribuir por medio de pipas de agua, bolsas selladas de agua purificada y tanques portátiles.

Las técnicas usadas para las reparaciones en los daños por el terremoto básicamente fueron las mismas que se usan para los daños que se tienen comúnmente. Se repararon las uniones de los tubos con refacciones, afortunadamente, las refacciones se fabricaban en la ciudad por lo que había un inventario grande, si las refacciones necesarias no hubieran estado al alcance las reparaciones se hubieran retrasado mucho más. Algunas de las razones del retraso de las reparaciones fueron a causa de que los edificios de las autoridades encargadas se desplomaron así que se tuvieron que buscar sedes alternativas para que las autoridades se establecieran y también se perdieron mapas, registros entre otras cosas.

En las diferentes revisiones a la ciudad después del sismo se determinó que no se presentó licuación inducida por el terremoto, y esto ya se esperaba ya que el suelo de la Ciudad de México consiste principalmente de arcillas que están sobre estratos de rocas volcánicas. No hubo deslizamientos de suelo que afectaran el sistema de agua, pero se detectaron algunos asentamientos provocados por el terremoto.

El acueducto de la Ciudad de México tuvo un total de 60 rupturas de tubos, lo que nos da una tasa de reparación de 1.7 reparaciones/km.

A comparación de los severos daños del sistema de agua en la Zona Metropolitana, los daños en la zona del epicentro fueron más ligeros. En la zona industrial de Lázaro Cárdenas se presentaron daños en pozos, los pozos emergieron del suelo.

2.2. Chile 2010

El día 27 de febrero de 2010 a las 3:34 horas en Santiago, se registró un terremoto de magnitud $M_w=8.8$ en la escala de momento que tuvo una duración aproximada de tres minutos. El epicentro se situó en la costa de la región del Maule, aproximadamente a 8 km al oeste de Curanipe y 115 km al noroeste de Concepción, a una profundidad de 30 km (**Figura 1**).

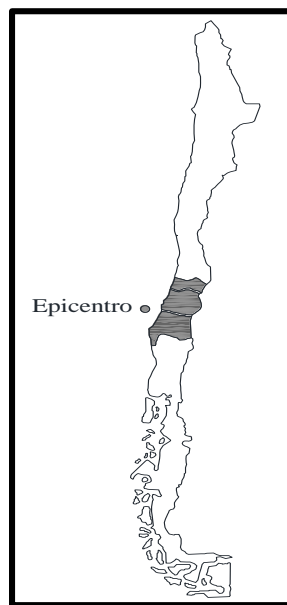


Figura 1. Sismo del Maule 2010, epicentro y zonas más afectadas

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS), el evento ocurrió en la frontera de las placas tectónicas Nazca y Suramericana, debido a una en la interfaz de ambas, con la primera terminando debajo de la segunda. Este terremoto es, hasta ahora, el segundo más fuerte de la historia de Chile, y uno de los cinco más potentes registrados en el mundo. El sismo generó una alerta de tsunami que se extendió a 53 países y un fuerte tsunami posterior al terremoto asoló la costa chilena destruyendo varios pueblos (Barrientos 2010).

Estos dos desastres generaron muchos daños en la comunidad, en las redes de energía, agua, transporte, comunicación, abastecimiento de alimentos entre otros.

De acuerdo a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), hubo roturas en las redes de distribución, daños estructurales en estanques de regulación, y fallas en los sistemas de bombeo e impulsión por la falta de electricidad, que también fue afectado por el terremoto. A ello se sumó la disminución en la disponibilidad de cloro en el país, por los daños producidos en la principal planta productora –Occidental Chemical Chile.

A nivel nacional, 114 sistemas de agua urbanos sufrieron daños, 49 de ellos severos, y 730 sistemas de agua potable rural presentaron algún tipo de falla. En las regiones de Maule y Bío Bío, la distribución sufrió interrupciones, lo que ocasionó que en las primeras horas de ocurrido el evento menos del 15% de la población tuviera acceso a agua potable. En la región de la Araucanía se detectaron daños en 25 obras; en 6 de la región de Valparaíso; en 27 de O'Higgins; en 69 de Bío Bío; y en 1 de la región metropolitana. El abastecimiento tuvo que suplirse con camiones aljibes (pipas), y la población también utilizó pozos y vertientes (OMS 2010).

En Maule, 28 sistemas de agua potable rural sufrieron daños – 8 de ellos colapsaron – lo que para algunas poblaciones significó no contar con el servicio por aproximadamente un mes. En la región del Bío Bío, de los 117 sistemas de agua potable rurales que abastecen a más de 200 mil personas, 6 fueron afectados dejando sin servicio a más de 7 mil habitantes (Fallis 2013).

La mayor cantidad de daños a los sistemas de abastecimiento se encontraron en Talcahuano y Concepción. La ciudad de Concepción, que fue el lugar del epicentro, se fracturaron 1200km de tubos debido al intenso movimiento del suelo y a los desplazamientos laterales, cerca de 3000 tuberías fueron sometidas a daños severos que causaron que no se desempeñaran correctamente y la planta de tratamiento del área de Concepción paro su funcionamiento. Se distribuyó el agua por medio de camiones con tanques y para la tercera semana después del evento se había restaurado el servicio en Concepción para el 85% de la población y para el 98% de las regiones de O'Higgins y Maule (Alberto and de la Llera 2016).

2.3. Nueva Zelanda 2010 y 2011

2.3.1. Terremoto de Canterbury (2010)

El día 4 de septiembre del 2010 a las 4:35 am, un terremoto con magnitud momento de 7.1 sorprendió a Nueva Zelanda con una profundidad focal de alrededor de 10 m y con epicentro localizado a 10 km del sureste del pueblo de Darfield, que está a 40 km del oeste de Christchurch. No se presentaron muertes a causa del terremoto, pero se registraron cerca de 100 personas heridas y varios se hicieron damnificados temporalmente, el costo de las reparaciones estimado fue de US \$3 billones. El terremoto provocó licuación, así como desplazamientos laterales que afectaron incluso a los edificios más nuevos, que se apegaron a códigos de construcción bastante estrictos, cerca de la costa cercana al epicentro(Gledhill et al. 2011).

Las características geotécnicas de este terremoto, así como el del 22 de febrero del posterior año, fueron la licuación y los desplazamientos laterales; en el terremoto del 4 de septiembre de 2010, los suburbios de la parte este de la ciudad de Christchurch fueron mayormente las que presentaron un grado importante de licuación a lo largo del río Avon, y esto se hizo evidente por las manifestaciones de charcos de agua que borbotean en la superficie del suelo (indicador de la presencia de licuación), lo que provocó desplazamientos laterales del

suelo a lo largo del río (Smyrou et al. 2011). La ubicación de los epicentros en cada sismo pueden observarse en la **Figura 2**.

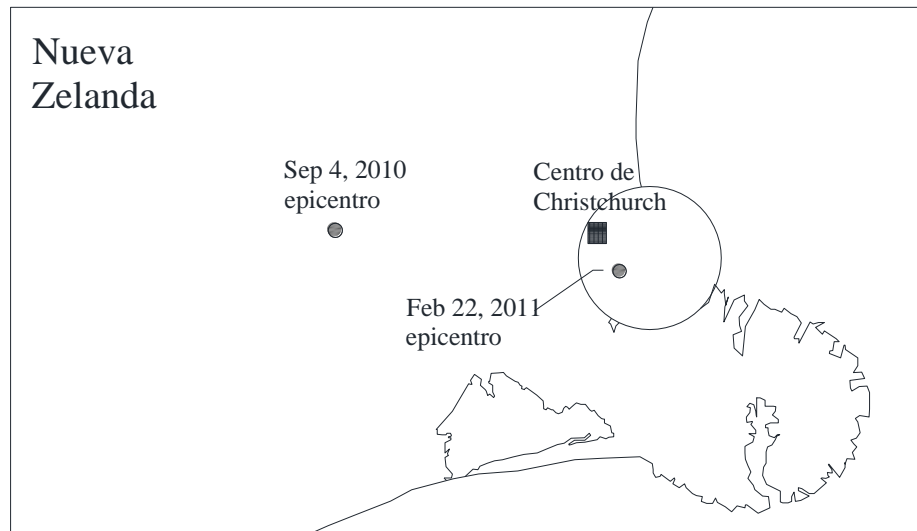


Figura 2. Sismos de Nueva Zelanda y áreas afectadas

En un estudio llevado a cabo en el 2004 para saber qué tan susceptible a la licuación era la ciudad de Christchurch se encontró que aproximadamente 50% de las áreas residenciales eran vulnerables a la licuación y efectivamente, después del terremoto, se vieron afectados entre el 5% y el 10% de edificios en áreas residenciales de Christchurch. Las instalaciones enterradas como tuberías fueron afectadas por la licuación los desplazamientos laterales que se presentaron, dado que las líneas vitales se extienden por áreas grandes el daño fue igualmente extensivo. Las tuberías de agua potable resultaron dañadas lo que indujo la pérdida del abastecimiento en principalmente dos distritos, Christchurch y Waimakariri, fuera de las áreas de licuación se presentaron 280 reparaciones en las redes de agua y se estimó por las autoridades responsables (*Christchurch City Council*) que en las áreas donde sí se presentó licuación se reemplazarían aproximadamente 25km, también se retrasó la reanudación del sistema por culpa de arena licuada que entraba a las tuberías de drenaje con fisuras(Earthquake Engineering Research Institute 2010).

En este mismo reporte [EERI, 2010]⁴ señalan que el distritos de Waimakariri fue uno de los más afectados por licuación y sus efectos, lo que causó problemas en la red de drenaje, puesto que sus profundidades de entierro para tubos van más allá de los 3 m y las excavaciones se suelen complicar. En cuanto a las comunidades del distrito de Christchurch, tales como Brooklands, porque después de dos semanas los servicios de agua potable y drenaje. 25 pozos de visita que se encontraban en la autopista (Lower Styx) que une a Brooklands con Spencerville emergieron, a causa de subsidencia del suelo provocada por la licuación.

Este terremoto fue el más importante de la historia de Nueva Zelanda desde el terremoto de Napier en 1931. A pesar de que no provocó daños tan severos a la ciudad, fue el primer evento en la serie de réplicas de Canterbury que incluyó al terremoto de Christchurch que fue mucho más devastador y causó la pérdida de vidas humanas(Bradley 2012).

2.3.2. Terremoto de Christchurch (2011)

A las 12:51 pm, hora local, del 22 de febrero, 2011, un terremoto de magnitud $M_w = 6.3$ se presentó en la ciudad de Christchurch, Nueva Zelanda. Fue una réplica del terremoto que había ocurrido un año antes, Darfield 4 de septiembre de 2010 de magnitud 7.1 MW. Aunque fue menor en magnitud, el terremoto se generó más cerca de la ciudad así que causó muchos más daños que el anterior, un factor determinante en la magnitud de los daños fue la hora del evento, en horario laboral, cuando las oficinas estaban llenas, provocando 184 muertes confirmadas. El terremoto también ocasiono licuación en grandes áreas de la zona afectada según reporta (Earthquake Engineering Research Institute 2011) también señala que:

Las líneas vitales resultaron severamente dañadas, incluida la red de agua potable. Como ya se mencionó, se presentó licuación en áreas extensas de la ciudad y esta fue la causa

⁴ Earthquake Engineering Research Institute. (2010). *The M w 7.1 Darfield (Canterbury), New Zealand earthquake of September 4, 2010.*

predominante de los daños en tuberías de agua potable. Los asentamientos diferenciales y los desplazamientos laterales interrumpieron la red de agua potable (la mayoría hecha de PVC y asbesto-cemento) de la ciudad. La flotación de los sótanos de concreto en estaciones de bombeo de agua potable, afectados por asentamientos inducidos por licuación, causó que las tuberías se rompieran en las conexiones con dichos sótanos. La red de distribución de agua en Lyttelton y Harwood fue remplazada por tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) después del terremoto de septiembre (Darfield) y no se presentó ni un solo daño en ese sistema, aun cuando Lyttelton tuvo algunos de los movimientos más fuertes registrados del suelo en el terremoto. También se observó un exceso de licuación en Harwood. Incluyendo desplazamientos laterales y de 1 a 2 m de asentamientos.

Usualmente los tubos de las redes de abastecimiento de agua se entierran a bajas profundidades y están presurizados, y con los problemas severos de licuación que provocó el terremoto, se observó que la mayoría de las reparaciones de los tubos se encontraban en las zonas donde se había presentado licuación. De los 1676 km de longitud de tubos se encontró que aproximadamente 76 km estaban dañados y fuera de servicio. El 80% de las tuberías afectadas estaban en las zonas donde la severidad de la licuación era media o baja, a pesar de las diversas rupturas por la red de agua potable se restauró el sistema rápidamente días después del terremoto. Algunas de las formas de fallas de las tuberías fueron grietas y fallas en las juntas, también la pérdida de estaciones de bombeo provocó que el sistema trabajara de forma ineficiente, igualmente las uniones entre las tuberías y las estructuras de concreto afectaron las juntas por asentamientos inducidos por la licuación, finalmente las tuberías de drenaje fueron más vulnerables por la licuación puesto que estas generalmente se entierran a profundidades mayores de los 3 m y cuentan con tubos presurizados y con tubos funcionando a gravedad (Cubrinovski et al. 2011).

2.4. Japón 2011

A las 14:46 JST del 11 de marzo 2011 un terremoto de magnitud momento $M_w=9$ se produjo en el noroeste del Océano Pacífico a una profundidad relativamente superficial de 32 km, con epicentro aproximadamente a 72 km al este de la Península de Oshika en la región de Tohoku (**Figura 3**).

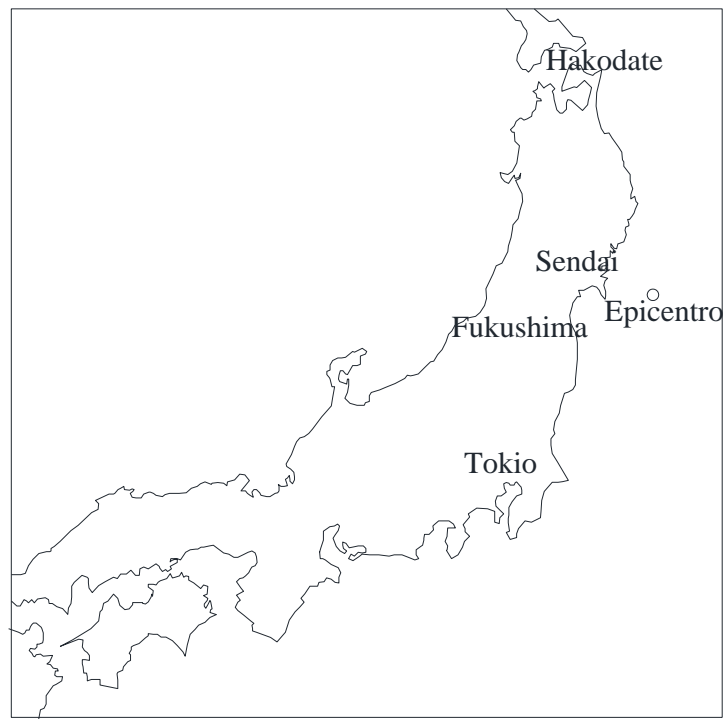


Figura 3. Sismo de Tohoku, 2011, epicentro y prefecturas más afectadas

Este fue el terremoto más fuerte y destructivo que Japón ha experimentado desde que el país comenzó a tomar mediciones y la JMA lo nombró “The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”. Este terremoto también causó un tsunami, que inundó una gran parte de la región de Tohoku. Se reportaron más tsunamis en Soma en la prefectura de Fukushima de 9.3m o incluso más grandes y también en Ayukawa en la prefectura de Miyagi, con alturas de 8.6m y más grandes. Las muertes que se reportaron fueron de 15 703 personas, con 4647 desaparecidos, 5314 heridos y 130 927 japoneses desplazados

durante el terremoto y el subsecuente tsunami, que fue causante de la mayoría de pérdidas de vida(Miyajima 2013).

Mimura et al. (2011) señalan algunas características y daños del terremoto que nos dan una idea de porque “*El gran terremoto y tsunami del este de Japón*”⁵ fue tan destructivo como ningún otro:

1. Fue el más grande registrado en Japón, registró una aceleración del suelo máxima de 30 m/s^2 en la ciudad de Kurihara.
2. Tuvo muchas réplicas, 420 de ellas sobrepasaron la magnitud momento de M5.
3. Después del terremoto hubo 345 incendios en 12 prefecturas, incluyendo algunos que fueron provocados por el tsunami.
4. La infraestructura de líneas de vida se vio afectada, pero en algunas áreas se restauraron rápidamente, pero las zonas del noreste de Japón fueron las más severamente dañadas fueron las que más tardaron en repararse.
5. Los costos de los daños rondaron entre los 17 y los 24 trillones de yenes.

En lo referente al abastecimiento de agua, el número pico de ciudades, pueblos y aldeas a las cuales se les suspendió el agua fue 187, y el suministro de agua se suspendió a aproximadamente 2.3 millones de hogares. En la prefectura de Miyagi hubo daños en los tubos de distribución de agua en varios kilómetros aguas debajo de las plantas de purificación en las regiones de Sennan, Senen, Ishinomaki y Osaki. También hubo fugas en tuberías y separaciones en juntas de tuberías de distribución de hierro dúctil. Según con los datos de la región de Tohoku de las ciudades de Kurihara, Osaki, Tome y del pueblo de Wakuya, el daño en tuberías comienza a ocurrir cuando la intensidad sísmica JMA alcanza 5+, y el daño incrementa rápidamente a los 6+(Kazama and Noda 2012).

Definiendo la tasa de daño como la relación de casos de falla en los tubos por kilómetro de tubería, se concluyó que la tasa de daño del sistema de abastecimiento de tuberías en suelo de relleno en la ciudad de Urayasu fue de 1.60 casos/km. Este valor es similar a la tasa registrada de tuberías enterradas en los sitios de Kobe, Ashiya y Nishinomiya en el

⁵ El gobierno japonés usualmente conoce al desastre del 2011 como “The Great East Japan Earthquake Disaster”

terremoto de Kobe 1995. Y no se encontró daños en juntas resistentes a terremotos de tuberías de hierro dúctil (Miyajima 2013).

En los daños a tuberías se observaron fallas típicas tales como fugas en las juntas de expansión, fugas en juntas puestas antes de 1965 con mala calidad de soldado, fugas en juntas de expansión entre estructuras de concreto y el suelo circundante que fueron sometidos a desplazamientos, problemas por el diseño constructivo que usaba el reglamento anterior del *Japanese Water Works Association*. Después de revisar los reportes de daños de las autoridades se determinó que el tiempo necesario para restaurar los sistemas a como estaban antes del evento, serian entre dos y tres años. Sin embargo, gracias a las observaciones del terremoto de Kobe de 1995 se tomaron algunas medidas, por ejemplo, en la zona de Sendai había 45 tanques de agua enterrados para proporcionar agua en caso de la interrupción del sistema de abastecimiento y después del desastre estos tanques cumplieron con su objetivo, salvo aquellos localizados en zonas inundadas(Alberto and de la Llera 2016).

