

Riesgo sísmico en infraestructura subterránea



GR&R

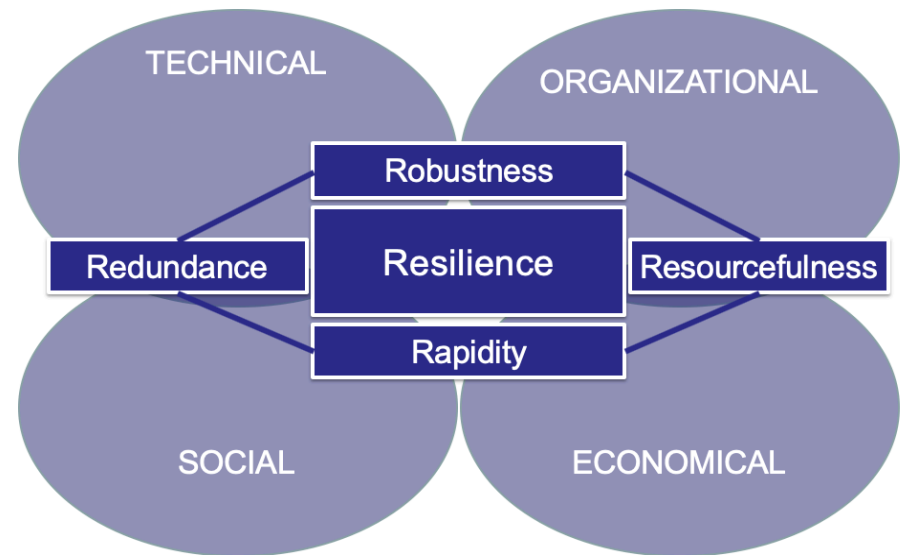
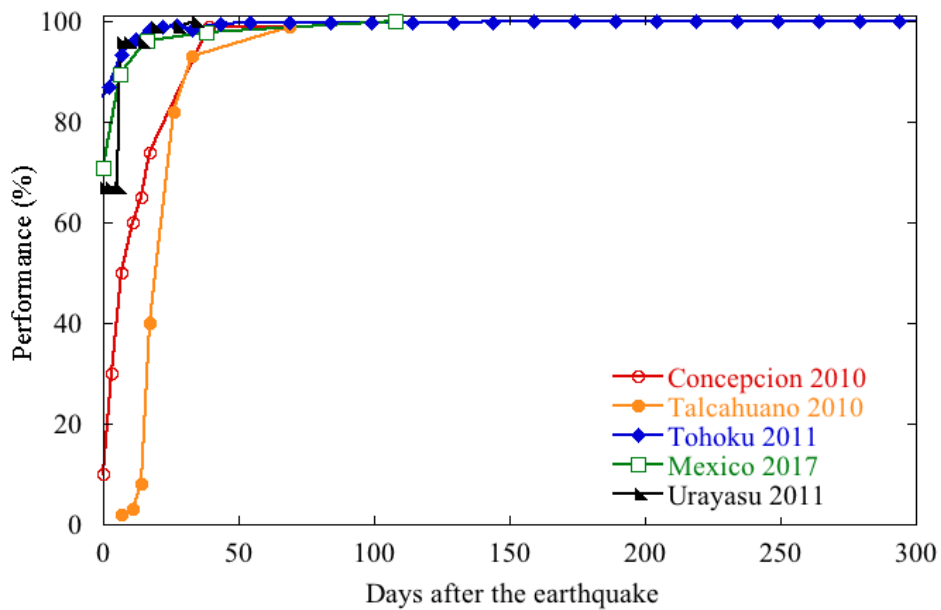
Yolanda Alberto

GeoRisk & Resilience



Un grupo de investigación de la Universidad de Chile que lleva a cabo investigación sobre amenazas geotécnicas, reducción del riesgo de desastres, prevención y resiliencia.

Resiliencia





Tuberías en Wall and Williams Streets, New York, 1917

Tuberías e infraestructura crítica

- Las redes de agua potable, servida, combustible e incluso de telecomunicaciones están compuestas en mayor medida por tuberías
- Dado el número de tuberías y su distribución en grandes áreas, son muy vulnerables



We're Living in the Golden Age of Tunneling

Túneles

- Los túneles se utilizan en diferentes sectores, como el sanitario, de transporte y minero
- 30 de los túneles más largos del mundo se han construido en este siglo

Recolección de datos: Emergencia + Reconstrucción



Chile
Maule 2010



Japón
Tohoku
2011



México
Puebla
2017



Sismos en Chile, Japón, México

Chile 2010	Japón 2011	México 2017
▪ 27 de febrero, 3:34 ▪ M_w 8.8 ▪ Sismo de subducción y tsunami ▪ Más de 130 réplicas $M > 6$	▪ 11 de marzo, 14:46 ▪ M_w 9.0 ▪ Sismo de subducción y tsunami 40.5 m ▪ Accidente nuclear en Fukushima ▪ Más de 1235 réplicas	▪ 19 de septiembre, 13:15 ▪ M_w 7.1 ▪ Sismo de intraplaca ▪ 12 días después del sismo de Chiapas (M_w 8.2) ▪ 32 años después del sismo de 1985 (M_w 8.5)

Sismos en Chile, Japón, México

Chile 2010



Japón 2011

- 11 de marzo, 14:46
- M_w 9.0
- Sismo de subducción y tsunami 40.5 m
- Accidente nuclear en Fukushima
- Más de 1235 réplicas

México 2017

- 19 de septiembre, 13:15
- M_w 7.1
- Sismo de intraplaca
- 12 días después del sismo de Chiapas (M_w 8.2)
- 32 años después del sismo de 1985 (M_w 8.5)

Sismos en Chile, Japón, México

Chile 2010



Japón 2011



México 2017

- 19 de septiembre, 13:15
- M_w 7.1
- Sismo de intraplaca
- 12 días después del sismo de Chiapas (M_w 8.2)
- 32 años después del sismo de 1985 (M_w 8.5)

Sismos en Chile, Japón, México

Chile 2010



Japón 2011



México 2017



Daño geotécnico

Chile 2010	Japón 2011	México 2017
▪ Deslizamientos y falla de taludes ▪ Licuación cerca de los bancos del Bío-Bío ▪ Desplazamiento lateral ▪ Asentamientos ▪ Efectos de sitio en Santiago	▪ Licuación extensiva ▪ Desplazamiento lateral ▪ Subsistencia ▪ Grietas	▪ Efectos de sitio ▪ Asentamiento ▪ Asentamiento regional ▪ Socavones ▪ Grietas

Daño geotécnico

Chile 2010



Batty, et al. (2010)



Eidinger (2010)

Japón 2011

- Licuación extensiva
- Desplazamiento lateral
- Subsistencia
- Grietas

México 2017

- Efectos de sitio
- Asentamiento
- Asentamiento regional
- Socavones
- Grietas

Daño geotécnico

Chile 2010



Batty, et al. (2010)



Eidinger (2010)

Japón 2011



México 2017

- Efectos de sitio
- Asentamiento
- Asentamiento regional
- Socavones
- Grietas

Daño geotécnico

Chile 2010



Batty, et al. (2010)



Eidinger (2010)

Japón 2011



México 2017



Daño geotécnico en México

Colonia del Mar, al sureste de la Ciudad de México con problemas de asentamiento regional debidos a la extracción de agua del subsuelo

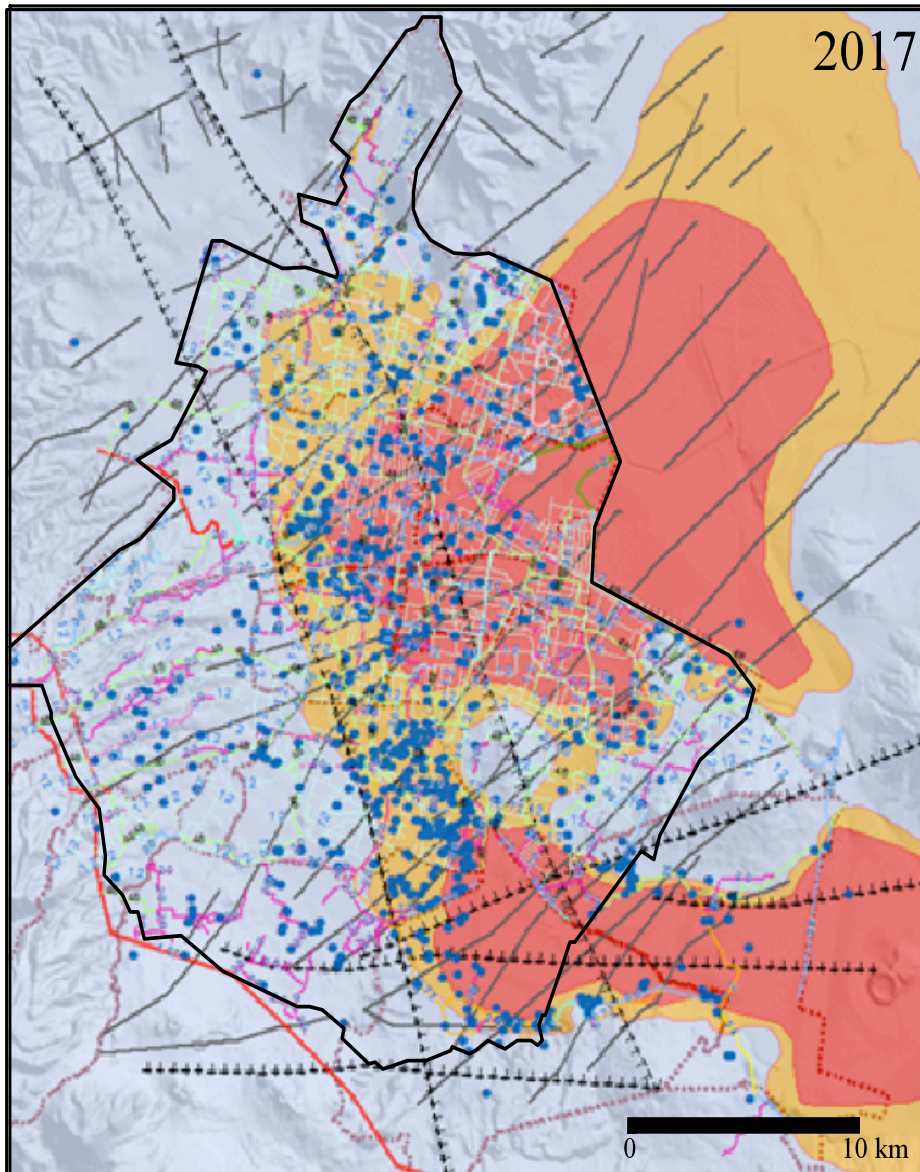


Daño en el sistema de agua

- 6 millones de personas sin suministro de agua
- 3.3 millones en la ciudad de México
- Se requirieron reparaciones de un total de 77 km de tubería