3. ANÁLISIS SÍSMICO EN REDES DE AGUA

En muchas partes del mundo existe un riesgo potencial de daño por sismo sobre los sistemas de agua por desastres naturales. Ante esto, en (O'Rourke and Ayala 1993) se menciona que hay dos tipos de acciones que las autoridades encargadas del agua pueden tomar como parte de un desastre o plan de respuesta de emergencia, con el fin de minimizar efectos sísmicos potenciales sobre los sistemas existentes. Estos son, mitigación física de daño y mitigación de impacto. La primera corresponde al fortalecimiento y equipamiento de varios componentes del sistema, con el objetivo de reducir o erradicar potenciales daños sísmicos. Para tuberías enterradas, la mitigación física de daño es, aparentemente, justificable económicamente sólo para porciones aisladas de los sistemas de transmisión o distribución donde los daños sísmicos potenciales son claramente identificables, por ejemplo, en remplazar o cambiar algunas líneas que atraviesen una porción aislada de suelo potencialmente licuable, esta inversión sí es justificable. Sin embargo, para riesgo de propagación de onda sísmica, que afecta en mayor o menor grado a los sistemas de transmisión y distribución completos, la mitigación física de daño probablemente es económicamente injustificable, así que probablemente haya una necesidad de mitigación de impacto. La mitigación de impacto incluye, entre otras cosas, planes para la distribución temporal de agua y la reparación rápida del sistema. Para ambos casos las autoridades responsables necesitan, entre otras cosas, un método para estimar la cantidad esperada de daño sísmico.

En este capítulo se hará una revisión de los análisis que se usaron décadas atrás para analizar las redes de tubos antes eventos sísmicos y de cómo fueron evolucionando. También se hablará de las condiciones generales para el diseño en tuberías, así como también, de los daños que se presentan frecuentemente en las tuberías y finalmente revisaremos los niveles en que se han dividido los análisis sísmicos para su manejo correcto.

3.1. Antecedentes de análisis sísmico en tuberías enterradas

Así como ya lo mencionó O'Rourke, para la reparación del sistema, se requiere una estimación de daño sísmico, es decir, el número de daños (expresados usualmente en daños/km) que se esperan en la red de agua potable (tuberías enterradas principalmente) para un evento sísmico dado y así tener un inventario suficiente de refacciones y de equipo para llevar a cabo las reparaciones en el sistema, siempre priorizando los daños.

Para esto es necesario utilizar curvas que relacionen las reparaciones con distintas intensidades sísmicas, las primeras se basaron en los datos observados en terremotos. Por eso se revisará cómo es que han ido evolucionando estas relaciones de daño, que son fundamentales para la evaluación sísmica de una red de abastecimiento de agua potable.

Estas curvas relacionan una tasa de daño (también llamada “tasa de reparación”) con distintas intensidades sísmicas, pero la intensidad sísmica se puede medir con diversos parámetros de movimiento del suelo obtenidos en el instante del terremoto, y es así como distintos investigadores han creado distintas curvas de vulnerabilidad para tuberías enterradas que se basan, principalmente en los daños que se reportaron en terremotos específicos. Los parámetros que han sido comúnmente usados por los investigadores son la aceleración pico del suelo (denotada por PGA, por su significado en inglés), la intensidad modificada de Mercalli (MMI), desplazamiento pico del suelo (PGD) y la velocidad pico del suelo (PGV) que desde hace más de dos décadas ha sido el parámetro sísmico más utilizado (Pineda and Najafi 2010).

3.1.1. Aceleración máxima del suelo

A mediados de la década de los 70's (Katayama et al. 1975) fueron algunos de los primeros investigadores en preocuparse por la mitigación sísmica en los sistemas de agua potable, es por eso que desarrollaron relaciones empíricas de daños que ayudaran a predecir el número de daños que se tendría en una red de tuberías a causa de un terremoto, en función de la intensidad sísmica, en este caso el parámetro que ellos usaron para la medición del movimiento del suelo fue PGA, sin embargo ellos conocían sus limitaciones. Las tuberías pueden estar unidas con distintos tipos de juntas, el material de los tubos también es muy diverso, los tipos de falla que se encontraron en los terremotos que revisaron fueron varias y, sobre todo, las condiciones del terreno también influyen en el nivel de daño que tendrá la red.

En su reporte [Katayama et al. 1975] hacen una revisión en 6 terremotos en el que documentan principalmente, el número de daños que se detectaron en la red de tubos, en las juntas, en los hidrantes y otros accesorios (principalmente válvulas) por culpa del terremoto, los distintos diámetros de los tubos que componen la red, longitud total de la red y en algunos se reportaron el fenómeno de licuación. Los terremotos que revisaron fueron los terremotos de Japón (Kanto 1923, Fukui 1948, Niigata 1964, Tokachi-oki 1968), Estados Unidos (San Fernando 1971) y Nicaragua (Managua 1972), observaron que los daños en tubos con diámetros pequeños eran mayores que en tubos con diámetros más grandes, de ahí infirieron que los tubos con diámetros pequeños registrarán más daños que los otros. En cuanto al parámetro sísmico para correlacionar con los daños, usaron la PGA porque tenían esas mediciones de los sismos y cuando hicieron la correlación les pareció bastante acertada con los datos. La **Figura 4** es la gráfica de Katayama realizada por O'Rourke en escala logarítmica.

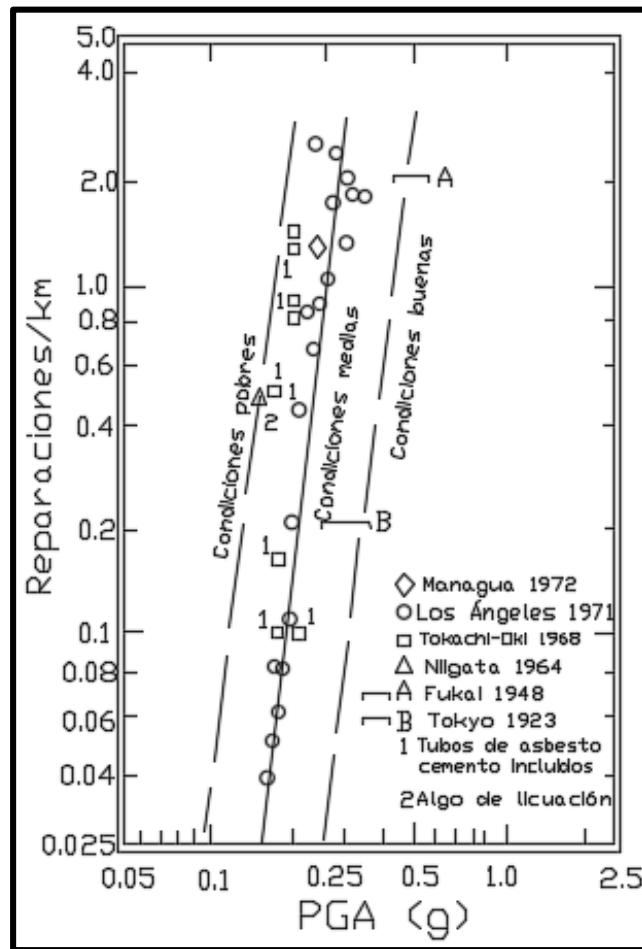


Figura 4. Aceleración pico vs reparaciones/km

3.1.2. Intensidad modificada de Mercalli

(O'Rourke and Ayala 1993) señalan que posiblemente Eguchi fue el primero en separar los daños por propagación de onda sísmica y por deformación permanente del suelo, algo que, como ya se señaló, no realizó Katayama, pero a comparación de Katayama, Eguchi no correlaciono los daños con la aceleración máxima del suelo sino con la intensidad modificada de Mercalli e incluyó curvas de fragilidad para varios tipos de materiales como tubos de acero con juntas soldadas con gas, tubos de asbesto-cemento, tubos de acero con juntas soldadas con arcos, PVC, entre otros (fueron seis tipos de materiales en total) con datos de varios terremotos de Estados Unidos. También (Pineda and Najafi) sostienen que una de las conclusiones de Eguchi fue que las tuberías de hierro dúctil reportaron 10 veces menos reparaciones por km que las peores tuberías de los terremotos que revisó y, por otro lado, las tuberías de asbestos-cemento fueron algunas de las más vulnerables durante eventos sísmicos.

En la **Figura 5** podemos observar las curvas de tubos para materiales de AJSA- acero con juntas soldadas con arco, HID-hierro dúctil, POLY-polietileno, REH-revestido de hierro, PVC-pvc, CONC-concreto, AJSG-acero con juntas soldadas con gas.

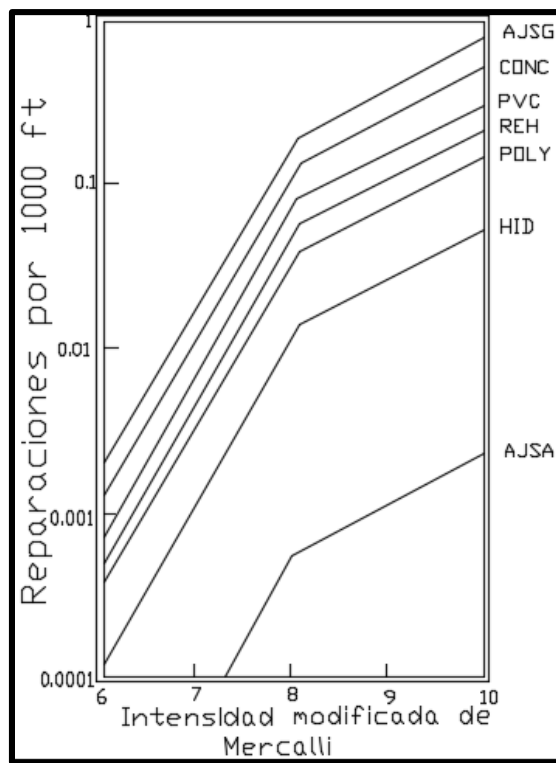


Figura 5. Relación de daño con MMI para propagación de onda

Podemos decir que una de las acciones relevantes de Eguchi fue la de agrupar la información de los datos de daños en tuberías a causa de terremotos estadounidenses, pero algo de lo que nos podemos percatar es que incluyó los diámetros en tuberías, algo que es importante ya que como señaló Katayama, los tubos con diámetros más pequeños son más vulnerables sísmicamente.

3.1.3. Velocidad máxima del suelo

Como ya se habían usado la aceleración máxima del suelo y la intensidad modificada de Mercalli para relacionarse con el daño en tuberías se comenzó a observar que dependiendo del parámetro de movimiento del suelo utilizado para medir la intensidad del sismo se obtenían diferentes correlaciones, es por eso que (Barenberg 1988) busca ver como se relacionan estos parámetros con la intensidad del sismo en diferentes regiones afectadas por los movimientos sísmicos debido a que la aceleración pico no es un parámetro tan confiable, y por facilidad separó los fenómenos que provocan daños a la tubería en desplazamiento permanente en el suelo y las deformaciones provocadas por la velocidad de onda.

Barenberg correlacionó primero la velocidad pico del suelo con los daños en tuberías, para ello usó tres terremotos estudiados previamente por O'Rourke en 1985, con tubos revestidos de hierro y con diámetros entre 75 y 1,050 mm y el terremoto de San Fernando (1971) con datos de Isenberg en 1978, con tubos de acero soldados y tubos revestidos de hierro con diámetros de 152 mm o mayores. Con los acelerogramas se calcularon varias velocidades máximas del suelo y con ello un promedio, y a partir de ahí la velocidad máxima de la partícula. También obtuvo la deformación máxima de los puntos de O'Rourke que es la relación entre la velocidad máxima del suelo y la velocidad de propagación de onda, esta última se obtuvo por la correlación hecha por O'Rourke y Castro en 1981 del terremoto de San Fernando. Las dos curvas de Barenberg, tanto la de velocidad máxima como la de deformación máxima tuvieron buenas aproximaciones.

Barenberg también hizo una correlación de daños con el desplazamiento permanente, en este caso trabajó específicamente en el área afectada por el terremoto de San Fernando con datos proporcionados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que eran, los desplazamientos permanentes verticales, el valle de San Fernando con una malla en donde cada retícula tenía un área de 1mi^2 y tenía las ubicaciones donde se ubicaban los daños en la red de abastecimiento que estaba hecha principalmente de tubos revestidos de hierro y tubos de acero, con juntas soldadas. Los daños en tuberías se correlacionaron bien con el desplazamiento permanente en suelo.

Barenberg observó que la velocidad máxima y los desplazamientos permanentes son buenos parámetros para correlacionar con los daños en tuberías, pero las curvas que el realizó tendrán más precisión cuando se apliquen a redes de tuberías que tengan materiales, diámetros y juntas parecidos a los datos que fueron usados para crear dichas curvas, y sobre todo que tengan un rango parecido de condiciones geológicas, en caso contrario la aproximación será errónea.

O'Rourke and Ayala (1993) añadieron siete puntos más a la curva de Barenberg de dos terremotos mexicanos y uno de Estados Unidos [Coalinga (1983), Michoacán (1985) y Tláhuac (1989)]. Ellos hicieron una distinción en los tipos de materiales de tuberías y agregaron otros como asbesto-cemento o concreto. Algunos de los puntos añadidos por Ayala y O'Rourke tuvieron una tasa de daño muy elevada principalmente porque eran más vulnerables al sitio como las que presentaron problemas a causa de las condiciones del subsuelo en la Ciudad de México en el terremoto de Michoacán (1985).

En la **Figura 6** se observa la curva que graficaron O'Rourke y Ayala junto con la curva realizada por Barenberg las dos son de velocidad máxima contra tasa de daño y en la **Tabla 2** se indica a que terremoto pertenece cada punto y el material con notaciones que se explican ahora REH-revestido de hierro, CONC-concreto, CCP-cilindro de concreto pretensado y AC-asbesto cemento.

Tabla 2. Notación de terremotos

Punto	Terremoto	Material
A	San Fernando, 1971	REH
B	Santa Rosa, 1969	REH
C	San Fernando, 1971	REH
D	Puget sound, 1965	REH
E	Coalinga, 1983	REH
F	Michoacan, 1985	CONC, REH
G	Michoacan, 1986	CONC, REH
H	Michoacan, 1987	CONC, REH
I	Michoacan, 1988	CCP
J	Tláhuac, 1989	CCP
K	Coalinga, 1983	AC

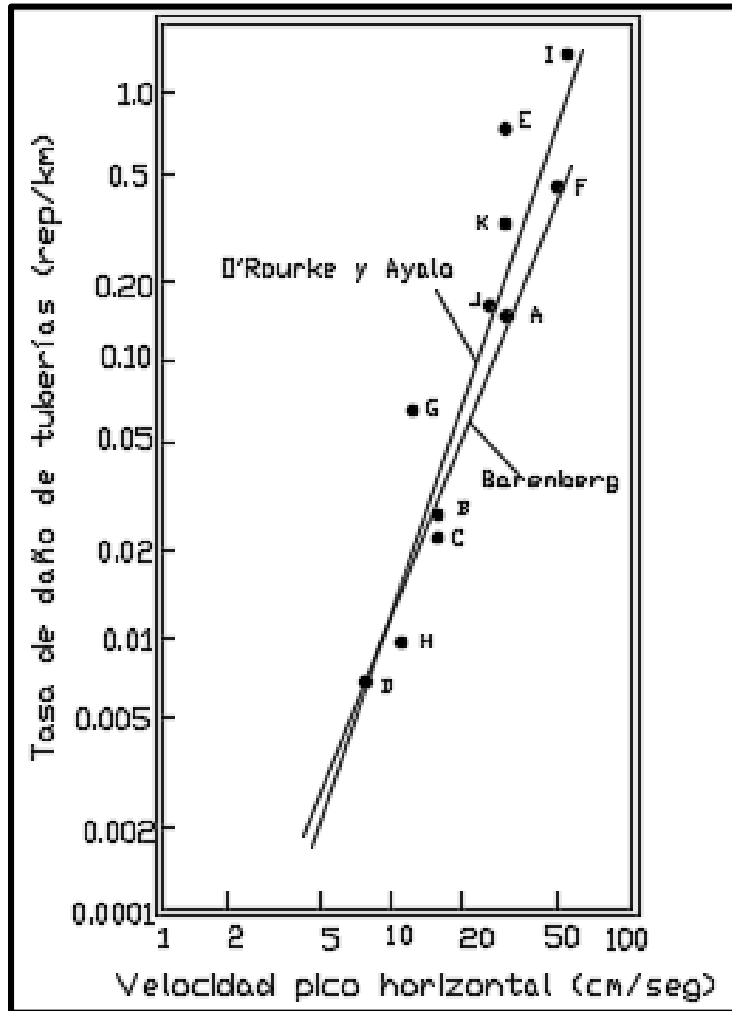


Figura 6. Curvas para propagación de onda sísmica

3.2. Condiciones generales de diseño en tuberías

Dentro de los factores que intervienen en el daño sísmico a tuberías, Javanbarg (2008) hace tres clasificaciones que engloban a estos factores y se describen a continuación:

- ❖ Condiciones de sitio

Desde las primeras investigaciones hechas sobre los daños sísmicos en tuberías enterradas, se llegó a la conclusión de que las condiciones del sitio y el tipo de suelo en el que se entierren las tuberías tienen gran influencia sobre los daños que recibirán en un evento sísmico. Un factor importante es el impacto que tiene el hombre sobre la evolución del suelo en cuanto a las condiciones de resistencia o deformabilidad.

❖ Tuberías

En los factores que intervienen en el daño sísmico entran el material de la tubería, su diámetro, el tipo de junta, e incluso la edad, aunque bien este último es más relevante en análisis estáticos que se enfocan a su funcionamiento normal.

Los tipos de materiales usualmente se dividen en frágiles y dúctiles, donde los primeros suelen sufrir más daños por kilómetro y son materiales como el concreto o el asbesto-cemento y los segundos son materiales como el hierro dúctil o PVC, entre otros.

Las juntas se clasifican en continuas o segmentadas; las primeras son rígidas y las otras tienen conexiones que pueden considerarse flexibles. Se ha observado en terremotos anteriores que dependiendo de si la junta es segmentada o continua tendrá distintos modos de falla ante el evento sísmico, por ejemplo, las juntas de las tuberías segmentadas suelen soltarse o incluso separarse completamente.

En cuanto al tamaño de diámetro, se ha visto en investigaciones anteriores (e.g., Guzmán 2011; Hamada 1992; Kimishima et al. 2011) que los diámetros más pequeños de la red sufren más daños por kilómetro que los más grandes. Javanbarg (2008) considera que posiblemente se deba a un control de calidad deficiente durante la construcción.

❖ Peligro sísmico

El peligro sísmico en tuberías se enfoca en las deformaciones permanentes y transitorias del suelo causadas por la propagación de onda sísmica.

La propagación de onda suele generar menos daños a las tuberías como elementos, pero frecuentemente se propagan por áreas muy extensas lo que hace que básicamente toda la red esté expuesta y el daño se multiplique.