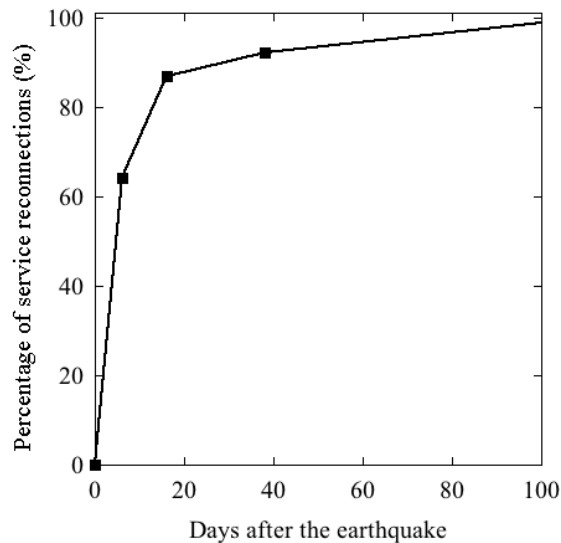
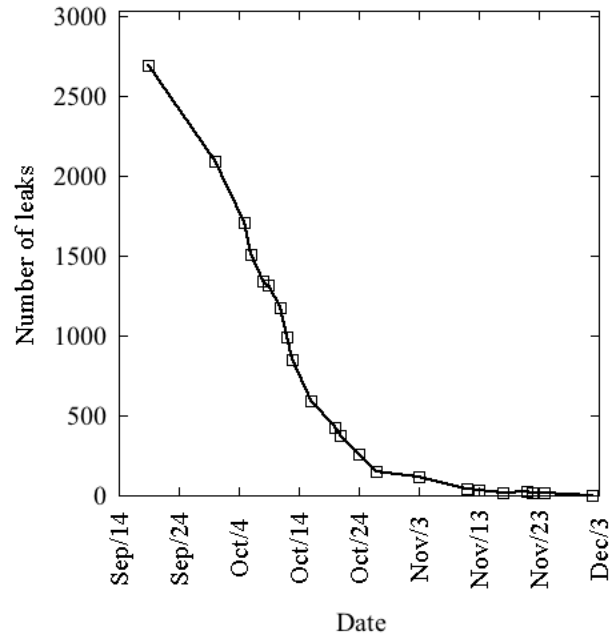


Daño en el sistema de agua de la Ciudad de México



- Las delegaciones de Iztapalapa y de Tláhuac fueron las más afectadas
- Se reportaron más de 2700 fugas en el sistema
- Tomó más de 100 días alcanzar el 98% de la reconexión

Daño en el sistema de agua de la Ciudad de México



- Las delegaciones de Iztapalapa y de Tláhuac fueron las más afectadas
- Se reportaron más de 2700 fugas en el sistema
- Tomó más de 100 días alcanzar el 98% de la reconexión

Daño en el sistema de agua de la prefectura de Chiba en Japón

Tierra reclamada

City	Water pipelines (km)	Number of breakages	Damage rate (Breakage/km)
Chiba	2,072	45	0.017
Ichihara	1,141	1	0.001
Funabashi	1,397	43	0.031
Narashino	178	24	0.135
Kamagaya	318	0	0.000
Narita	101	3	0.030
Ichikawa	1,027	10	0.019
Matsudo	1,143	5	0.004
Urayasu	300	321	1.070
Total	8,307	461	0.055



Daño en el sistema de agua de Urayasu



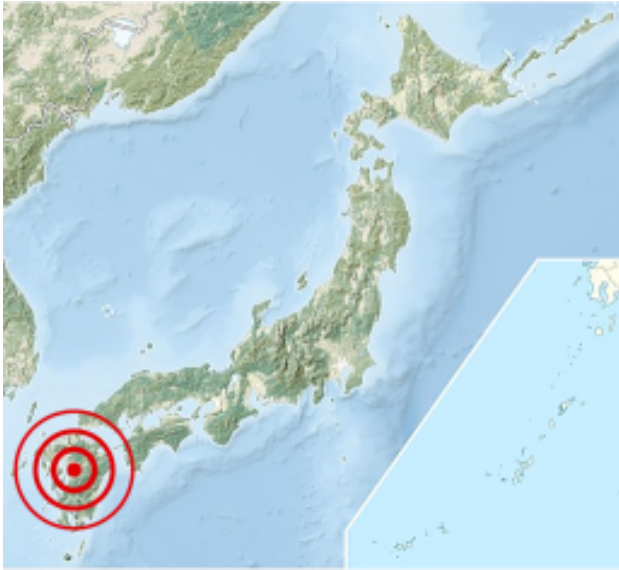
- 607 rupturas
- 1.07 ruptura/km
- 24% fallas en tuberías $\phi 100$
- 44% fallas en tuberías de vinil
- Contaminación por licuación

	Usuarios sin servicio
Áreas afectadas	1,800,000
Prefectura de Chiba	370,000
Urayasu	33,000

Sismos de Kumamoto de 2016

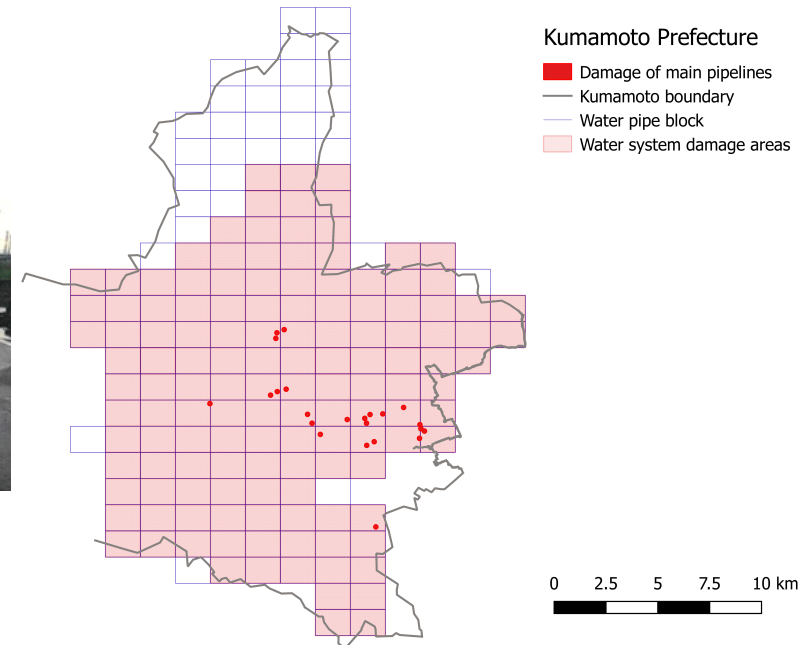
14 de abril, $M_w=6.2$

16 de abril, $M_w=7.0$



Daño en el sistema de agua de Kumamoto

	Usuarios sin agua
Prefectura de Kumamoto	445,000
Ciudad de Kumamoto	327,000
Mashiki	11,000