Por otro lado, están las deformaciones permanentes del suelo (PGD) causadas por fenómenos como los desplazamientos laterales, la licuación, asentamientos, etc. Las deformaciones permanentes causadas por eventos sísmicos suelen ocurrir en áreas más

pequeñas, no obstante, los daños que provocan sobre esa porción de tubería son mucho más severos.

Dado que estos tres aspectos son determinantes en la tasa de daños que tendrá una red de tuberías también son importantes en las condiciones de diseño de redes de tuberías nuevas.

Hay que destacar que antes del 2005 había pocas guías, estándares o códigos que hablaran específicamente de un criterio de diseño sísmico para sistemas de tuberías de agua potable, por lo que la American Lifelines Alliance se dio a la tarea de hacer una guía para el diseño sísmico de tuberías de agua potable y algunos de sus objetivos fueron proporcionar estrategias de diseño para los diferentes desafíos que se le puedan presentar al diseñador y ser lo más exhaustivo posible (ALA 2005).

A continuación, se describirán los peligros sísmicos, el análisis de peligro sísmico y el diseño general de tuberías, que son señalados en el reporte de Seismic Guidelines for Water Pipelines (2005), realizado por la American Lifelines Alliance (ALA). Se busca proporcionar de manera práctica los términos más relevantes ya que el diseño de tuberías como tal queda fuera de los alcances de este trabajo. Para el lector interesado en este tema se recomiendan otras fuentes (e.g., Higashide et al. 2012; O'Rourke and Ayala 1993; Yoo et al. 2016)

3.2.1. Peligros sísmicos

La amenaza de deformaciones permanentes causadas por licuación, desplazamientos laterales o deformaciones, es el peligro que provoca más daño en las tuberías, a pesar de que siempre está localizado en áreas específicas y no pueden dañar toda la red.

La licuación es un fenómeno que ocurre en suelos granulares saturados y se caracteriza por un incremento en la presión de poro que reduce a cero el esfuerzo efectivo del suelo y por lo tanto, su resistencia, haciendo que el suelo se comporte como un fluido. Si esta condición prevalece por un tiempo largo causa deformaciones permanentes del suelo como desplazamientos laterales o asentamientos.

Otro peligro para las tuberías son los asentamientos diferenciales que provocan fallas en la tubería, por ejemplo, cuando una tubería entra a un tanque los asentamientos en la zona de la tubería pueden causar la desconexión con el tanque. Los asentamientos provocados por licuación tienden a ser mayores que los que ocurren en suelos cohesivos.

Los desplazamientos laterales pueden ser inducidos por el fenómeno de la licuación, algunas veces los estratos de suelo que potencialmente pueden licuarse se encuentran a pocos metros de profundidad de la superficie y si hay cortes laterales con pendientes significativas en ese sitio pueden ocasionar que los estratos superiores se deslicen y provoquen grandes daños a las tuberías. Los desplazamientos laterales también pueden ser asentamientos inducidos por licuación que les dan pendientes importantes a algunos estratos del suelo ocasionando que se deslice el suelo.

En referencia a los peligros por deformaciones transitorias, la propagación de ondas sísmicas, a diferencia de las deformaciones permanentes, ocurre en todos los terremotos sea cual sea la causa, y esto afecta a toda la red en mayor o menor medida. Otro potencial peligro de la propagación de ondas es su posible amplificación debido a las condiciones locales del suelo. Cuando las ondas sísmicas son significativas la tubería intenta deslizarse, por el contrario, cuando son pequeñas los tubos intentan seguir el movimiento del suelo; en cualquiera de los dos casos se producen deformaciones que pueden provocar fracturas en la tubería u otros daños.

3.2.2. *Análisis de peligro sísmico*

El análisis de peligro sísmico puede realizarse utilizando dos enfoques, el probabilista llamado *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) y el determinista llamado *deterministic seismic hazard analysis* (DSHA). En el primer análisis se generan un conjunto de terremotos con sus períodos de retorno y se obtienen los parámetros sísmicos para evaluar tubos por separado. El segundo sirve para evaluar redes de tuberías muy grandes para poder obtener las distintas mediciones de un mismo parámetro a lo largo del sistema de agua potable. El enfoque determinista sirve para conocer cuántos daños se tendrán en la red con un escenario de terremoto y el enfoque probabilista define cuál es la

probabilidad de que un tubo tenga cierto número de daños cuando se alcance o se exceda un valor dado de un parámetro de movimiento del suelo.

3.2.3. Diseño general de tuberías

ALA describe brevemente algunos métodos para el cálculo de presiones internas, la carga vertical de suelo que se tiene por el efecto del entierro, la posible carga viva en la superficie, la deformación del tubo o la tendencia a hacerse un ovalo a causa de las cargas que se le imprimen principalmente por el material para enterrar la tubería, la fatiga y los flujos transitorios.

3.3. Daños en tuberías

Con el objetivo de mejorar las normas, guías, códigos de construcción etc., para infraestructuras afectadas por terremotos es necesario recolectar toda la información posible tanto de los parámetros para caracterizar el terremoto, como las distintas respuestas que tiene la infraestructura ante un terremoto para que sirvan para futuras evaluaciones de vulnerabilidad sísmica (Manshoori 2012).

En sismos recientes se ha observado que las tuberías con juntas rígidas construidas con códigos modernos han tenido un mejor comportamiento en sismos recientes. Algunos de los modos de falla que se han observado dependen del tipo de tubería, por ejemplo, se ha observado que las tuberías segmentadas usualmente fallan a causa de sus conexiones (Zohra et al. 2012).

En este trabajo se mencionarán algunos de los modos de fallas en tuberías continuas y segmentadas que se han visto en los terremotos pasados basados principalmente en el reporte técnico de O'Rourke and Liu (1999) y también se discutirá sobre la respuesta sísmica de las tuberías sometidas a la onda sísmica. En esta revisión de modos de falla se ven únicamente las fallas a causa de sismo y no se mencionan fallas por corrosión del suelo o fallas por edad de la tubería.

3.3.1. Respuesta sísmica en tuberías ante propagación de ondas de superficiales

Como señalaron Ayala y O'Rourke (1989), a causa del terremoto de Michoacán 1985, la red de tuberías de agua potable de la Ciudad de México tuvo grandes daños a causa de la propagación de ondas, es por esto que durante años se ha estado trabajando en modelos analíticos que describen el comportamiento sísmico de las tuberías considerando este factor.

Como se discutirá a continuación uno de los aspectos más importantes del estudio de la respuesta sísmica de las tuberías por onda sísmica, es la respuesta ante la propagación de onda superficial.

Las ondas superficiales se generan por la reflexión y refracción de las ondas de cuerpo, y viajan a través de la superficie. Los dos tipos de ondas superficiales son las ondas Love (L) y las Rayleigh (R). Las ondas-L generan deformaciones flexionantes en las tuberías, mientras que las ondas-R generan deformaciones axiales a lo largo de las tuberías que se alternan entre fuerzas de tensión y de compresión. Las ondas-L generalmente provocan deformaciones que son 2 o 3 órdenes de magnitud menores que las deformaciones axiales que provocan las ondas-R. El terremoto de Michoacán 1985 provocó ondas-R en la Ciudad de México, debido a que esta zona es una cuenca con depósitos sedimentarios con valores pequeños de velocidad de onda de cortante que amplifican el movimiento del suelo significativamente (Shi et al. 2008).

Para conocer la respuesta de la tubería se recurren a diferentes modelos, algunos de ellos son:

- Modelo de tubería elástica
- Modelo de tubería inelástica
- Método del elemento finito

Uno de los más usados es el método del elemento finito (Shi et al. 2008), que permite la consideración explícita de las características no-lineales en la interacción suelo-tubería, así como también, la relación no-lineal del esfuerzo de tensión para el material del tubo. Este modelo permite estimar el desplazamiento relativo de juntas en un escenario sísmico dado.

3.3.2. Fallas en tuberías continuas

3.3.2.1. Falla por tensión

Una ruptura por tensión es una de las tres fallas principales en las tuberías continuas que se puede presentar en tuberías enterradas a una profundidad de 1 m o más. Algunos tubos de acero con juntas soldadas por arco a tope cuando se ponen a trabajar en tensión tienen la capacidad de distribuir grandes deformaciones hasta alcanzar la fluencia antes de fallar. Cuando una tubería es paralela a un desplazamiento lateral, una parte de la tubería es deformada por compresión y la otra por tensión, a veces llegando a fallar a causa de la tensión. En la **Figura 7** se puede ver la representación de esta falla.

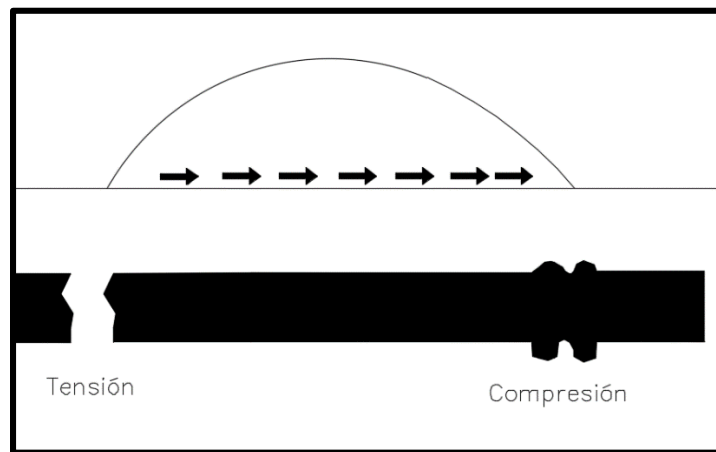


Figura 7. Falla por tensión

Los métodos analíticos para el funcionamiento de la tubería requieren bajo tensión requieren una descripción completa del comportamiento esfuerzo-deformación, O'Rourke and Liu (1999) dicen que uno de los modelos más comúnmente usados es el de Ramberg y Osgood (1943)⁶ que está dado por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right]$$

⁶ Ramberg, W. and Osgood, W., (1943), Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Technical Note, No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 28p.

Donde:

ε es la deformación

σ es el esfuerzo de tensión normal

E es el módulo de Young

σ_y es el esfuerzo de fluencia y n y r , son parámetros del modelo.

3.3.2.2. Falla por pandeo local

El pandeo local (flexión) en una tubería se debe a fuerzas de compresión acumuladas en un segmento de la tubería que cuando llegan a un cierto límite provocan esa característica de arrugamiento por lo que el tubo puede seguir brindando servicio, aunque, ya no de la forma que fue diseñado, sin embargo, cuando se vuelven a aplicar estas fuerzas de compresión pueden generar grietas en el tubo y por lo tanto fugas. Este comportamiento se observa principalmente en tubos de acero ya que es un material dúctil (Karamanos et al. 2014). O'Rourke y Liu señalan que debido a la propagación de onda por el terremoto de Michoacán 1985 se presentó este tipo de falla en varias tuberías de la Ciudad de México

Figura 8.



Figura 8. Falla por arrugamiento (O'Rourke y Liu 1999)

3.3.2.3. Pandeo de tubería como una viga

La tubería continua se puede ver como un elemento muy esbelto, así que cuando se somete a una fuerza de compresión excesiva puede presentar pandeo como una viga, y una parte de la tubería emerge si la profundidad de entierro es poca como se puede ver en la **Figura 9**. De hecho, el pandeo de la tubería no es exactamente un problema de falla sino de funcionalidad ya que la tubería sigue transmitiendo el gasto y es difícil establecer un criterio de falla para el pandero de tubería en términos de las propiedades del material. El pandeo de una tubería como viga se ha observado en pocos terremotos.



Figura 9. Pandeo de tubería (Karamanos et al. 2014)

El pandeo de vigas en general ha sido un tema sujeto a numerosos estudios analíticos. Según O'Rourke y Liu (1999), Hobbs (1981)⁷ adaptó un modelo existente de pandeo de viga al pandeo de tuberías submarinas y lo desarrolló como se aprecia en la **Figura 10**, en donde W es el peso propio por unidad de longitud de la viga, L es la longitud del tubo que se onduló.

⁷ Hobbs, R.E., (1981), "Pipeline Buckling Caused by Axial Loads," Journal of Constructional Steel Research, January, Vol. 1, No. 2, pp. 2-10.

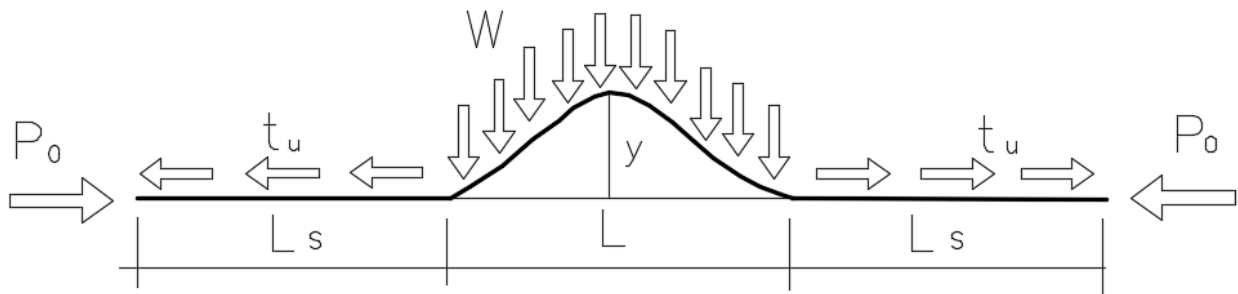


Figura 10. Pandeo vertical de tubería (Hobbs 1981)

Considerando una fuerza axial P , en la viga que excede un cierto valor denotado como P_{max} , el pandeo ocurre y cuando el equilibrio se recupera se tiene la fuerza axial P_0 , que representa la fuerza axial máxima y t_u , representa la fuerza de fricción reversa del suelo que ocurre alrededor del bucle, en donde L_s , es la longitud del tubo donde esa fuerza tiene efecto y que se desliza con respecto al suelo que lo rodea; hay que recordar que estas deformaciones ocurren a causa de deformaciones permanentes del suelo.

La distancia y , es el desplazamiento vertical que se eleva la tubería por encima del plano de referencia, y L se puede obtener asumiendo que el momento, en el punto anterior donde el tubo comienza ondularse, es cero y resolviendo la ecuación diferencial en función de y de la figura desviada en la parte del tubo donde se encuentra el bucle; Estos estudios analíticos han avanzado porque es un problema recurrente en la ingeniería de vías férreas.

3.3.3. Fallas en tuberías segmentadas

En las tuberías segmentadas se pueden presentar distintos modos de falla no obstante las más comunes son la separación axial, usualmente en juntas, y por fisuras perimetrales del tubo cerca de las juntas. También se pueden observar ciertas rotaciones de la tubería en la junta lo que también provoca fugas de agua y a veces el aplastamiento de ciertos tipos de junta.

3.3.3.1. Separación axial

Un mecanismo común de falla en las tuberías segmentadas es la separación de la tubería con la junta, a veces es la separación total o solo una pequeña soltura, que, si tiene fugas significativas también se considera como falla. Esto podría deberse a que las conexiones en las tuberías segmentadas son débiles, en comparación a las juntas de tuberías con

conexiones rígidas, y cuando la tubería se somete a tensión se separa de la zona más desfavorable. Javanbarg (2008) menciona que en el terremoto de Niigata Chuetsue en 2004 se originó este tipo de falla en varias tuberías del sistema de agua potable como se observa en la **Figura 11**.



Figura 11. Desconexión de tuberías (Javanbarg 2008)

3.3.3.2. Aplastamiento en juntas

En zonas donde se generan muchos esfuerzos de compresión y hay tuberías de concreto se ha observado el aplastamiento de la junta de esa tubería, especialmente una junta denominada campana y espigote M. O'Rourke señala que la mayoría de los daños a tuberías cilíndricas de concreto en la Ciudad de México debido al terremoto de Michoacán 1985 se debieron al aplastamiento de la junta.

3.4. Tipos y niveles de análisis

Las evaluaciones sísmicas y los análisis sísmicos en las redes de agua potable se agrupan en 5 grupos reconocidos. El analista debe tener claro el enfoque de su análisis ya que los resultados de estos análisis proveen distinta información y también requieren diferentes tipos y cantidad de datos. Para un sistema de agua potable, y generalmente para cualquier otra línea de vida, los análisis son:

- I. Estudios generales para vulnerabilidad de componentes.
- II. Estudio de escenarios sin análisis de operatividad.
- III. Estudio de escenarios con análisis de operatividad.
- IV. Estudios de planes de mitigación y priorización.
- V. Estudios de interconexión o interdependencia entre líneas de vida.

Como puede observarse, los tipos de análisis pueden denominarse como niveles ya que el estudio de vulnerabilidad de los componentes individuales sería el más superficial de los cinco, mientras que el estudio de interdependencia de líneas de vida, a grandes rasgos, es el que permite evaluar la capacidad del sistema de seguir proporcionando servicio a causa de la falla de operatividad de alguna otra línea vital como, por ejemplo, el sistema de telecomunicaciones o el sistema de energía eléctrica que, como reiteran Javanbarg and Takada (2009) y como fue observado en sismos recientes (e.g. Essbio 2010), resulta esencial para el funcionamiento del sistema de agua potable. También hay que resaltar que todos los análisis incluyen tiempos y costos de reparación, necesarios para que las agencias encargadas del sistema de agua potable tengan una buena valoración del impacto sísmico sobre este sistema y lleguen a una toma de decisiones.

A continuación, se explicarán brevemente las bases de cada uno de los estudios para las evaluaciones sísmicas, con base en manuales técnicos reconocidos en el campo de los riesgos naturales. En el capítulo siguiente se hará una revisión más detallada.

3.4.1. Estudios generales para la vulnerabilidad de sistemas de agua potable

De acuerdo al reporte preparado por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC 1991) de Estados Unidos, el análisis de vulnerabilidad sísmica del sistema de agua potable se basa en tres factores importantes, ya antes mencionados, que son:

- Peligrosidad sísmica: ATC en su reporte toma dos peligrosidades sísmicas principales que es la licuación y la sacudida del suelo.
- Las instalaciones del sistema como, por ejemplo, tanques de almacenamiento.
- Funciones de vulnerabilidad.

Usando estos factores se cuantifica la vulnerabilidad en términos del daño directo, que es el daño resultante de la peligrosidad sísmica, tomando en cuenta la sacudida del suelo y la licuación y se expresa en función de un valor porcentual de remplazamiento. Así se expresa la vulnerabilidad para instalaciones del sistema.

Para tuberías se puede evaluar el daño directo de tres formas:

1. Usando las curvas de daño del reporte ATC-13, que realizó el ATC en 1985, expresadas en rupturas por kilómetro.
2. Mediante un modelo que estima la probabilidad de ocurrencia de rupturas de un tramo de la red que está expuesta a una intensidad sísmica dada (medida por la intensidad modificada de Mercalli MMI). En donde, se asume que las rupturas ocurren mediante un proceso no homogéneo de Poisson donde la probabilidad (P_f) de tener al menos una ruptura en un tramo de red de longitud L está dado por:

$$P_f(L, MMI) = 1 - \prod_{k=1}^N \exp(-\lambda_k \times l_k)$$

Donde:

N es el número de tubos del tramo de red

L es la longitud del tramo de estudio

l_k es la longitud de cada tubo

λ_k es la tasa de ruptura media del tubo k obtenido de las curvas de vulnerabilidad del ATC-13 cuyo parámetro sísmico es la intensidad modificada de Mercalli MMI

Para usar este método, se requiere que el terreno se divida en celdas imaginarias con un valor asignado de MMI. De esta forma la k representaría una celda y no un tubo, y N sería el número total de celdas que cruzan la red.