Daño en túneles de Kumamoto



- El sistema de transporte fue afectado por deslizamientos, fallas, y licuación.
- En el área de Ohashi colapsaron puentes, caminos y vías de tren.
- El túnel de Tawarayama, en Minami Aso, tuvo daños en la bóveda y rasante, a 430 m del portal



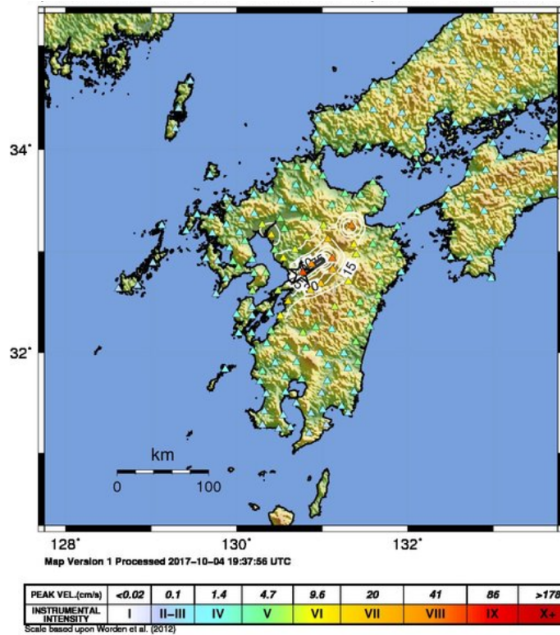
Daño en túneles de Kumamoto



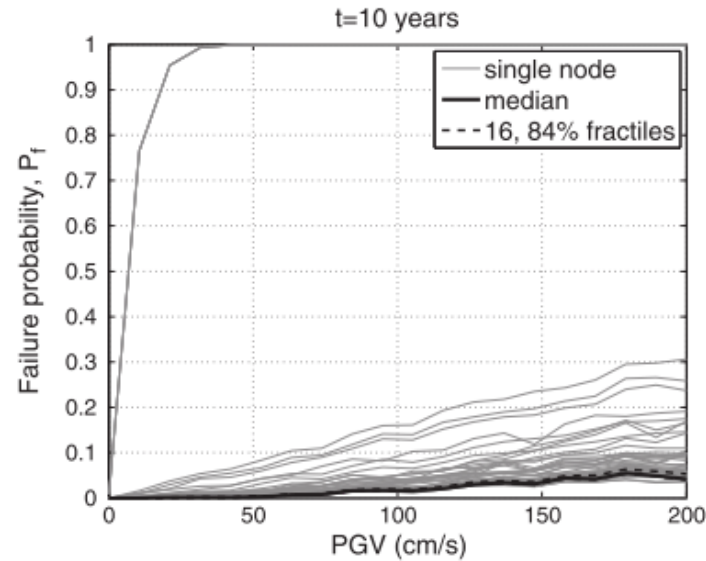
- En el lado de la villa de Nishihara, a 100 m del portal, la superficie de la base mostró pandeo
- Este daño es similar a otros presentados en túneles en sismos japoneses