3. El tercero es usar el mismo modelo para estimar la probabilidad de rupturas, pero por licuación.

Para el sistema de agua potable el ATC solo incluyó tablas para calcular daños en líneas de transmisión y excluyeron la información para estaciones de bombeo y diques.

3.4.2. Estudio de escenarios sin análisis de operatividad

Para la selección de escenarios sísmicos, la Agencia Federal de Administración de Emergencias (FEMA) realizó una plataforma que permite no sólo la evaluación de cada uno de los componentes del sistema, sino también la generación de diversas amenazas sísmicas (HAZUS 1999).

Para el sistema de agua potable Hazus considera que el sistema consiste en componentes de abastecimiento, almacenamiento, transmisión y distribución. Para el análisis del sistema de agua es importante contar con la ubicación geográfica y la clasificación de los componentes y también conocer los costos de reemplazo para las instalaciones del sistema, así como también, los costos de reparación para tuberías.

HAZUS hace clasificaciones en su manual técnico para cada uno de los componentes del sistema, principalmente las clasificaciones dependen de los volúmenes de agua con los que trabajan los componentes y si la construcción está en la superficie o por debajo ella.

El análisis de escenarios sin operatividad que propone HAZUS para el sistema de agua potable, necesita la siguiente información de entrada para instalaciones (Pozos, Presas,

Plantas de tratamiento, Estaciones de bombeo, etc.), acueductos de transmisión y tuberías de distribución:

- Localización geográfica de la instalación
- Parámetros sísmicos del suelo

Los escenarios de daño o escenarios sísmicos son una herramienta útil en la creación de planes de emergencia y también pueden servir para analizar daños causados por otros riesgos como erupciones o inundaciones y debe de representar de la manera más precisa la devastación en forma de daños y pérdidas económicas sobre el área de influencia del desastre, en este caso se analiza los efectos sísmicos sobre un sistema de agua potable únicamente. Hay que resaltar que este tipo de estudio se aplica en zonas locales donde sea más sencillo entender cómo se van desarrollando los daños a causa del terremoto. Para la distribución espacial de movimiento del suelo, en otras palabras, el parámetro sísmico que se va a relacionar con el daño directo mediante una curva de vulnerabilidad, HAZUS propone tres métodos:

- El análisis determinístico de movimiento del suelo
- Mapas probabilísticos de los parámetros anteriores
- Otros mapas determinísticos o probabilísticos de movimiento del suelo proporcionados por otros manuales

Finalmente, los resultados del análisis entregan las estimaciones de probabilidad de daños, expresado en términos de tasa de daño de componentes, y la funcionalidad de los componentes.

3.4.3. Estudio de escenarios con análisis de operatividad

Este estudio también es llevado a cabo con el uso de escenarios sísmicos, pero con análisis de operatividad, en palabras rápidas el análisis de operatividad es estudiar cómo van fallando los elementos del sistema y qué efecto tienen sobre los elementos que siguen proporcionando servicio. También otra diferencia sustancial, es que en este tipo de análisis

ya se toman en cuenta piezas o componentes más específicos del sistema, como lo son los hidrantes, juntas y válvulas.

En el manual de estimación de pérdidas de HAZUS también se proporciona este tipo de estudio que tiene un enfoque bastante extenso y expresa el funcionamiento del sistema en función de una reducción en el flujo que llega a los hogares o negocios, frecuentemente, en los hogares se interrumpe el servicio. Es decir, se introduce el concepto de la capacidad para proporcionar servicio, expresada en términos de las demandas de presión y de flujo en distintos nodos de la red de tuberías. Este aspecto es de suma importancia para tener una estimación de que daños se tendrían con un terremoto de una intensidad dada, y conocer si se tendrá el gasto necesario en instalaciones importantes como lo serían los hospitales o los hidrantes de la localidad. Por ejemplo, los hidrantes permitirán, si llegara a ser necesario, combatir incendios.

La metodología de HAZUS hace hincapié en el uso de sistemas de información geográfica. Los sistemas de información geográfica son poderosas herramientas, que, además de proporcionar la localización de los componentes del sistema, pueden acomodar y también manejar grandes cantidades de información, son especialmente útiles para este tipo de análisis donde se tienen bastantes variables que son ocupadas por el análisis. De los Sistemas de Información Geográfica también se hablará más adelante, en las futuras investigaciones de este tema.

Dentro del manual también hay una metodología para el cálculo de pérdidas económicas indirectas, que tienen que ver con la interrupción del agua potable referidas, principalmente, a la cadena de suministro del consumo de agua.

3.4.4. Estudios de planes de mitigación y priorización

Estos estudios también se pueden ver como el objetivo de los estudios pasados, porque para llegar a esa etapa se deben conocer los impactos de daño físicos y de funcionalidad del sistema de agua potable provocados por el terremoto. FEMA define la mitigación como los esfuerzos realizados para reducir los daños provocados por el terremoto, por lo que son acciones que se deben de tomar ante de que ocurra el desastre.

Javanbarg (2008) señala que el costo necesario para la acción de renovar las tuberías, que son la mayor parte de un sistema de agua potable, de una red de distribución de agua potable como parte de un plan de mitigación es muy alto en comparación con el presupuesto que pueda tener la agencia encargada del sistema, por ello se recurre a un plan de priorización, que consiste en dar preferencia a los componentes del sistema cuyo daño por el terremoto comprometería de forma catastrófica a otros componentes y, estos a su vez, puedan afectar el servicio del agua para los consumidores más importantes que se necesitan abastecer, por eso se debe haber cierto equilibrio entre gastos para mitigación y gastos para priorización, pero de cierta forma la mejor manera de mitigación es la que ha pasado por un análisis de priorización por lo que la priorización está implícita en el estudio de mitigación.

El desafío en la priorización es conocer qué componentes tienen la prioridad de reemplazarse. Hay varios métodos para hacer la tarea de la toma de decisiones en la priorización, algunos de ellos son: análisis de costo-beneficio, análisis multi-criterio, análisis de Monte Carlo, juicio de los expertos, análisis de sensibilidad, etc.

En lo referente a la mitigación, se siguen trabajando en nuevos procedimientos para la mitigación sísmica en líneas vitales de localidades de distintos tamaños, principalmente en las ciudades grandes con líneas vitales de grandes extensiones que crecen de una manera muy rápida como la Ciudad de México.

Para aplicar las acciones de mitigación en sistemas de abastecimiento de agua potable y líneas de gas, principalmente a causa de la inherente complejidad de la operación del propio sistema, y más cuando se trabaja con ciudades altamente pobladas, debido al gran número de componentes del sistema y al tiempo que lleva operando, puesto que los distintos componentes tienen diferentes edades y, por lo tanto, tienen distintos tiempos estimados para ser reemplazados, tal como lo indican (Hosseini and Moshirvaziri 2008) que realizaron un nuevo procedimiento de mitigación en sistemas de agua potable para la metrópolis de Tehran en Irán. También señalan que un procedimiento adecuado de mitigación sísmica, o de riesgo, para grandes ciudades debe tener las siguientes características:

- Considerar todos los factores importantes relacionados a los componentes del sistema, resistencia a distintos niveles de niveles de peligrosidad sísmica, importancia y función del componente dentro del sistema, edad del componente, así como también, la edad de los componentes entre otras cosas.
- Se debe tomar en cuenta la situación tecnología y económica de la región ya que las medidas de mitigación requieren de una inversión considerable
- Se puede considerar el valor total de costos de mitigación y los costos de daños provocados por terremotos como una función que se debe de minimizar y considerar las variaciones de los costos en el tiempo

3.4.5. Estudios de interconexión o interdependencia entre líneas de vida

Tal como sugieren (O'Rourke et al. 2004), hay una interdependencia en las líneas vitales, ya que los daños ocasionados por peligros sísmicos que provoquen una posible interrupción de otra línea pueden mermar el funcionamiento, por daños considerados no sísmicos, de la línea que se está evaluando.

Rinaldi (2004) define el término interdependencias como las conexiones entre distintos componentes de diferentes infraestructuras; él lo adopta como un sistema de sistemas, y es por eso que es una interdependencia y no una dependencia, ya que las líneas de vida coexisten como un todo y dependen mutuamente unas de otras, no obstante, hay algunas que se benefician más de otras, a esto se le conoce como dirección de la interacción. Incluso Rinaldi señala que hay cuatro tipos de interdependencias que son: la física, la lógica, la geográfica y la cibernética. Aunque se reconoce ampliamente la presencia de interdependencia en líneas vitales, las conexiones entre líneas son muy complejas por lo que es difícil modelarlas y más aún, medirla entre las diferentes líneas de vida.

Una medida de la interdependencia que se necesita saber es el grado de vinculación que poseen las líneas o los sistemas, como lo hace notar Poljanšek et al. (2010), en donde una medida cuantitativa de la fuerza de vinculación de las líneas implica que tan rápido se propagan perturbaciones de una línea a otra. Es decir, en dos sistemas vinculados fuertemente, los procesos de interacción dependen del tiempo y tienen poca holgura, por lo

que no permiten retrasos, por ejemplo, si el sistema de energía se abastece únicamente de una fuente, como el sistema de gas, y se interrumpe el abastecimiento en las líneas de gas, el sistema de energía se interrumpirá en un lapso de tiempo muy corto después del sistema de gas, mostrando un alto grado de vinculación.

Poljanšek y los demás investigadores hicieron una metodología para calcular qué tanto dependía el sistema eléctrico del sistema de gas considerando la dependencia física, la dirección de la interacción y la fuerza de vinculación, con la ayuda de matrices de interoperabilidad; estas matrices están compuestas por un conjunto de probabilidades de falla de varios componentes. Su metodología estuvo basada en los sistemas de información geográfica que, como ya se había mencionado, pueden trabajar con grandes cantidades de información y por su puesto en estos tipos de estudio su apoyo es muy útil.

En el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile, uno de los más poderosos que se hayan registrado en ese país y es uno de los más grandes de la historia, Dueñas-Osorio and Kwasinski (2012) realizaron un estudio para la cuantificación de la interdependencia en líneas vitales. En algunas regiones del país los daños a las líneas de energía, agua potable y gas fueron esporádicas; las líneas de energía de transmisión y distribución respondieron bastante bien ante el evento, con daños moderados y la mayoría de las líneas de transmisión se restauraron antes de 24 horas. Se observó la interdependencia de líneas de energía, transporte, telecomunicaciones y las de agua ya que cada una de ellas contribuyó al retraso del proceso de restauración y por lo tanto a la baja resiliencia de la ciudad.

Su metodología se basó en las curvas de restauración para distintos componentes de las líneas de vida, y se concluyó que los efectos en el retraso o adelanto en la restauración de los sistemas de teléfonos tiene una relación con los sistemas de entrega de energía eléctrica y en otras instalaciones también se observó una correlación logística con los sistemas de agua debido a que estos tuvieron grandes retrasos en la restauración, Dueñas y Kwasinski señalan que su estudio también puede servir para acciones de restauración después del terremoto, identificando que elementos son altamente dependientes.

Por otro lado, Javanbarg (2008) también simuló el impacto de la interrupción de la línea de poder sobre suspensión del agua potable durante el terremoto de Kobe 1995, definitivamente el funcionamiento del sistema de agua fue mermado por esta interrupción en la línea de poder, principalmente por el mal funcionamiento o incluso la interrupción en plantas de distribución y estaciones de bombeo que provocan una reducción en la presión del agua que es entregada a la ciudad.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN TUBERÍAS

En este capítulo se hablará de los análisis más simplificados para evaluar el riesgo sísmico de los sistemas de abastecimiento de agua potable que son los estudios apoyados en escenarios sísmicos para predicción de propagación de daños, con y sin conectividad de elementos; de igual forma se describirá el uso de las funciones de fragilidad y las curvas de vulnerabilidad en el campo de riesgo sísmico. Algunos de estos aspectos mencionados han sido más y mejor desarrollados en la evaluación de riesgo en edificaciones debido a que es más sencillo calcular la peligrosidad sísmica en el área de un edificio que el área donde se tiende una red de tuberías, ya que la segunda se extiende sobre una superficie muy amplia donde hay dificultades para medir los riesgos sísmicos y se deben de recurrir a mapas de peligrosidad o algunas otras técnicas.

Las redes de tuberías enterradas merecen especial atención dentro de los sistemas de abastecimiento de agua potable por la extensión geográfica que abarcan y las características del área donde se desplantan, como por ejemplo la topografía, para esto muchos de los análisis en la actualidad se apoyan en los sistemas de información geográfica para tener un mejor control y arreglo de la información de la zona, estos ya se han empezado a utilizar desde la década de los 90's en estos análisis; sin embargo los alcances de la tesis no abarcan una descripción elemental de lo que son los SIG y de cómo le sirven a los análisis de evaluación sísmica, pero se mencionan algunos trabajos en los que se han apoyado en estas herramientas.

4.1. Curvas de vulnerabilidad y fragilidad de los componentes del sistema

Las curvas de fragilidad y las funciones de vulnerabilidad son dos instrumentos muy útiles en la cuantificación de vulnerabilidad de la infraestructura, algunos investigadores argumentan que la vulnerabilidad puede reconocerse como un sinónimo de la fragilidad, sin embargo, así como la diferencia que debe existir entre riesgo y peligrosidad; la fragilidad y la vulnerabilidad también tienen enfoques diferentes, aunque las dos sirven para cuantificar la vulnerabilidad, tal como lo explican investigadores como Pitilakis K. D., Porter K., entre otros.

4.1.1. Funciones de fragilidad

Poljanšek et al. (2010) definen una curva de fragilidad, o función de daño, como también la llaman; como la representación gráfica de la probabilidad condicional de exceder cierto estado límite de daño dado algún nivel de peligrosidad sísmica.

Por otro lado, en términos de riesgo sísmico de sistemas de agua potable (Porter 2016) define una función de fragilidad como una función matemática que expresa la probabilidad de que ocurra un cierto estado de cambio en función de algún parámetro de movimiento del suelo; o en términos más técnicos se define como la función de distribución acumulada de la capacidad de un elemento de resistir un estado límite no deseado, en donde la capacidad está en términos de el parámetro que mide el movimiento del suelo. Puesto que el análisis de (Porter 2016) se enfoca más a las características del riesgo sísmico, en este trabajo se usarán las definiciones de tipos y formas de estas curvas.

La forma más usual de una función de fragilidad sísmica es la función de distribución log-normal acumulada, de esta forma:

$$\begin{aligned} F_d(x) &= P[D \geq d | X = x] \\ &= \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_d)}{\beta_d}\right) \end{aligned}$$

Donde:

La función de fragilidad es la probabilidad condicional de que se presente un estado de daño (D) mayor o igual a un estado límite de daño específico (d), dado que se presente una medida de excitación del suelo dada (x).

$F_d(x)$: función de fragilidad para un estado de daño d evaluado cuando el movimiento del suelo presente un valor x .

$\Phi(s)$: función de distribución estándar normal acumulada.

θ_d : la capacidad media en términos de un parámetro de movimiento del suelo de resistir un estado de daño d .

β_d : la desviación estándar logarítmica de la capacidad del elemento de resistir un estado de daño d .

Porter señala que se pueden distinguir tres tipos de curvas de fragilidad de acuerdo al método que se usa para modelarlas y son:

1. Empíricas: Las empíricas son las que se obtienen por medio de las observaciones y registros de daños obtenidos en terremotos pasados, también se pueden usar datos de laboratorio de pruebas de falla en elementos.
2. Las funciones de fragilidad analíticas que son las que están basadas en análisis de modelos estructurales de los elementos.
3. Opiniones de los expertos: son funciones de fragilidad basadas en las opiniones de investigadores o personas que tienen experiencia en las distintas clases de elementos expuestas al peligro sísmico, donde ellos hacen un dictamen de las probabilidades de falla con respecto a los niveles de peligro sísmico.

En cuanto a la vulnerabilidad, Porter hace énfasis en las diferencias que se tienen con la fragilidad por lo cual, no deben usarse como sustitución de una o de otra. Principalmente una de las mayores diferencias es que la fragilidad se mide en términos de probabilísticos mientras que la vulnerabilidad se mide mediante pérdidas y las funciones de vulnerabilidad se presentan en forma de funciones de pérdidas, curvas de vulnerabilidad (Katayama et al. 1975) entre otras.

Las formas de crear curvas de vulnerabilidad también son las misma que para crear funciones de fragilidad, pero usualmente las funciones de vulnerabilidad se usan para expresar las pérdidas o reparaciones en daños, la confianza que se tiene en esta forma de calcular reparaciones yace en que son observaciones hechas en terremotos pasados que se ajustan para obtener una tendencia y de ahí calcular las reparaciones que se presentaran en posibles escenarios es relativamente sencillo. Lo que se debe de tener en cuenta es que las condiciones del suelo tengan características similares para que las curvas de vulnerabilidad no lleven a resultados que sobreestimen o peor aún, subestimen los posibles daños en un sistema de abastecimiento de agua potable a causa de un terremoto.

4.1.2. Funciones de vulnerabilidad

Hay que volver a remarcar que ambas funciones sirven para la estimación de daños sísmicos para la evaluación sísmica de sistemas de agua potable que ya existen; anteriormente en este trabajo ya se presentaron algunas de las primeras funciones de vulnerabilidad empíricas, puesto que fueron realizadas por observaciones de daños anteriores registradas en distintos terremotos alrededor del mundo de los que se pudo obtener información suficiente. A continuación, se presentará el trabajo

de Isoyama et al. (2000) que consiste en estimaciones más precisas del daño en sistemas de tuberías de abastecimiento de agua potable y otros trabajos más actuales como Maruyama and Yamazaki (2010).

De las primeras curvas de vulnerabilidad presentadas en esta tesis, observamos que, después de un terremoto se hace una recopilación de los daños ocasionados por dicho evento, estos daños usualmente se reflejan en las reparaciones que se tienen que hacer al sistema para volver a ponerlo en el estado inicial antes del terremoto (por eso el parámetro con el que se correlaciona el movimiento del suelo se puede llamar reparaciones/km o daños/km indistintamente) con algún parámetro sísmico del suelo, en donde no se tomaban en cuenta, los diámetros de las tuberías, los tipos de materiales de los que estaban hechas ni el tipo de suelo en el que se encontraban desplantadas. Por estos problemas que podrían causar la subestimación o la sobre estimación de capacidad sísmica en las tuberías se añade un concepto a las funciones de vulnerabilidad que es, la tasa de daño estándar. Es decir, se hace una tasa de daño para una tubería en especial con características dadas, principalmente, de material, diámetro, profundidad de entierro y tipo de suelo.