Evaluación de riesgo sísmico

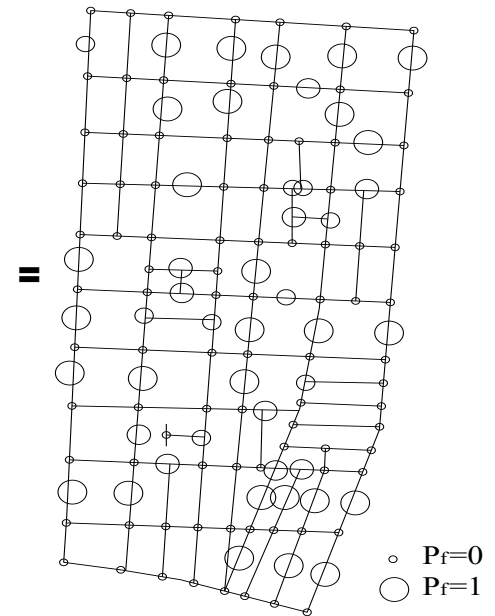
Hazard



Fragility curves

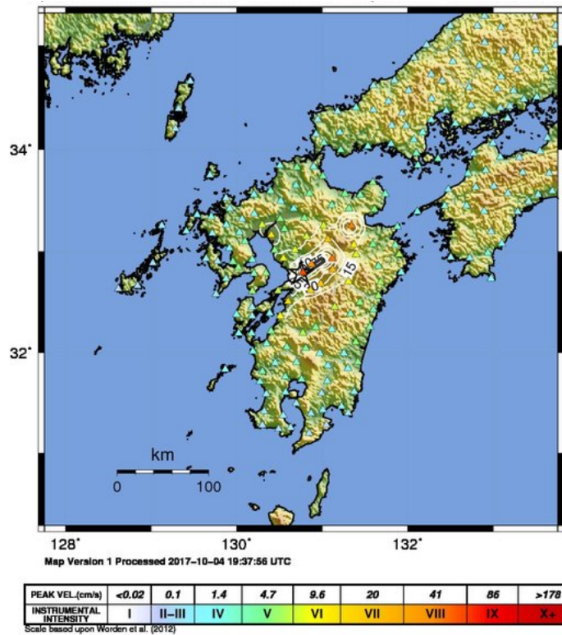


Damage of components

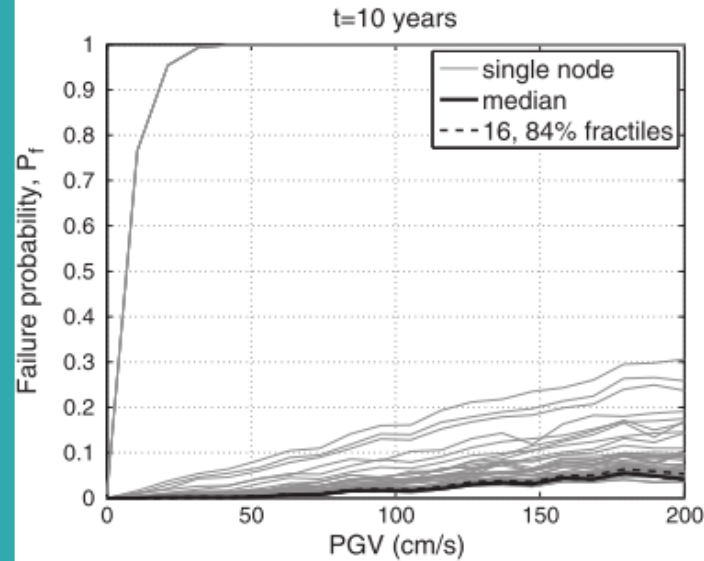


Evaluación de riesgo sísmico

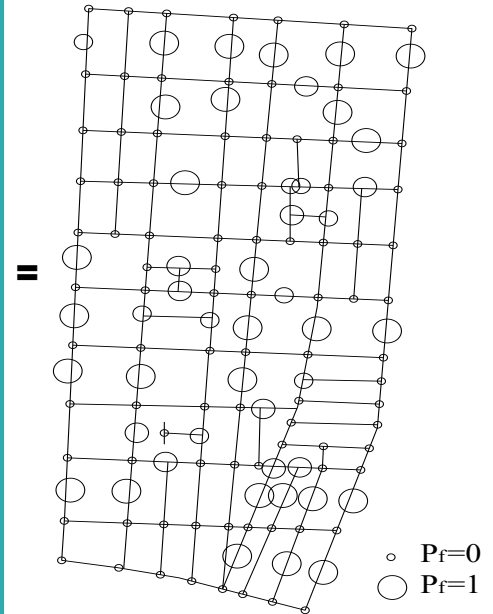
Hazard



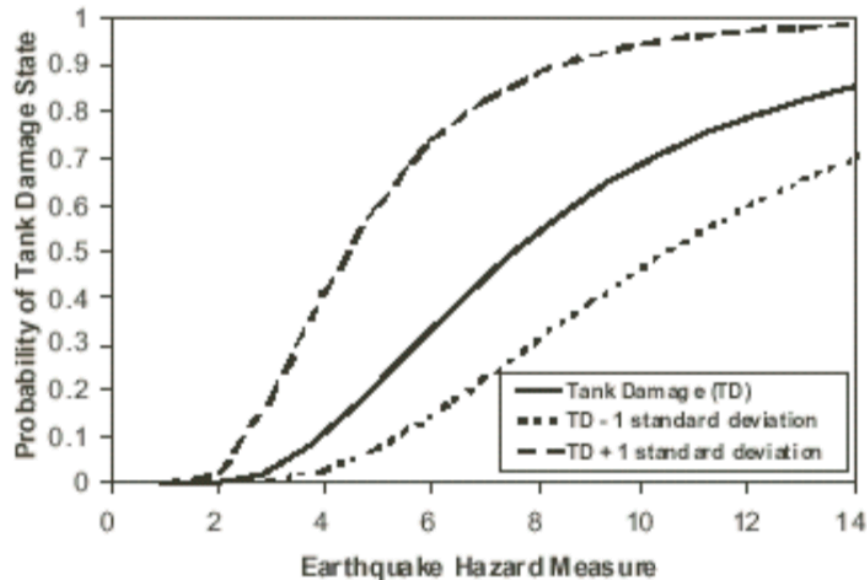
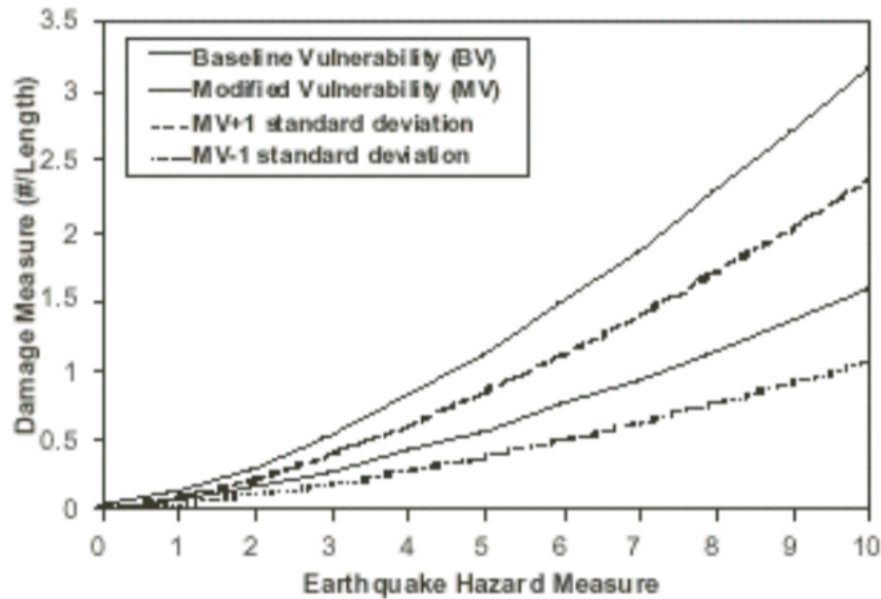
Fragility curves