En el terremoto de San Fernando en 1971 se obtuvo la tasa de daño estándar para tuberías de acero colado en redes de agua potable, con diámetros de 100 a 200 mm, enterradas a una profundidad de 1 m y en suelo aluvial en función de la aceleración máxima del suelo, y se expresa como:

$$R(PGA) = 1.698 \times 10^{-16} PGA^{6.06}$$

En donde:

R es la tasa de daño expresada en fallas/km

PGA es la aceleración máxima del suelo en cm/s

Teniendo esta tasa de daño estándar se puede llegar a una tasa de daño modificada que incluya a otros factores que tengan algún efecto sobre los daños que provoque el terremoto en las tuberías enterradas, de tal manera que la tasa de daño modificada se exprese como:

$$R_M(PGA) = C_1 C_2 \dots C_n R_0(PGA)$$

En donde C_1 , C_2 , hasta C_n , son factores de corrección de las características de las tuberías que se estén evaluando, el parámetro sísmico del suelo puede ser otro aparte del PGA que, como ya se mencionó en capítulos anteriores de este trabajo, el PGA no es un parámetro recomendable para la correlación con daños en tuberías enterradas.

(Isoyama et al. 2000) utilizaron una tasa de daño estándar basados en su análisis del terremoto de Kobe 1995, para la tasa de daños modificada ellos tomaron en cuenta factores de: tipo de material de las tuberías, diámetro de las tuberías, condición del suelo y el grado de licuación del suelo, para su análisis se apoyaron en los sistemas de información geográfica (GIS) para tener un mejor control de los daños en tuberías y de la localización de las mismas, así como también pudieron manejar datos topográficos y de tipo de suelo de las ciudades afectadas por este terremoto.

Los factores de corrección se obtienen mediante una regresión de los datos de daños en tuberías que se presentaron en el terremoto de Kobe 1995, hay que tener en cuenta que si la tubería tuviera las mismas características que la tubería para la tasa de daño estándar los coeficientes valdrían 1.

(Maruyama and Yamazaki 2010) trabajaron en la construcción de una nueva curva de vulnerabilidad para algunas prefecturas de Japón. En análisis pasados la curva de Isoyama et al., obtenida con información del terremoto de Kobe fue ampliamente utilizada. Sin embargo, Maruyama y Yamazaki utilizaron datos de observaciones de sismos ocurridos en la nueva era, terremotos tales como: Niigata Chuetsu-oki 2004, Noto-Peninsula 2007, Niigata Chuetsu-oki y por supuesto, también algunas observaciones de Kobe 1995. La curva se aplicó con con las intensidades ocasionadas por el terremoto de Niigata 2007 y los resultados obtenidos fueron comparados con los daños de ese mismo terremoto obteniendo buenos resultados, también su función fue utilizada usando un escenario sísmico con epicentro en la ciudad de Tokio y se estimaron los daños en la prefectura de Chiba.

Las estimaciones de daños obtenidas por la curva de vulnerabilidad de Maruyama y Yamazaki no sobrestimaron tanto los daños provocados por el escenario comparadas con curvas pasadas, entre ellas las de Isoyama et al., esto principalmente a la cantidad de información que se tuvo para la realización de la curva. Por esto se puede observar que para tener funciones de vulnerabilidad precisas se deben de tener amplia información de registros pasados de terremotos, principalmente en la zona que se desea estudiar e información específica de la red, como diámetro, tipos de material, etc. Estos tipos de estudios convenientemente se basan en sistemas de información geográfica para el acomodo de información y presentación de resultados

4.1.3. Consideraciones para curvas de vulnerabilidad en la Ciudad de México

El trabajo de Isoyama et al. nos sirve como guía para la construcción de curvas de vulnerabilidad. Una aplicación útil sería obtener las curvas de vulnerabilidad para tuberías enterradas de la Ciudad de México, en donde obtendríamos los registros, si hubiere, de los daños ocasionados por distintos terremotos, se incluirían los registros del terremoto de 1985 de Michoacán. Ordaz y Pineda ya estuvieron trabajando en la obtención de estas funciones de vulnerabilidad para la red en la Ciudad de México, sin embargo, hay que agregar que se tienen que considerar más factores, entre ellos están:

1. Edad de la tubería: en redes de tuberías lo bastante antiguas, como lo es la de la Ciudad de México, es importante tener registros de la edad de las tuberías que conforman el sistema de abastecimiento. Aparte de la evaluación sísmica de la red, estos registros podrán servir para hacer planes priorización para la renovación de algunos elementos del sistema, en aras de que el desempeño del sistema sea lo mejor posible apegándonos a estatutos económicos y sustentables.
2. Reparaciones de tuberías por causas no sísmica: este aspecto es muy importante debido a que en distintos trabajos hechos por investigadores (Fragiadakis and Christodoulou 2013) se ha demostrado que la capacidad de una tubería a soportar fallas causadas por deformaciones debido a terremotos se ve disminuida notoriamente por el antecedente de reparaciones que éstas tengan.
3. Daños ajenos a las fuerzas mecánicas del suelo donde se encuentran enterradas las tuberías: se debe de observar el efecto que tenga el suelo que rodea a las tuberías para reconocer y evitar daños a la tubería por razones ajenas a las deformaciones, como, por ejemplo, la corrosión de las tuberías a causa del suelo.

Si no se tiene un control sobre estos factores que puedan modificar las tasas de daños en el sistema, las curvas de vulnerabilidad podrían llevarnos a resultados engañosos y por lo tanto a predicciones alejadas de lo que en realidad pueda ocurrir.

También estos estudios se deben de apoyar en los sistemas de información geográfica, de tal manera que sea más fácil hacer cambios que surgen como transcurre el tiempo en los inventarios de información, algunos trabajos de este tipo ya se han realizado en el sistema de la ciudad de México (Ahumada 2005).

4.2. Estudio de escenarios sin análisis de conectividad entre elementos

Diferentes manuales técnicos ya han realizado estudios de escenarios sin conectividad de elementos (también llamada operatividad de elementos), en este trabajo se hizo una breve revisión referente a los estudios que propone HAZUS en su manual sobre la estimación de pérdidas en sistemas de abastecimiento de agua potable.

Los escenarios de riesgo sísmico se usan principalmente para edificaciones, pero por su aportación al estudio de vulnerabilidad también se han usado para sistemas de agua potable. Estos plantean terremotos probables para identificar los posibles daños en el sistema y estimar pérdidas; esto se hace con el fin de nuevos planes de respuesta de emergencia y algunas otras estrategias de mitigación de riesgo.

Un terremoto conlleva una secuencia de acciones, como señala (FOPAE 2011), y lo esquematiza mediante la **Figura 12**. Es necesario un buen entendimiento de este enfoque conceptual del sismo para la creación de escenarios que representen de manera adecuada la realidad.

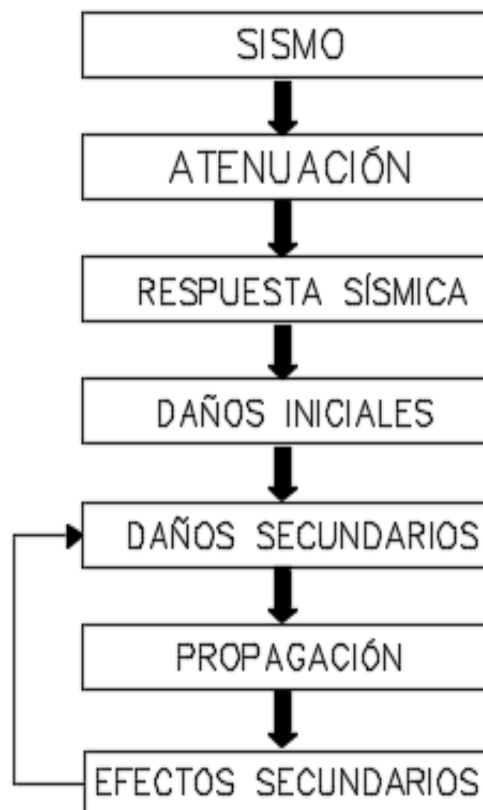


Figura 12. Secuencia de acontecimientos sísmicos FOPAE

1. El sismo se refiere a la fuente que originó el evento
2. La atenuación es la propagación de la onda sísmica por el basamento rocoso
3. La respuesta sísmica es la ampliación o reducción de la onda por el efecto del tipo de suelo y también de la topografía.
4. Los daños iniciales es la respuesta en forma de daños de la infraestructura que está expuesta al terremoto, en líneas de vida es importante la respuesta de las tuberías y en general de todos los componentes del sistema, ya sea que estén enterrados o sobre la superficie.
5. Los daños provocados por deformaciones permanentes del suelo son algunos de los daños que se consideran como daños secundarios ya que fueron disparados por la acción del terremoto y afecta significativamente al suelo.
6. A su vez las deformaciones permanentes ponen en riesgo la infraestructura que puede propagar más daños alrededor de toda la región.
7. Los efectos secundarios son daños a la infraestructura provocados por la misma infraestructura que resultó gravemente dañada, como edificios, y estas incluso pueden llegar a provocar bajas humanas. Estos efectos pueden llegar a convertirse en un circuito que genere más daños secundarios, por eso el circuito en el diagrama.

Hay que subrayar que los daños en líneas de vida también pueden ser tanto por daños iniciales como por daños secundarios.

Rodríguez-Avellaneda (2011) sostiene que hay dos escenarios de riesgo sísmico, los de daño y pérdidas por sismo.

Los escenarios de riesgo sísmico analizan el comportamiento general de la ciudad ante los terremotos más probables. Se concentran en las características fundamentales de la infraestructura de la ciudad que se analiza, que las diferencia de otras del mismo tipo, en las líneas de vida y en la organización social con el fin de ver las deficiencias del sistema y plantear planes o medidas de mitigación, pero principalmente generar conciencia en la población de los riesgos sísmicos de su localidad.

Los escenarios de daño por sismo sirven para saber cómo el daño se distribuye geográficamente por la ciudad y hacer mediciones cuantitativas del riesgo sísmico y de la vulnerabilidad de los elementos que serán expuestos a éste, usualmente se expresan en términos de pérdidas económicas o humanas. Una de los mayores beneficios de este tipo de análisis es que son el resultado de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad. Otra observación que hace Rodríguez-Avellanada

es que estos dos escenarios no son dos tipos distintos, al contrario, los escenarios de riesgo abarcan a los escenarios de daño, los de daño son medidas cuantitativas de los daños que se presentaran en la ciudad, mientras que los de riesgo ya toman en cuenta la interacción del riesgo con la sociedad, algo que es sumamente importante.

Pitilakis and Kakderi (2011) también señalan que se debe considerar la extensión espacial de las líneas de vida ya que una de las diferencias más notorias de los escenarios en edificios y los escenarios de líneas vitales radica en calcular el movimiento del suelo, por lo que es importante tomar en cuenta las condiciones locales del suelo, es decir, los efectos de sitio representan un factor importante debido a que esta variabilidad puede modificar la variabilidad en la intensidad que a su vez tienen un efecto en la variación de los daños. Entonces para obtener escenarios sísmicos lo suficientemente precisos son imperativos los estudios de microzonificación, que es información específica que se obtiene de estudios de geología geotécnica superficial, que nos ayudaran a obtener mejores parámetros del sacudimiento del suelo para distintos escenarios.

Para dar un ejemplo de este tipo de estudios y de los resultados que nos pueden ofrecer, a continuación, se describe el estudio de interdependencias en líneas vitales que se apoyó en escenarios de riesgo que se hicieron años atrás para su evaluación, se podría decir que la base de este estudio de interdependencias específicamente, fue un estudio de escenarios sin conectividad realizado en el 2006.

4.2.1. Caso de estudio: escenario de daños en San Francisco

En el 2011 el *Lifelines Council of the City and County of San Francisco* comenzó a trabajar en un reporte sobre las interdependencias en líneas vitales de la ciudad de San Francisco con un escenario de daño realizado en 2006, que entregó tres años después con el objetivo de crear planes de respuesta rápida y planes de restauración que asistieran en la priorización de restauración después de un terremoto (CCSF 2014).

El escenario de daño para este estudio de interdependencia fue un terremoto de magnitud 7.9 (M) en la costa de San Francisco. El escenario del terremoto de San Andreas se desarrolló en 2006 por expertos en estimación de pérdidas que consideraron qué pasaría si el terremoto de San Francisco en 1906 ocurriera, para obtener mejores estimaciones de consecuencias, daños en estructuras, pérdidas y movimientos del suelo más probables. El terremoto de 1906 en San Francisco fue

extremadamente destructivo, presentó grandes movimientos oscilatorios que duraron poco más de un minuto, desencadenando incendios y cerca de 225 000 damnificados.

Con ese escenario y los movimientos del suelo resultantes muchos edificios y otras estructuras de San Francisco apenas cumplirían las mínimas cargas sísmicas designadas por los nuevos estándares de construcción debido a que fueron construidas hace mucho tiempo bajo otros códigos menos resilientes; en cuanto a las deformaciones permanentes que provocaría un escenario así, es muy posible que se presenten áreas de licuación debido a los suelos sin consolidar y con rellenos artificialmente y deslaves en áreas con laderas.

También se estimaron entre 90 000 y 130 000 edificios severa o totalmente dañados estructuralmente en el norte de California a causa del terremoto y se calculó un costo de reparación o reedificación de más de 120 billones de dólares por efecto de este escenario. Para tener una idea de la cantidad de dinero (dólar del 2006) que se gastaría por condado lo compararon con las pérdidas económicas de terremotos pasados que fueron bastantes destructivos en términos de daños en edificios (**Tabla 3**), donde los que aparecen con letra normal son condados afectados por el escenario de riesgo y los que aparecen con letra negrita son terremotos registrados.

Tabla 3. Costos de escenario sísmico y de eventos sísmicos pasados

LUGAR	COSTO (billones de \$)
San Francisco	34
Santa Clara	28
San Mateo	26
Condados de Alameda	15
Otros condados	18
Northridge 1994	20
Kobe 1995	80

Un estudio de escenarios es más complejo para líneas vitales como en el caso de sistemas de abastecimiento de agua, no obstante, los escenarios proporcionan una predicción buena de los daños, en términos económicos, de un terremoto devastador. En el reporte de la CCSF uno de sus primeras tareas fue el de completar el escenario que ya se había hecho en 2006, añadir más información de edificios y de líneas vitales con el fin de hacer el escenario más extenso y que pudiera dar buenos resultados en los impactos sobre las líneas de vida.

4.3. Estudio de escenarios con análisis de conectividad entre elementos

El estudio de escenarios con operatividad de elementos es uno de los más exhaustivos y complejos, porque incluye tres aspectos imprescindibles que son: el cálculo de la amenaza sísmica del área en que se extiende la red de estudio, la respuesta de los componentes ante la amenaza sísmica y finalmente la evaluación funcional del sistema, así lo afirman algunos investigadores como Isoyama, Kameda y Katayama entre otros, que fueron los primeros en darle la debida importancia a los análisis sísmicos en *lifelines*.

Los estudios sin análisis de conectividad de elementos son más sencillos en comparación a los que sí hacen los análisis de conectividad, debido a que en los primeros solo se enfocan a la respuesta sísmica de cada elemento por separado del sistema, esto ya conlleva cierta incertidumbre por dos aspectos: a) en cuanto a la demanda sísmica a la que se somete cada elemento, puesto que, esto depende de la localización geográfica y de las condiciones de sitio (dificultades que enfrentan los escenarios de riesgo en líneas vitales) y, b) en la respuesta de cada elemento ante el sismo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el interés principal en sistemas de abastecimiento es cómo se comportan todos los elementos considerando los daños en diferentes puntos del mismo, así que se requiere un análisis sistémico; de esto es lo que se encarga un análisis de conectividad de elementos.

A continuación, se hablará del enfoque que Kameda y otros investigadores, les dan a los estudios de análisis con conectividad que son estudios que ya incluyen el funcionamiento hidráulico, refiriéndonos a líneas de vida de agua potable.

4.3.1. Enfoque de estudios de Kameda et al. sobre conectividad

El trabajo de (Kameda et al. 1984)⁸ fue uno de los pioneros en estudios con análisis de operatividad de elementos, puesto que, en este trabajo se desarrollan y explican las bases de los análisis más modernos de este tipo. Entonces, por su aportación a los conocimientos fundamentales que se manejan en la evaluación de riesgo sísmico de sistemas de líneas de vida, especialmente en las redes de tuberías de los sistemas de agua potable; se describirán brevemente aspectos importantes de su trabajo, que se concentró en los daños ocasionados al sistema de agua potable de la ciudad de Sendai provocados por el terremoto Miyagiken-Oki, ocurrido el 12 de junio de 1978.

[Kameda et al. 1984] señalan que, en los modelos para la evaluación de la confiabilidad, o fiabilidad, y de la serviciabilidad es necesario asegurar tres aspectos fundamentales para que el modelo proporcione resultados apegados a la realidad:

1. Los procesos físicos básicos utilizados deberían de reflejar de una manera apropiada el mundo real, esto se podría ver en la elección del conjunto de escenarios de riesgo apropiados
2. Las medidas de fiabilidad deben de ser útiles para la toma de decisiones de las agencias responsables.
3. Los resultados de la fiabilidad del sistema deben ser capaces de explicar cuantitativamente los daños a la funcionalidad del sistema provocados por el evento sísmico.

[Kameda et al.] hablan de cuatro etapas típicas que se presentan en la región después de haber ocurrido un terremoto y que marcan los requerimientos mínimos que un sistema funcional de agua debe de tener, estos son:

1. Abastecimiento para control y extinción de fuego provocado o desatado después del terremoto

⁸ Kameda et al., 1984, *System reliability and serviceability of water supply pipelines under seismic environment*.

2. Abastecimiento en zonas donde es indispensable el agua por lo que no se puede interrumpir, tales localizaciones pueden ser, hospitales, refugios para damnificados, etc.
3. Abastecimiento mínimo para que la gente continúe, con sus labores diarias dentro del tiempo de restauración del sistema
4. Alcanzar el estado inicial que se tenía antes del terremoto

En la segunda etapa, se debe de proporcionar la demanda de gasto en las zonas especificadas, hay que mencionar que estas zonas son limitadas, donde no se puede permitir la interrupción del abastecimiento; esto se hace mediante el aseguramiento de la conectividad de las tuberías de distribución principales del sistema. El gasto mínimo, debido al terremoto, que deben de ser proporcionados en estas zonas es propuesto por las agencias encargadas del sistema. Bajo estas condiciones, en la red de tuberías de agua potable, [Kameda et al.] dicen que la conectividad es necesaria para contar con recorridos de flujo de agua alternativos que puedan continuar abasteciendo estas zonas, al menos uno.

No obstante, no todos los terremotos presentan necesariamente la primera etapa, o al menos no de una forma tan grave, tendría que estudiarse la vulnerabilidad de ciertas áreas a tener incendios provocados por un terremoto.

Para la segunda etapa es importante la conectividad de elementos que, a grandes rasgos, es la vinculación de los nodos de abastecimiento de una red y los nodos, en este caso, de demanda para las zonas críticas de la segunda etapa, esta conectividad es proporcionada por las rutas o recorridos que se llevan a cabo a través de las tuberías para entregar el gasto, cuando esta conectividad se rompe el gasto es bajo o menor al que debería de llegar o incluso puede interrumpirse ya que en alguna parte del agua se está desperdiciando por las rupturas o las fugas en las tuberías inducidas principalmente por el terremoto. En el análisis de conectividad también se pueden identificar las rutas alternativas del gasto para que pueda llegar a un nodo en especial, esto se conoce como redundancia.

[Kameda et al.] hacen este análisis por medio de experimentos aleatorios y la repetición de los mismos para obtener las probabilidades de falla de los distintos recorridos del flujo en la

red de distribución, esta técnica se verá en los análisis posteriores de operatividad de elementos.

También para el funcionamiento del sistema de agua bajo condiciones de un sismo, desarrollaron parámetros que ayudaran a describir la serviciabilidad del sistema en términos principalmente del gasto con la técnica de repeticiones aleatorias de un experimento, estos parámetros son para serviciabilidad local y para serviciabilidad global y son:

- **Serviciabilidad local**

Se representa en términos del flujo de agua de un nodo que se suministran a sus nodos dependientes.

- Tasa de abastecimiento y demanda esperada (r_{qi}) y está dada por:

$$r_{qi} = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \frac{Q_i^k}{P_{di}}$$

- Probabilidad de satisfacer la demanda (r_{ni})

$$r_{ni} = \frac{(\text{número de simulaciones donde } Q_i = P_{di})}{n_s}$$

En donde:

n_s ; es el número de simulaciones repetidas

Q_i ; es el consumo real de la línea/nodo i de la k -ésima simulación

P_{di} ; es la demanda, la suma de fugas L_i más el consumo real Q_i

La tasa de abastecimiento y demanda esperada es una medida cuantitativa de la satisfacción del consumidor mientras que la probabilidad de demanda es una medida útil para el proveedor

- **Serviciabilidad global**

Se evalúa usando el abastecimiento total requerido por día (W_i), y se expresa como:

$$W_t = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_b} P_i^k T$$

En donde:

n_b : es el número de líneas/nodo

P_i : es el flujo total de del nodo i , es decir, también se puede representar como la suma de consumo real (Q) más las fugas que se presentaron (L) en el nodo i

[Kameda et al.] también estimaron la pérdida de gasto por fugas (L_i), que es necesario para la evaluación correcta del funcionamiento del sistema, mediante una manera simple mediante las pérdidas diarias de gato y un factor de fuga o de perdida de gasto; en donde establecían un límite inferior de velocidad del suelo y asumían que ahí empieza a la fuga mínima de gasto, mientras que en límite superior de velocidad se asumía que se presentaría el gasto máximo perdido en fugas y varía linealmente entre esos limites

Estos parámetros ya no se usan actualmente, no obstante, los parámetros para serviciabilidad sí son bastante parecidos a lo que proponían [Kameda et al.] y también hay que subrayar que sus resultados obtenidos de estos modelos demuestran que es un modelo muy preciso, comparados con los daños reales.

4.3.2. Análisis de fiabilidad del sistema

El análisis de funcionamiento sísmico del sistema se compone de la evaluación de fiabilidad del sistema de agua potable que se define como la probabilidad de que las demandas dadas en los nodos del sistema sean satisfechas con suficiente carga de presión, para condiciones normales o anormales. Algunos investigadores describen la fiabilidad de los sistemas de agua potable en términos de la serviciabilidad del mismo, es decir, se apoyan en dos índices como medidas para calcular la fiabilidad del sistema, tales medidas son (Javanbarg 2008):

- Índice de disponibilidad

El índice de disponibilidad se puede definir como la tasa de presión disponible del sistema averiado con respecto a la presión que se debería de presentar en condiciones normales, o sea en el sistema sin averiar, en el nodo j de la red,

inmediatamente después del terremoto, sin considerar reparaciones, y se expresa como:

$$AI = \frac{H_j^{avl}}{H_j}$$

En donde:

H_j^{avl} es la carga de presión del sistema averiado

H_j es la carga de presión del sistema sin averiarse

- Índice de serviciabilidad

Este índice es parecido al de disponibilidad, pero en términos del gasto, y se define como la tasa del gasto disponible del sistema averiado con respecto al gasto que se debería de presentar en condiciones normales en el nodo j , nuevamente inmediatamente después del terremoto sin considerar reparaciones y se expresa como:

$$SI = \frac{Q_j^{avl}}{Q_j}$$

En donde:

Q_j^{avl} es la carga de presión del sistema averiado

Q_j es la carga de presión del sistema sin averiarse

Javanbarg señala que el índice de serviciabilidad ya ha sido usado en otros trabajos para evaluar el funcionamiento de los sistemas de agua potable bajo algunas condiciones de falla debidas a los daños por terremoto.

Para el análisis de la fiabilidad de los sistemas usualmente se recurre al método de simulaciones Monte Carlo para simular probabilísticamente el daño en el sistema.

La simulación Monte Carlo es una técnica muy usada para simular el comportamiento de los sistemas físicos, ya que, simplifica la modelación de sistemas que tienen una gran cantidad de parámetros desconocidos y sin tener claramente las características de sus

distribuciones de probabilidad (Poljanšek et al. 2010b). De hecho, el método de simulaciones Monte Carlo no solo se usa en los análisis de funcionamiento de los sistemas, sino que también puede llegar a ser usado para describir las medidas de movimiento del suelo en las líneas de vida (Jayaram and Baker 2009).

5. CASO DE ESTUDIO

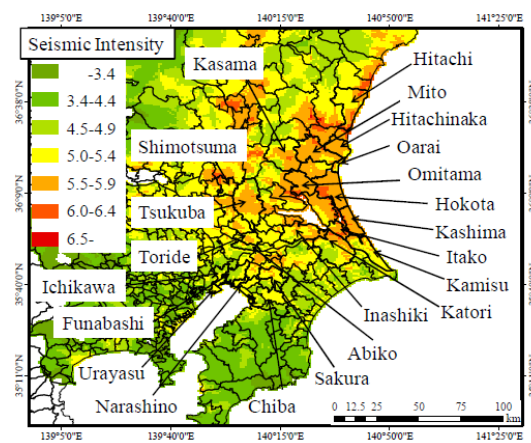
Uno de los países en los que constantemente se registran daños al sistema de agua durante eventos sísmicos, es Japón. Debido a la recurrencia de terremotos en las grandes ciudades de Japón, especialmente en la capital, las agencias del servicio de distribución de agua y de drenaje, monitorean constantemente sus sistemas y buscan implementar constantemente diseños sismo-resistentes y análisis sísmicos para disminuir el riesgo de falla de sus redes de agua.

En las siguientes secciones, se introducirán ejemplos numéricos de los niveles de análisis sísmico de la red de agua en las prefecturas localizadas en la costa este de Japón. Además, se incluirán consideraciones añadidas después del sismo de Tohoku en 2011. Finalmente, se describirán algunas de las consideraciones de diseño que pueden ser utilizadas en la Ciudad de México.

5.1. Uso de curvas de vulnerabilidad

El uso de curvas de vulnerabilidad y fragilidad es muy útil para estimar la cantidad de daño que un evento sísmico puede ocasionar. Como se mencionó en la sección cuatro, las curvas de vulnerabilidad relacionan una tasa de daño con un nivel de intensidad sísmica, mientras que las curvas de fragilidad relacionan el nivel de intensidad sísmica con la probabilidad de exceder estados límites.

La recopilación de datos de daño después de eventos sísmicos es esencial para poder obtener curvas de vulnerabilidad. Naba et al. (2012) recopilaron información de daño en las prefecturas de Ibaraki y Chiba **Figura 13**, relacionando una tasa de daño, R_N , con la intensidad sísmica media estimada en cada zona.



La tasa de daño se definió como:

$$R_N = \frac{N_p}{L}$$

Donde N_p es el número de puntos con daño físico registrados y L es la longitud total de tubería en el área.

La relación entre la tasa de daño y la intensidad sísmica media se muestra en la **Figura 14**. Para obtener una curva de daño Se tomaron los valores medidos de PGV y se compararon con las tasas de daño para tener curvas similares a las reportadas por O'Rourke and Ayala (1993) **Figura 15**.

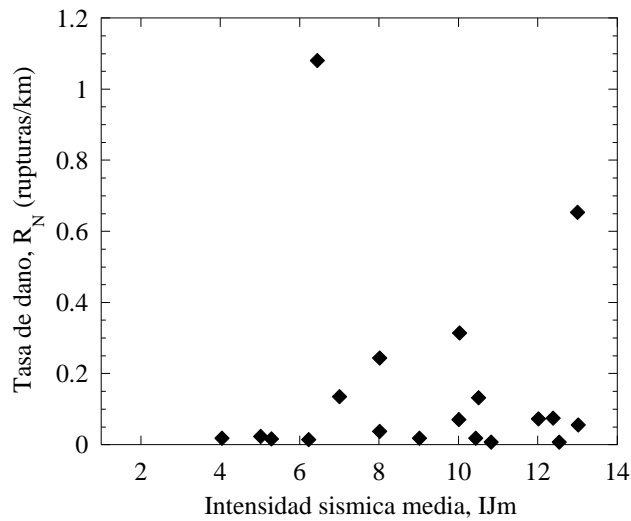


Figura 14. Relación entre tasa de daño e intensidad sísmica media (Naba et al., 2012)

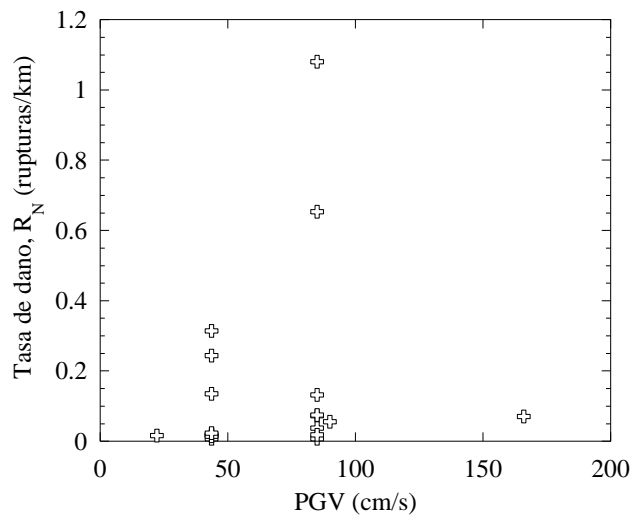


Figura 15. Relación entre tasa de daño y máxima velocidad, PGV

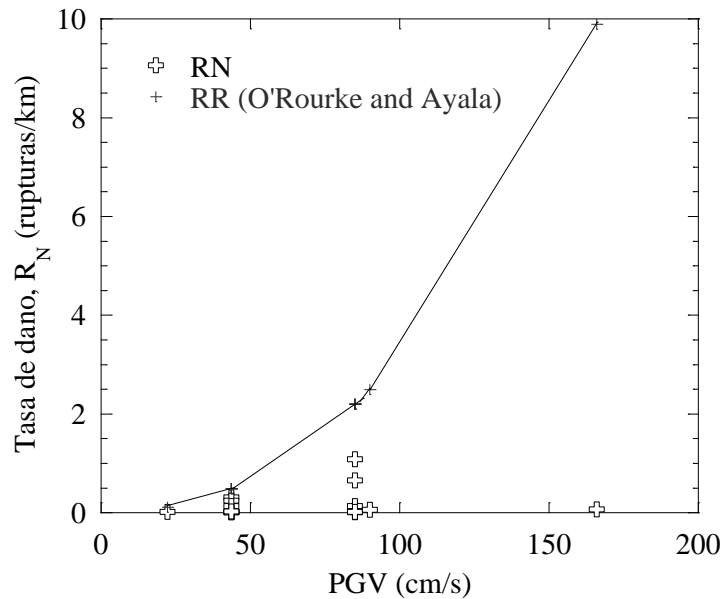


Figura 16. Comparación con la curva obtenida por O'Rourke y Ayala (1993)

Finalmente, se hace una comparación entre los datos obtenidos por O'Rourke y Ayala y los datos obtenidos para Tohoku 2011 en la misma gráfica, mostrados en la figura de arriba **Figura 16** y podemos observar que tienden a estar distribuidos, casi, unos sobre otros, excepto dos puntos de la curva de Ayala que se disparan, pero en este trabajo ya se había explicado las posibles razones por lo que sucede esto.

Los datos observados en Tohoku 2011 se comparan con los datos propuestos por Ayala y O'Rourke debido a que sus curvas son utilizadas en distintos manuales técnicos como el de SYNER-G y otros que ya han sido presentados anteriormente en esta tesis.

5.2. Uso de índices de desempeño

Un ejemplo de estudios generales para la vulnerabilidad de elementos es el uso de índices de desempeño. La Asociación Japonesa de Infraestructura Hidráulica (JWWA) publicó una serie de lineamientos para el manejo y evaluación de los sistemas de agua en 2007 (Nakamura 2007). En dichos lineamientos se definieron 137 índices de desempeño que se clasifican en 5 categorías para representar la situación del sistema. Aproximadamente un tercio de los índices se relacionan directamente con el desempeño sísmico:

1. Tasa de envejecimiento de una tubería (2103)

$$Tasa\ de\ envejecimiento = \frac{longitud\ de\ la\ tubería\ excediendo\ su\ vida\ útil}{longitud\ total\ de\ la\ tubería} \times 100$$

2. Tasa de tubería sismo-resistente (2210)

$$Tasa\ de\ tubería\ sismo - resistente = \frac{longitud\ de\ la\ tubería\ sismo - resistente}{longitud\ total\ de\ la\ tubería} \times 100$$

Esto considera materiales sismo-resistentes como el hierro forjado, el acero y el polietileno de alta densidad (HDPE).

3. Número de fallas (5013)

$$Número\ de\ fallas = \frac{número\ de\ fallas}{longitud\ total\ de\ la\ tubería} \times 100(number/100\ km)$$

Este número de fallas incluye la suma anual de accidentes que ocurren en el procesamiento, transmisión y distribución.

Este tipo de índices puede permitir evaluar el daño en la red, pero también puede ser utilizados para evaluar diferentes escenarios, por ejemplo, los proyectos para mejorar la resistencia del sistema a sismos. Considerando un sistema en la región de Kanto de Japón que sirve a una población de 57000 personas, con un suministro de 24,400 m³/día y 420 km de tubería.

La 0 muestra los índices de desempeño para este sistema. Índices de desempeño del sistema en la región de Kanto

Tabla 4. Índices de desempeño actuales

Código	Indicador de desempeño	Valor
2103	Tasa de envejecimiento	19.8%
2104	Tasa de renovación anual	1.7%
2210	Tasa de tubería sismo-resistente	0.1%
1117	Tasa de mantenimiento	86.0%
3015	Costo de abastecimiento	1.46 USD dollar/m ³
5103	Número de fallas	25.7 (1/100km/año)
5107	Tasa de filtraciones	10.0%

Los valores se presentan con el fin de observar la comparación entre un escenario de renovación de tuberías para mejorar la resistencia sísmica del sistema que comienza inmediatamente.

Se asume que la tasa de renovación anual incrementa de 1.7% a 3.0% en periodos de proyecto de 15 años. 189 km de tuberías de hierro fundido, acero, asbesto cemento y PVC, serán reemplazadas por tuberías sismo-resistentes de acero dúctil. Se asume que esto reducirá la tasa de envejecimiento en 1.5%. Este cambio permitirá una reducción de 0.28% por año en la tasa de filtraciones. El costo de la renovación es estimado basado en el costo de construcción clasificado por diámetros, con ello, el incremento en la tarifa de agua es de 0.46 USD/m³. Los datos de mejora en la tasa de mantenimiento y número de fallas se consideran sin cambio, considerando un estado previo a un sismo. La presenta el proyecto a 15 años si se comienza la renovación inmediatamente.

Tabla 5. Índices de desempeño a 15 años

Código	Indicador de desempeño	Valor
2103	Tasa de envejecimiento	7.3%
2104	Tasa de renovación anual	3.0%
2210	Tasa de tubería sismo-resistente	45.1%
1117	Tasa de mantenimiento	86.0%
3015	Costo de abastecimiento	1.92 USD dollar/m ³
5103	Número de fallas	25.7 (1/100km/año)
5107	Tasa de filtraciones	5.8%

Si se considera que el incremento de tuberías sismo-resistentes también tiene un impacto directo en la reducción en el número de fallas que se espera en un sistema, como se ha visto en sismos recientes, por ejemplo en Chile 2010, donde el reemplazo de tuberías redujo significativamente el daño durante el terremoto (Eidinger and Davis 2012).

5.3. Seguridad sísmica de un sistema de distribución de agua en Tokio, Japón

Para ilustrar el cálculo de seguridad sísmica de un sistema de distribución de agua en la Ciudad de Tokio, se presenta la siguiente red **Figura 17**. Dado que los terremotos en Japón son en placas profundas, la posibilidad de una ruptura de falla intersecando la superficie del suelo es remota. Un área de 300 km de radio, desde Tokio, se considera para los análisis y el área se modela como una fuente de sismo en donde no se conoce el sistema de fallas. Los siguientes parámetros, medidos en sismos previos, pueden considerarse fijos: $v=3.6 \times 10^{-4}$ por año por km² y $\beta=1.94$. También se asume $m_0=4.0$ and $m_u=8.0$ para la región de Tokio.