Damage of components



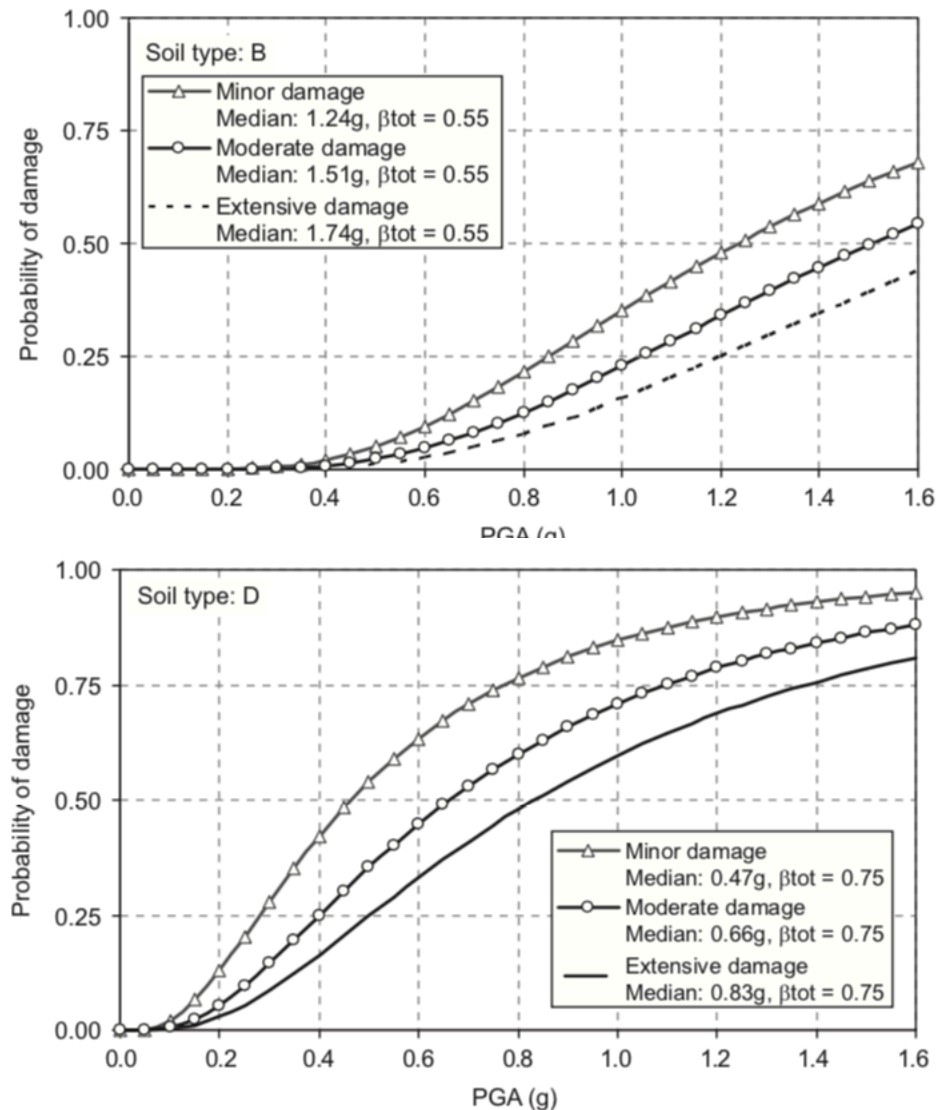
Curvas de fragilidad



- A diferencia de las curvas de vulnerabilidad, tienen un enfoque probabilístico
- Otorgan una probabilidad de falla en función de una intensidad sísmica
- Pueden ser empíricas, numéricas, híbridas

Curvas de fragilidad en túneles

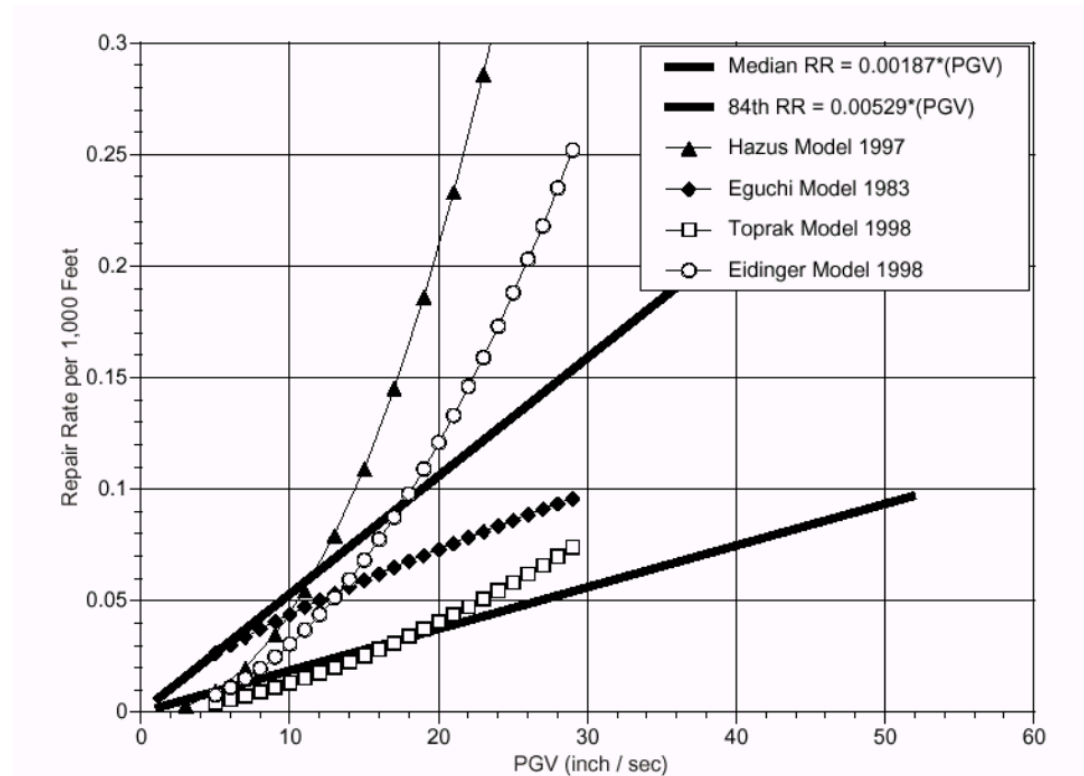
- El programa HAZUS incluye diferentes curvas de fragilidad para túneles, considerando el movimiento del suelo y fallas causadas por deslizamientos
- Trabajos del Prof. Felipe Ochoa en la Universidad de Chile y del Prof. Gabriel Candia en la Universidad del Desarrollo



Argyroudis and Pitilakis (2012)

Curvas de fragilidad en tuberías (ALA, 2001)

- Basadas en el diámetro (pequeño o grande) y material
- Factor de corrección por tipo de suelo
- Las curvas indican tasa de reparación o tasa de daño

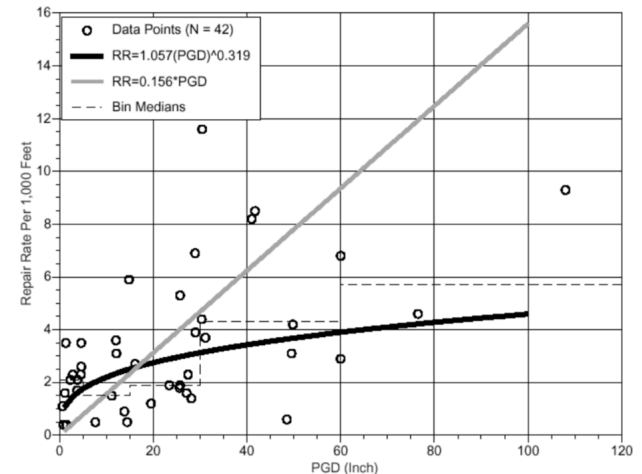
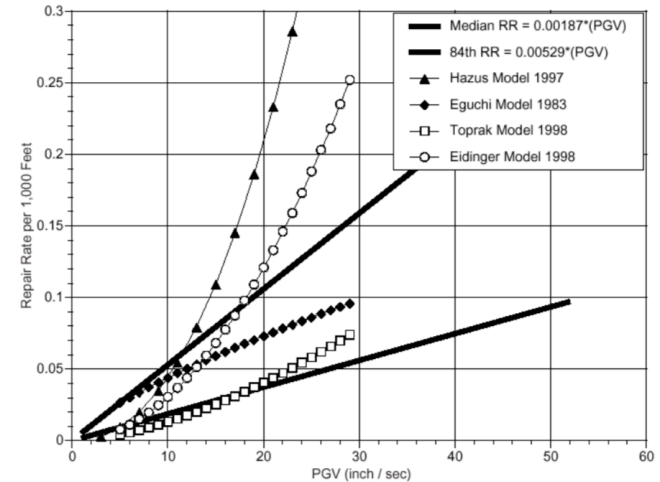


Curvas de vulnerabilidad

- Generalmente en función de la intensidad sísmica y de la tasa de reparación (RR) o la tasa de daño (D_i)
- Dos tipos de amenaza sísmica: propagación de ondas (PGV) y deformación permanente de suelo (PGD)
- Requiere datos de daño que incluyan material, diámetro, tipo de tubería (segmentada o continua) y tipo de suelo