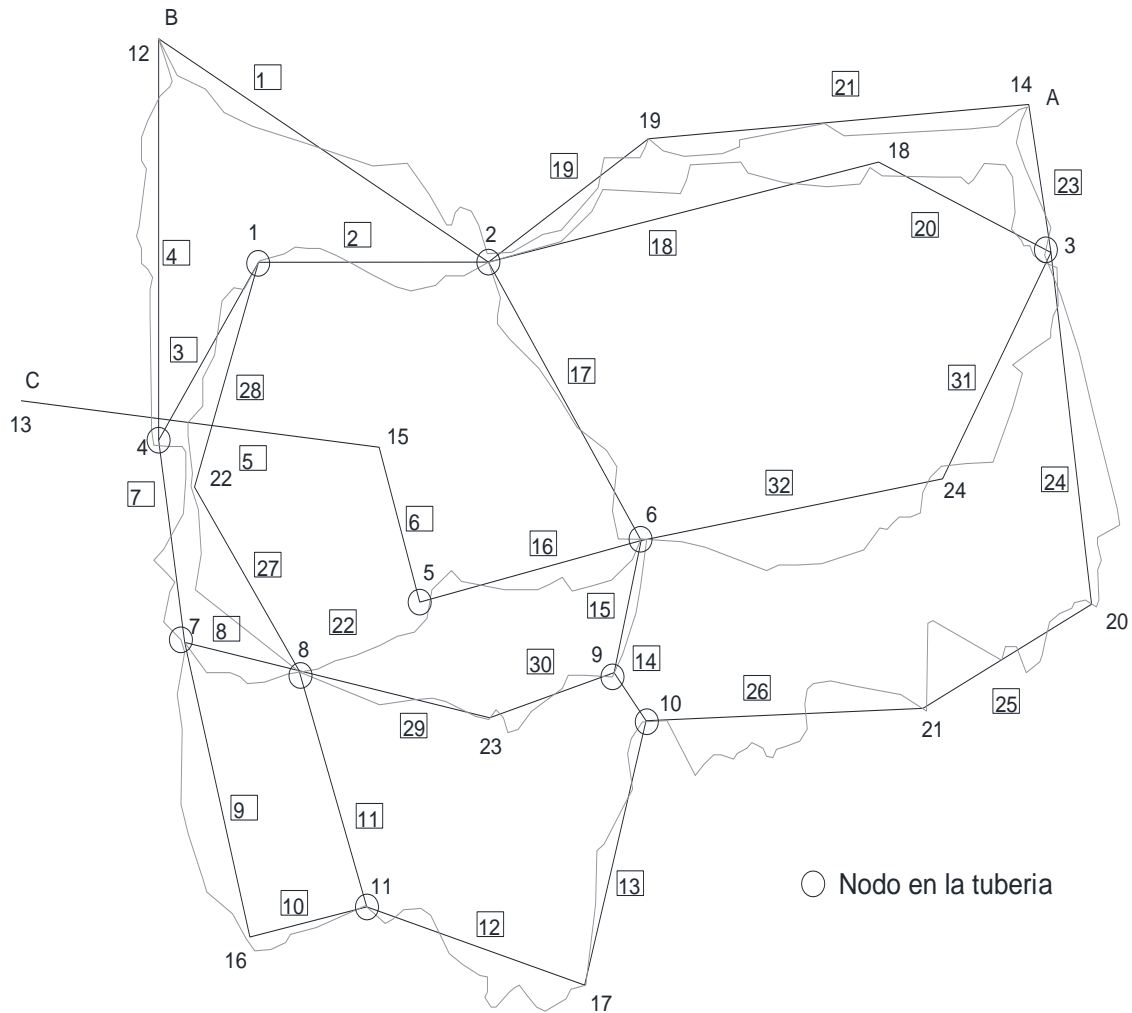


Figura 17. Red de tuberías

Para evaluar la excedencia de la intensidad máxima de movimiento del suelo sobre la capacidad de resistencia de uno o más enlaces de la red, considerando que la red de abastecimiento de agua potable posee un material común y un proceso de fabricación similar para sus enlaces (tubos), podría suponerse que la falla del tubo ocurre en el punto donde se presente la intensidad máxima de movimiento a lo largo del tubo provocado por n distintas fuentes potenciales de sismo; se recurre al cálculo de la probabilidad de que el movimiento del suelo máximo exceda una intensidad específica y_r en cualquier punto a lo largo del tubo, expresada como:

$$P(Y > y_r) = \sum_{i=1}^n P(Y > y_r | E_i) P(E_i)$$

En donde:

Y es la máxima intensidad de las n fuentes de terremoto distintas a lo largo del tubo j

E_i es la ocurrencia de terremoto en la fuente i

Asumiendo una tasa media de ocurrencia de sismo en la fuente i que permanece constante en el tiempo sobre la región, la probabilidad del evento E_i , puede expresarse de esta manera:

$$P(E_i) = \frac{v_i}{v}$$

En donde v_i es el número promedio de terremotos con magnitud igual o menor a la magnitud mínima que se presenta en la región en la i -ésima fuente de sismo (también conocida como tasa de ocurrencia) y v es la de toda la región.

Entonces la probabilidad de que el movimiento del suelo máximo exceda una intensidad específica también puede expresarse como:

$$P(Y > y_r) = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n P(Y > y_r | E_i) v_i$$

Asumiendo un proceso de Poisson homogéneo, con una tasa de ocurrencia v_i por año la ecuación anterior se expresa de esta manera:

$$P(Y > y_r)_{por\ año} = 1 - \exp \left[- \sum_{i=1}^n P(Y > y_r | E_i) v_i \right]$$

Donde la probabilidad condicional $P(Y > y_r|E_i)$ se puede evaluar con esta expresión:

$$P(Y > y_r|E_i) = \int P(Y > y_r|E_{i,m}) v_i f(m) dm$$

En donde $f(m)$ es la función de densidad de probabilidad de ocurrencia de sismo en función de la magnitud de un terremoto y cuyos intervalos de integración son m_o y m_u que son los valores de menor y mayor magnitud que se presentan en la región, respectivamente, por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$P(Y > y_r|E_i) = \int_{m_o}^{m_u} P(Y > y_r|E_{i,m}) v_i f(m) dm$$

Y $E_{i,m}$ es la ocurrencia de un terremoto m en fuente i y la función de densidad de probabilidad de ocurrencia de terremoto $f(m)$ de la región se asume que es un proceso de Poisson con la magnitud del terremoto descritos con la siguiente distribución exponencial (Der Kiureghian y Ang 1977):

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_o)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad m_o \leq m \leq m_u$$

En donde β es un parámetro sísmico conocido como la pendiente en la llamada curva de magnitud-recurrencia de la región.

Entonces para $P(Y > y_r|E_i)$ se deben de evaluar en todas las posibles fuentes de terremoto de la región, para ello, Der-Kiureghian y Ang (1977) idearon tres tipos de modelos de fuentes, usadas

para evaluar la peligrosidad en los sistemas de líneas vitales, estos tipos de modelos se basan principalmente en la información que se tiene como se indica a continuación.

- Modelación de fuente tipo I
Este modelo es apropiado para fuentes potenciales que se originan de fallas bien definidas
- Modelación de fuente tipo II
Es el indicado cuando se modelan fuentes de terremoto originadas en áreas donde no se conoce la localización de la falla, pero la orientación del sistema de falla sí.
- Modelación de fuente tipo III
Es apropiado en regiones donde el sistema de falla es desconocido.

Para el cálculo de la probabilidad de falla del enlace o el tubo es necesario tomar en cuenta la probabilidad anual de excedencia de las intensidades de movimiento del suelo, que ya se describió como se puede calcular arriba; pero también es necesario tomar en cuenta la resistencia del tubo en relación a la fuerza máxima inducida por el movimiento del suelo, esta se puede obtener mediante una función de densidad de probabilidad denotada como f_R , que es una función de distribución de la resistencia del enlace. De esta manera la probabilidad anual de falla del tubo por movimiento del suelo severo, está dado por:

$$P_{F_j} = \int_0^{\infty} [1 - F_Y(y_r)] f_R(y_r) dy_r$$

Donde y_r es una intensidad del movimiento del suelo que corresponde a la capacidad de resistencia del tubo j , $[1 - F_Y(y_r)]$ es la probabilidad de excedencia de la intensidad del movimiento del suelo y f_R es la función de densidad de probabilidad de la resistencia del tubo en cuestión.

Con esto se puede calcular la probabilidad de falla de cada tubo para movimiento del suelo severo, el primer paso para obtener la probabilidad de falla de todo el sistema. En cuanto a la evaluación de falla en el sistema entero se tienen que considerar todas las rutas o caminos posibles de los puntos

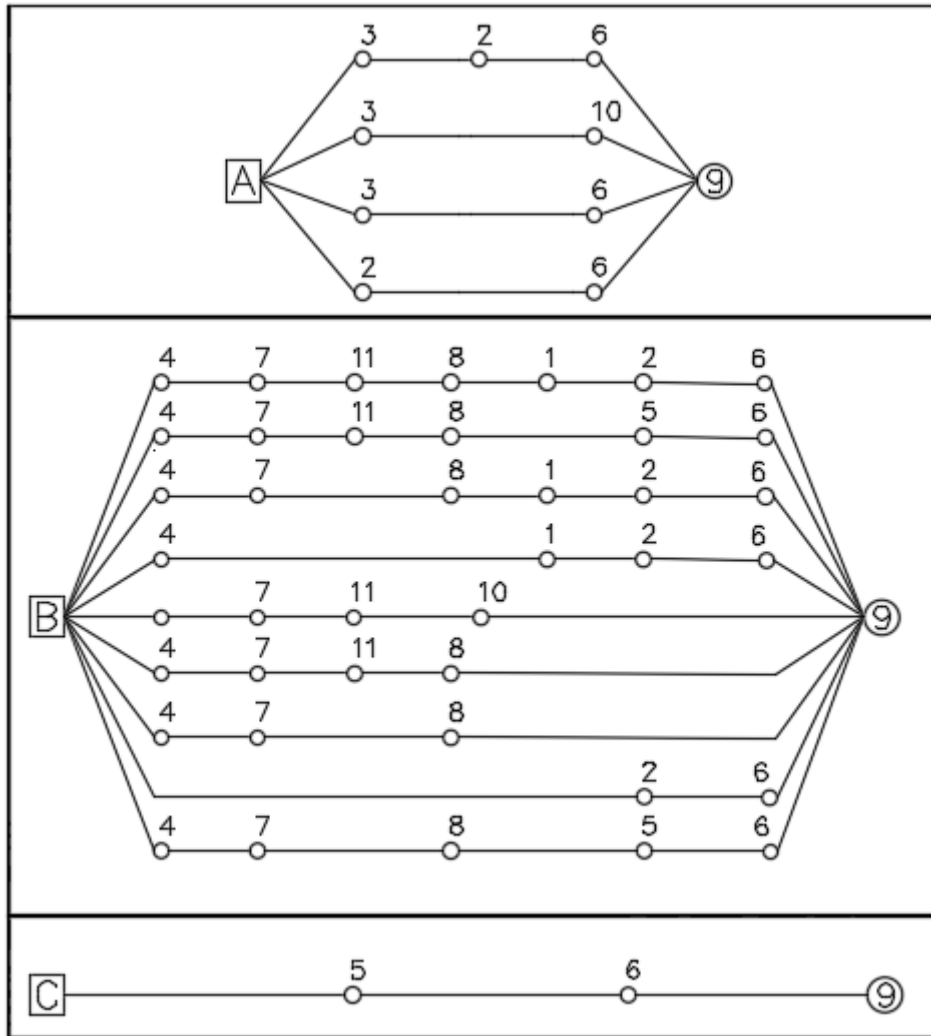


Figura 19. Rutas paralelas de la red

Tomando en cuenta que un sistema de agua potable está compuesto de N rutas paralelas, en donde la *i*-ésima ruta cuenta con n_i número de enlaces en serie. Si la falla de un enlace en la ruta, e_j , π_i , es considerado estadísticamente independiente de la falla de otros enlaces, la probabilidad de falla de la ruta π_i es:

$$P_{F_i} = 1 - \prod_{j=1}^{n_i} [1 - P_{F_j}]$$

En donde:

n_i es el número de enlaces en serie de la ruta π_i

P_{F_j} es la probabilidad de falla del j -ésimo enlace de la ruta por acción del movimiento del suelo

π_i es la ruta de flujo en estudio

Usando esta ecuación, se calculó la probabilidad para falla de las catorce rutas, asumiendo que la función de probabilidad de capacidad de resistencia por intensidad de movimiento del suelo de los enlaces sigue una distribución log-normal, en donde la resistencia media del enlace varía entre 0.15g y 0.6g. Dichas probabilidades de falla de las rutas se resumen en la **Tabla 6** para las distintas resistencias medias del enlace.

Tabla 6. Probabilidades de falla de las rutas de la red

Ruta	Resistencia media del enlace en [g]						
	0.15 (x10-2)	0.225 (x10-2)	0.3 (x10-3)	0.375 (x10-3)	0.45 (x10-3)	0.525 (x10-4)	0.6 (x10-4)
1	0.16	3.79	1.170	3.93	1.4	5.15	1.95
2	0.16	3.79	1.170	3.93	1.4	5.15	1.95
3	0.13	3.04	0.932	3.14	1.12	4.12	1.56
4	0.13	3.04	0.932	3.14	1.12	4.12	1.56
5	0.295	7.43	2.330	7.86	2.81	10.3	3.89
6	0.245	5.99	1.860	6.29	2.25	8.24	3.11
7	0.245	5.99	1.860	6.29	2.25	8.24	3.11
8	0.16	3.79	1.170	3.93	1.4	5.15	1.95
9	0.22	5.26	1.630	5.5	1.97	7.21	2.72
10	0.22	5.26	1.630	5.5	1.97	7.21	2.72
11	0.16	3.79	1.170	3.93	1.4	5.15	1.95
12	0.099	2.29	0.699	2.36	0.843	3.09	1.17
13	0.189	4.53	1.400	4.72	1.69	6.18	2.33
14	0.13	3.04	0.932	3.14	1.12	4.12	1.56

Para la probabilidad de falla del sistema, como el que se presenta en este ejemplo, calcular esta probabilidad es complicado, puesto que algunas rutas pueden tener enlaces en común y podrían estar correlacionadas, así que estas correlaciones deben ser tomadas en cuenta en la evaluación de falla del sistema completo. Como observamos en la figura anterior, de las catorce rutas con las que cuenta el sistema de agua hay varias rutas que tienen enlaces en común, entonces, para calcular estas correlaciones se recurrirá al método PNET (*Probabilistic Network Evaluation Technique*).

Las correlaciones entre rutas se pueden obtener asignando una desviación estándar a cada enlace, esto con el fin de determinar el coeficiente de correlación, ρ_{ij} , entre dos rutas π_i y π_j . Esta correlación es:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum \sigma_k^2}{\sigma_i \sigma_j} \quad k \in (\sigma_i \cap \sigma_j)$$

Donde σ_i y σ_j son las desviaciones estándar de las rutas π_i y π_j , respectivamente; y σ_k es la desviación estándar de aquellos enlaces que tengan en común las rutas π_i y π_j . Si hay n_k número de enlaces en común en las rutas π_i y π_j , entonces la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\rho_{ij} = \frac{n_k}{\sqrt{n_i n_j}}$$

Donde n_i y n_j es el número total de los enlaces que componen a las rutas π_i y π_j , respectivamente.

El método PNET se basa en que aquellas rutas que están altamente correlacionadas ($\rho_{ij} > \rho_0$) se consideran perfectamente correlacionados, mientras que los que no están tan correlacionados ($\rho_{ij} \leq \rho_0$) pueden ser considerados como estadísticamente independientes.

La correlación de demarcación ρ_0 , define la transición entre correlaciones bajas y altas, en estudios previos hechos en redes, esta fue tomada como 0.5, por lo que se usara el mismo valor en este ejemplo.

Entonces formando distintos grupos de correlación, las rutas pueden ser “representadas” cuando están perfectamente correlacionadas (mayor a la correlación de demarcación), o, “representativas” cuando tienen una correlación baja y se asume que son estadísticamente independientes.

Entonces la probabilidad de falla del sistema entero P_F es aproximadamente esto:

$$P_F = \prod_r P_{F_r}$$

Donde r se refiere a las rutas representativas.

Para ejemplificar se calculan los coeficientes de correlación de la fuente A de la red de abastecimiento para resistencia media del enlace de 0.15g:

$$\rho_{13} = \frac{1}{\sqrt{4 \times 3}} = 0.29$$

$$\rho_{14} = \frac{2}{\sqrt{4 \times 3}} = 0.57$$

$$\rho_{21} = \frac{1}{\sqrt{4 \times 3}} = 0.29$$

$$\rho_{23} = \frac{1}{\sqrt{3 \times 3}} = 0.33$$

$$\rho_{24} = 0$$

$$\rho_{34} = \frac{1}{\sqrt{3 \times 3}} = 0.33$$

Observamos que solo la ruta 4 puede ser representada por la ruta 1, debido a que su coeficiente de correlación (ρ_{14}) es mayor a la correlación de demarcación por lo que se asume que esas rutas están perfectamente correlacionadas.

Entonces la probabilidad de falla de la subred, de A a 9 es:

$$P_F = \prod_r P_{F_r} = 0.16 \times 0.16 \times 0.13 = 0.0033$$

De igual forma se hace el mismo procedimiento con las distintas fuentes del sistema, ya que se asume que la probabilidad de falla del sistema, son las probabilidades de falla de cada una de las fuentes, debido a que son independientes, y se anexan los resultados de los coeficientes de correlación en la **0**.

Tabla 7. Coeficientes de correlación entre rutas

A-9	nk	ni	nj	ρ_{i-j}
ρ_{1-2}	1	4	3	0.29
ρ_{1-3}	2	4	3	0.58
ρ_{1-4}	1	4	3	0.29
ρ_{2-3}	1	3	3	0.33
ρ_{2-4}	0	3	3	0
ρ_{3-4}	1	3	3	0.33
B9				
ρ_{1-2}	5	8	7	0.67
ρ_{1-3}	6	8	7	0.80
ρ_{1-4}	4	8	5	0.63
ρ_{1-5}	3	8	5	0.47
ρ_{1-6}	4	8	5	0.63
ρ_{1-7}	2	8	4	0.35
ρ_{1-8}	2	8	3	0.41
ρ_{1-9}	3	8	5	0.47
ρ_{2-3}	3	7	7	0.43
ρ_{2-4}	2	7	5	0.34
ρ_{2-5}	3	7	5	0.51
ρ_{2-6}	4	7	5	0.68
ρ_{2-7}	2	7	4	0.38
ρ_{2-8}	1	7	3	0.22
ρ_{2-9}	4	7	5	0.68
ρ_{3-4}	4	7	5	0.68
ρ_{3-5}	2	7	5	0.34
ρ_{3-6}	2	7	5	0.34
ρ_{3-7}	3	7	4	0.57
ρ_{3-8}	2	7	3	0.44
ρ_{3-9}	4	7	5	0.68
ρ_{4-5}	1	5	5	0.20
ρ_{4-6}	1	5	5	0.20
ρ_{4-7}	1	5	4	0.22
ρ_{4-8}	2	5	3	0.52
ρ_{4-9}	2	5	5	0.40
ρ_{5-6}	3	5	5	0.60
ρ_{5-7}	2	5	3	0.52
ρ_{5-8}	0	5	3	0
ρ_{5-9}	2	5	5	0.40
ρ_{6-7}	3	5	4	0.67
ρ_{6-8}	0	5	6	0
ρ_{6-9}	2	5	5	0.40
ρ_{7-8}	0	4	3	0
ρ_{7-9}	3	4	5	0.67
ρ_{8-9}	1	3	5	0.26

De igual forma obteniendo las rutas representativas de la fuente B, se obtienen sus probabilidades de falla, en el caso de la probabilidad de falla en C, es la probabilidad de falla de su única ruta, puesto que no tiene otras con que correlacionarse.

Las probabilidades de falla en el subsistema B y C son:

$$P_F(B a 9) = \prod_r P_{F_r} = 0.29 \times 0.22 \times 0.19 = 1.21 \times 10^{-3}$$

$$P_F(C a 9) = 0.13$$

Recordemos que estas son las probabilidades de falla para una intensidad de 0.15g, por lo que se deben de obtener las probabilidades para las intensidades ya establecidas, con lo que se obtendrían las curvas de falla anual para A y B en la **Figura 20** y la curva de falla anual para C en la **Figura 21**, que es la curva de falla para la ruta de flujo 14, debido a que es la única ruta que se tiene de C al punto de salida 9.

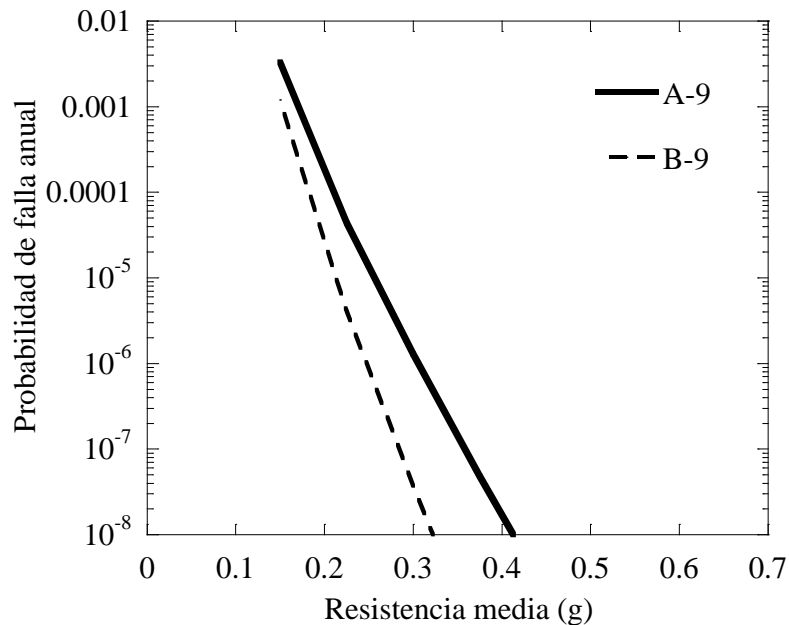


Figura 20. Probabilidad de falla anual para la red A-9 y B-9

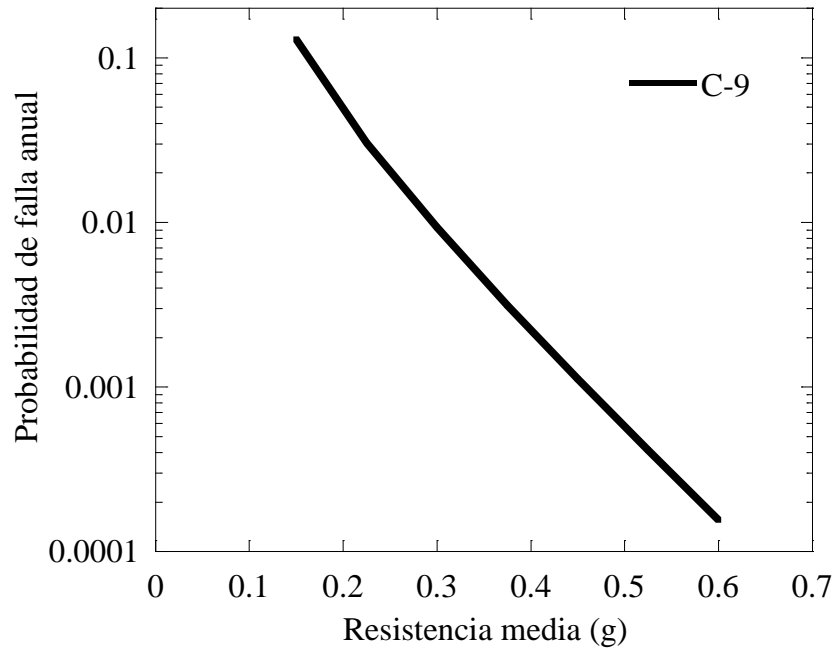


Figura 21. Probabilidad de falla anual para la red C-9

Como puede observarse en las figuras anteriores, esta metodología permite estimar la probabilidad de falla de las trayectorias de distribución del agua potable.

Este ejemplo nos permite observar la importancia de recolectar información de los sistemas de agua urbana para realizar este tipo de análisis. Como se mencionó en el capítulo 4, existen nuevas metodologías que permiten incorporar la conectividad entre elementos, la redundancia en una red y la operatividad del sistema. Los resultados de estos análisis pueden aplicarse como parte de la planeación de la ciudad para reemplazar o diseñar componentes de la red de agua urbana.

6. CONCLUSIONES

Los terremotos son algunos de los desastres naturales más dañinos que pueden afectar a la sociedad y a las comunidades urbanas, usualmente su magnitud tiene que ver con el daño que se provocará a la infraestructura y esto a su vez con los costos de reparación y restauración de los distintos sistemas que conforman las comunidades modernas. El gran terremoto y tsunami del este de Japón significó un parteaguas en la ingeniería sísmica y fue un recordatorio de lo destructivos que los sismos pueden ser, incluso en países donde este campo de estudio está ampliamente desarrollado.

Ante esto se debe de pensar en la siguiente cuestión: ¿Qué es más costoso, la prevención o la recuperación? En realidad, no se puede usar el presupuesto de la comunidad en una sola de estas dos acciones, porque los costos de prevención y los de recuperación siempre exceden al presupuesto que los gobiernos destinan para estos aspectos, lo que se debe de cuestionar es como balancearlos; y una de las premisas que presenta esta tesis, es apostar por mantener operando las partes más importantes de las líneas vitales después de un desastre natural, en esta tesis solo se presentaron los terremotos como desastres naturales y los sistemas de abastecimiento de agua potable como uno de los sistemas de líneas de vida más importantes, debido a que, en general los sistemas de líneas vitales servirán para que se resuelvan o se prevengan más daños secundarios ocasionados por los desastres de la naturaleza. Por esto el objetivo de esta tesis fue dar importancia a los sistemas de abastecimiento de agua ante los terremotos, ya que, si bien no se les toma tan en serio dado que su interrupción no pone en riesgo vidas humanas durante el momento del terremoto, la ausencia de este sistema puede llevar a escenarios catastróficos, como ya se ha observado en distintos terremotos alrededor del globo.

Hablando específicamente de nuestro país, un país que es azotado por desastres naturales frecuentemente; es momento de que se tomen las medidas adecuadas, principalmente en apoyar la investigación en ingeniería para hacer planificación de mitigación de impacto por desastres naturales, algo que ya es muy común en países que se enfrentan a desastres naturales severos como Chile, Estados Unidos, Japón, etc.

En esta tesis también se describieron las primeras investigaciones que se hicieron (la mayoría se empezaron a llevar a cabo en la década de los 70's) sobre los análisis sísmicos en los sistemas de abastecimiento, y brevemente de cómo fueron evolucionando, que no abarco hasta nuestros días, ya

que los análisis actuales son bastante complejos y extensos para ser abarcados en una tesis, eso, solo considerando los sistemas de abastecimiento de agua potable.

Se presentaron tres casos de estudios en Japón, enfocados a los tipos de análisis que se describen en la tesis, para ejemplificar el uso y aplicación de dichas metodologías.

En el caso de la Ciudad de México, se han realizado recientemente cambios de tubería de asbestocemento por polietileno, lo que puede ser un factor determinante en el comportamiento sísmico del sistema. Los análisis sísmicos descritos pueden emplearse para llevar a cabo reparaciones que se consideren urgentes y priorizar la asignación de presupuesto para reemplazo de tuberías y construcción de nuevos segmentos.

Otro factor importante es la recolección de datos del sistema hidráulico en cuanto a reparaciones realizadas anualmente y las que puedan considerarse directamente como consecuencias de eventos sísmicos. La aplicación de modelos de filtraciones puede emplearse para cuantificar el daño provocado incluso por sismos moderados en la Ciudad de México.

Finalmente, es importante remarcar que el uso integrado de sistemas geográficos de información con los análisis sísmicos puede aportar beneficios considerables para mejorar la resiliencia de la Ciudad.

REFERENCIAS

- Ahumada, P. (2005). "Usos de sistemas de información geográfica en los estudios de riesgo sísmico: Aplicación al análisis de sistemas de tuberías." Instituto politécnico nacional.
- ALA. (2005). *Seismic Guidelines for Water Pipelines*.
- Alberto, Y., and de la Llera, J. C. (2016). "Damage to the water system in the earthquakes of Chile 2010 and Japan 2011." *1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure*.
- ATC. (1991). *ATC-25 Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States*. Redwood City.
- Ayala, A. G., and O'Rourke, M. J. (1989). "Effects of the 1985 Michoacan earthquake on water systems and other buried lifelines in Mexico." *Technical Report - National Center for Earthquake Engineering Research*.
- Barenberg, M. E. (1988). "Correlation of pipeline damage with ground motions." *J. Geotech. Engrg.*, 114, 706–711.
- Barrientos, S. E. (2010). "Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010 en Chile." *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Asociación Geológica Argentina, 67(3), 412–420.
- Bradley, B. a. (2012). "Strong ground motion characteristics observed in the 4 September 2010 Darfield, New Zealand earthquake." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 42(September 2010), 32–46.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., Rourke, D. O., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., and Winterfeldt, D. V. O. N. (2004). "A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities." *13 th World Conference on Earthquake Engineering*, (2575).
- CCSF. (2014). *Lifelines Interdependency Study*. City and County of San Francisco.
- César-Valdez, E. (1994). *Abastecimiento De Agua Potable*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- CONAGUA. (2007). "Redes de distribución." *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*.
- Cubrinovski, M., Bradley, B., and Wotherspoon, L. (2011). "Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake." *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(4), 205–226.
- Der-Kiureghian, A., and Ang, A. H.-S. (1977). "A fault-rupture model for seismic risk analysis." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(4), 1173–1194.
- Díaz-Rodríguez, J. (2005). *Dinámica de Suelos*. (Limusa, ed.), Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Dueñas-Osorio, L., and Kwasinski, A. (2012). “Quantification of lifeline system interdependencies after the 27 February 2010 Mw 8.8 offshore Maule, Chile, earthquake.” *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1), 581–603.
- Earthquake Engineering Research Institute. (2010). “Learning from earthquakes: The Mw 7.1 Darfield (Canterbury), New Zealand earthquake of September 4, 2010.” *Earthquake Engineering Research Institute Learning from Earthquakes*, CMMI-0758529 National Science Foundation, 12.
- Earthquake Engineering Research Institute. (2011). *The Mw 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22, 2011. EERI Special Earthquake Report*.
- Eidinger, J., and Davis, C. A. (2012). “Recent earthquakes: Implications for U. S. water utilities.” *Water Research Foundation Web Report #4408*, 46.
- Essbio. (2010). “La puesta en marcha mas dificil de Essbio.” *Revista NOS*, May.
- Fallis, A. . (2013). *El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile. Journal of Chemical Information and Modeling*.
- FOPAE. (2011). “Escenario de daños en Bogotá por un sismo de la falla frontal de magnitud 7,0.” *Fondo de Prevención y Atención de Emergencia-Grupo Escenario de Daños*, 1–41.
- Fragiadakis, M., and Christodoulou, S. E. (2013). “Seismic reliability assessment of urban water networks.” *The Journal of the International Association for Earthquake Engineering*, 43(357–374).
- Gledhill, K., Ristau, J., Reyners, M., Fry, B., and Holden, C. (2011). “The Darfield (Canterbury) Earthquake of september 2010: Preliminary seismological report.” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(4), 215–221.
- Guzmán, A. (2011). “Estudio de la interacción suelo-tubería en las redes de agua potable y aguas servidas del Gran Concepción.”
- Hamada, M. (1992). “Damage assessment of lifeline systems in Japan.” *Proceedings of the 4th US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*, 321–333.
- HAZUS. (1999). “Hazard–MH 2.1 Multi-hazard Loss Estimation Methodology.” Technical Manual, FEMA, Washington, D.C.
- Higashide, T., Yabuguchi, T., Imai, T., and Koike, T. (2012). “Seismic performance assessment of expansion joints for water lifelines.” *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan*, 1457–1466.
- Hosseini, M., and Moshirvaziri, H. (2008). “A Procedure for Risk Mitigation of Water Supply System in Large and Populated Cities.” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.

- Hurricane Sandy Rebuilding Task Force. (2013). "Hurricane Sandy Rebuilding Strategy: Stronger Communities, A Resilient Region." *U.S. Department of Housing and Urban Development*.
- Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K., and Shirozu, T. (2000). "Seismic Damage Estimation Procedures for Water Supply Pipelines." *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 30 January-4 February, 2000*, 1–8.
- Javanbarg, M. (2008). "Integrated GIS-Based Seismic Performance Assessment of Water Supply Systems." University of Kyoto.
- Javanbarg, M. B., and Takada, S. (2009). "Seismic reliability assessment of water supply systems." *10th International Conference on Structural Safety and Reliability*, (MARCH 2013), 8.
- Jayaram, N., and Baker, J. W. (2009). "Deaggregation of lifeline risk: Insights for choosing deterministic scenario earthquakes." 357, 100.
- Kameda, H., Goto, H., and Kasuga, T. (1984). "System Reliability and Serviceability of Water Supply Pipelines Under Seismic Environment." *8th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Karamanos, S. A., Keil, B., and Card, R. J. (2014). "Seismic design of buried steel water pipelines." *Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability*, (2006), 1005–1019.
- Katayama, T., Kubo, K., and Sato, N. (1975). "Earthquake Damage To Water And Gas Distribution Systems." *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 396–405.
- Kazama, M., and Noda, T. (2012). "Damage statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage)." *Soils and Foundations*, Elsevier, 52(5), 780–792.
- Kimishima, K., Maruyama, Y., and Yamazaki, F. (2011). "Damage ratio of water pipes during the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki, Japan, earthquake." *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., 14, 212–219.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. (W. J. Hall, ed.), Prentice Hall.
- Manshoori, M. R. (2012). "Evaluation of Seismic vulnerability and failure modes for pipelines." *Iran Ministry of Petroleum*, 1–8.
- Maruyama, Y., and Yamazaki, F. (2010). "Construction of Fragility Curve for Water Distribution Pipes Based on Damage Datasets From Recent Earthquakes in Japan." (422).
- Menoni, S., Barbat, A. H., and Ober, G. (1997). "Seismic Risk Evaluation Through Integrated Use Of Geographical Information Systems And Artificial Intelligence

- Techniques.” *European Commission in the proceedings “ Seismic risk in the European Union - Volume II,”* (July 2016).
- Mimura, N., Yasuhara, K., Kawagoe, S., Yokoki, H., and Kazama, S. (2011). “Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - A quick report.” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(7), 803–818.
- Miranda, E. (2014). “Lessons Learned from the 2010 Haiti Earthquake for Performance-Based Design.” *Performance-based seismic engineering: Vision for an earthquake resilient society*, Springer, 117–127.
- Miyajima, M. (2013). “Damage to Water Supply Pipelines in the 2011 Great East Japan Earthquake.” *ASCE, International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*, 1, 205–212.
- Muñoz, D. (1989). “Conceptos básicos en riesgo sísmico.” *Física de la tierra*, (1), 199–215.
- Naba, S., Tsukiji, T., Shoji, G., and Nagata, S. (2012). “Damage assessment on water supply system and sewerage system at the 2011 off tthe Pacific Coast of Tohoku Earthquake - Case study for the data at Ibaraki and Chiba prefectures.” *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan*, 1487–1495.
- NAC. (2014). “Improving Lifelines: Protecting Critical Infrastructure for Resilient Counties.” *National Association of Counties*, (November).
- Nakamura, K. (2007). “A case study on how PIs should be applied -In evaluating seismic performance along with the water works guidelines-.” *Proceedings of the 5th AWWARF/JWWA Water System Seismic Conference, August 15-17, 2007*, 202–214.
- O’Rourke, M., and Ayala, G. (1993). “Pipeline damage due to wave propagation.” *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(9), 1490–1498.
- O’Rourke, M. J., and Liu, X. (1999). *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*.
- O’Rourke, T. (2010). “E. Lifeline Earthquake Engineering (Tom O’Rourke).”
- O’Rourke, T. D. (1998). “An Overview of Geotechnical and Lifeline Earthquake Engineering.” *American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication No. 75*.
- O’Rourke, T. D., Wang, Y., and Shi, P. (2004). “ADVANCES IN LIFELINE EARTHQUAKE ENGINEERING.” *13 th World Conference on Earthquake Engineering*, (5003).
- Okimura, T., Takada, S., and Koid, T. (1996). “Outline of the Great Hanshin earthquake, Japan 1995.” *Natural Hazards*, 14(1), 39–71.
- OMS. (2010). *El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile. Organización Panamericana de la Salud*, Santiago de Chile.

- Pineda, O., and Najafi, M. (2010). "Seismic Damage Estimation for Buried Pipelines: Challenges after Three Decades of Progress." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1(1), 19–24.
- Pitilakis, K. D., and Kakderi, K. G. (2011). "Seismic Risk Assessment and Management of Lifelines, Utilities and Infrastructures." *Proc: 5th International Conference on Earthquake Engineering*, 28.
- Poljanšek, K., Bono, F., and Gutiérrez, E. (2010a). *GIS-Based Method to Assess Seismic Vulnerability of Interconnected Infrastructure A case of EU gas and electricity networks*. Luxembourg.
- Poljanšek, K., Bono, F., and Gutiérrez, E. (2010b). *GIS-BASED METHOD TO ASSESS SEISMIC VULNERABILITY OF INTERCONNECTED INFRASTRUCTURE A case of EU gas and electricity networks*. Luxembourg.
- Porter, K. (2016). "A Beginner's Guide to Fragility, vulnerability, and Risk." *University of Colorado Boulder*, 92.
- Rinaldi, S. M. (2004). "Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies." *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. Proceedings of the*, 0(C), 1–8.
- Rodríguez-Avellaneda, A. H. (2011). "Análisis y Evaluación de Riesgo Sísmico en líneas vitales. Caso de estudio Bogotá D.C." Universidad Nacional de Colombia.
- Sandi, H. (1986). "EAEE Working group on Vulnerability and Risk Analysis for Individual Structures and for Systems." *Proc. 8th European Conf. on Earthquake Engineering*.
- Sandi, H., Pomonis, A., Francis, S., Georgescu, E., Mohindra, R., and Borcia, I. S. (2007). "Seismic vulnerability assessment. Methodological elements and applications to the case of Romania." *Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation*.
- Shi, P., Wang, Y., and Fan, K. (2008). "Seismic Response of Buried Pipelines To Surface Wave Propagation Effects." *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Shinozuka, M., Takeda, S., and Ishikawa, H. (1978). *Some aspects of seismic risk analysis of underground lifelines systems*.
- Smyrou, E., Tasiopoulou, P., Bal, I., Gazetas, G., and Vintzileou, E. (2011). "Structural and geotechnical aspects of the Christchurch (2011) and Darfield (2010) earthquakes in New Zealand." *Seventh National Conference on Earthquake Engineering, 30 May-3 June, Istanbul, Turkey*, 1–12.
- SPUR. (2009). "The resilient city: A new framework for thinking about disaster planning in San Francisco." *The Urbanist, Policy Initiative*.
- Stone, W. C., Yokel, F. Y., Celebi, M., Hanks, T., and Levendecker, E. V. (1987). *Engineering Aspects of the September 19, 1985 Mexico Earthquake*. Washington, D.C.

- United Nations, and ISDR, I. S. for D. R. (2004). *Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. Strategy*.
- Yoo, D. G., Kang, D., and Kim, J. H. (2016). “Optimal design of water supply networks for enhancing seismic reliability.” *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, 146, 79–88.
- Zohra, H. F., Mahmoud, B., and Luc, D. (2012). “Vulnerability assessment of water supply network.” 18, 772–783.