$$RR = K_1(0.00187)PGV$$

$$RR = K_2(1.06)PGD^{0.319}$$

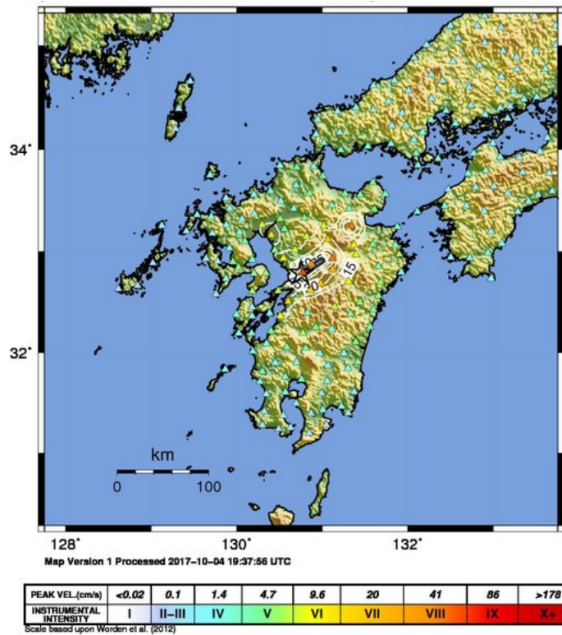


Resumen curvas de fragilidad

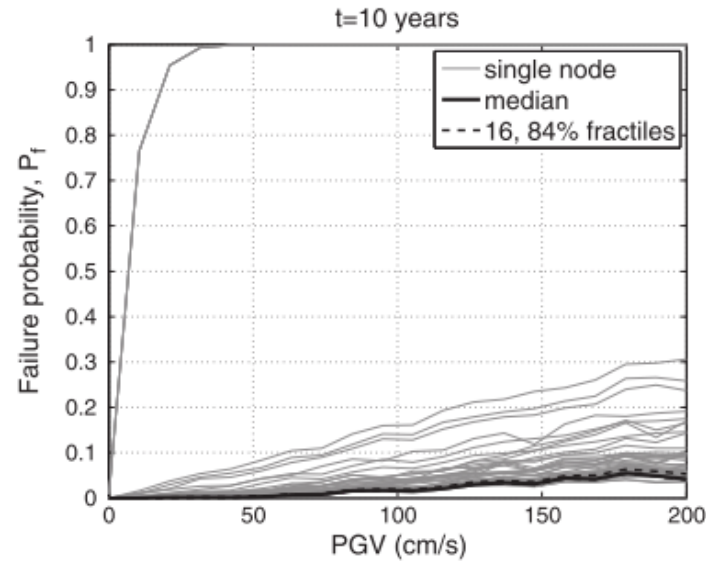
Pipe vulnerability functions	Input earthquake database and country	PGV	Pipe material	Pipe diameter	Damage rate (number per km)
JWWA (1998)	Kobe EQ. (1995), Japan	Maximum	CIP	$D \leq 800$ mm	$3.11 \times 10^{-3} (PGV - 15)^{1.3}$
Toprak (1998)	Northridge (1994), USA	Maximum	CIP	$D \leq 600$ mm	$10^{(1.62 \times \log(PGV) - 3.64)}$
HAZUS (1999)	4 Mexican and 2 American EQs., Mexic and USA	Maximum	Brittle mix-CIP	Mix	$0.0001 \times PGV^{2.25}$
T. O'Rourke and Geon (2000)	Northridge (1994), USA	Geometric mean	CIP	$D \leq 600$ mm	$e^{(1.09 \times \ln(PGV) - 6.12)}$
T. O'Rourke and Geon (2000)	Northridge (1994), USA	Maximum	CIP	$D \leq 600$ mm	$e^{(1.21 \times \ln(PGV) - 6.78)}$
Takada et al. (2001)	Kobe EQ. (1995), Japan	Maximum	CIP	$D \leq 600$ mm	$0.000063 \times PGV^{2.1}$
ALA (2001)	18 EQs. All over the world	Geometric mean	Brittle mix-CIP	Mix	$1.3 \times 0.00187 \times PGV$
JWWA (1998)	Kobe EQ. (1995), Japan	Maximum	DIP	$D \leq 800$ mm	$7.03 \times 10^{-6} (PGV - 15)^{2.19}$
JWWA (1998)- high possibility of liquefaction	Kobe EQ. (1995), Japan	Maximum	DIP	$D \leq 800$ mm	$2.9 \times 7.03 \times 10^{-6} (PGV - 15)^{2.19}$
HAZUS (1999)	Northridge (1994), USA	Maximum	Brittle mix-DIP	Mix	$0.3 \times 0.0001 \times PGV^{2.25}$
T. O'Rourke and Geon (2000)	Northridge (1994), USA	Maximum	DIP	$D \leq 600$ mm	$e^{(1.84 \times \ln(PGV) - 9.40)}$
Takada et al. (2001)	Kobe EQ. (1995), Japan	Maximum	DIP	$D \leq 600$ mm	$0.3 \times 0.000063 \times PGV^{2.1}$
ALA (2001)	18 EQs. All over the world	Geometric mean	Brittle mix-DIP	Mix	$0.5 \times 0.00187 \times PGV$
M. O'Rourke and Deoye (2004) - S wave	Mexican and American EQs., Mexic and USA	Maximum	Brittle mix	Mix	$0.0035 \times PGV^{0.92}$
M. O'Rourke and Deoye (2004) - R wave	Mexican and American EQs., Mexic and USA	Maximum	Brittle mix	Mix	$0.034 \times PGV^{0.92}$

Evaluación de riesgo sísmico

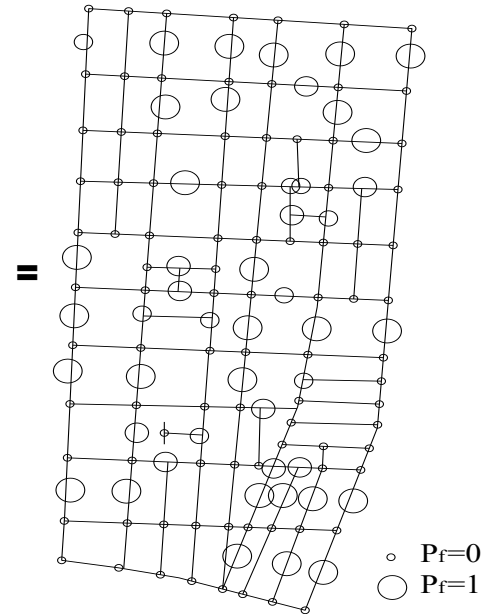
Hazard



Fragility curves



Damage of components



Carga sísmica en infraestructura subterránea

- Estructuras arriba de la superficie tienen un “filtro” inercial en el movimiento de suelo incidente
- Las estructuras subterráneas están predominantemente afectadas por la deformación del suelo circundante
- Los efectos de interacción suelo-estructura son generalmente despreciados
- Uno de los puntos críticos es la definición adecuada del movimiento de suelo de entrada que no es fácilmente deducido de la representación espectral estándar de las acciones sísmicas (PGA)



Kuwata (2015)

Modos de falla en tuberías

- Los modos de falla que llevan a tener fisuras o filtraciones son el aflojamiento de las juntas, las grietas circunferenciales y la corrosión
- Los modos de falla que llevan a la ruptura son las grietas longitudinales, divisiones articulares y pequeñas rupturas en tuberías



Dos tipos de acciones sísmicas

TGD

- Deformación transitoria
- También ocasionada por la propagación de ondas

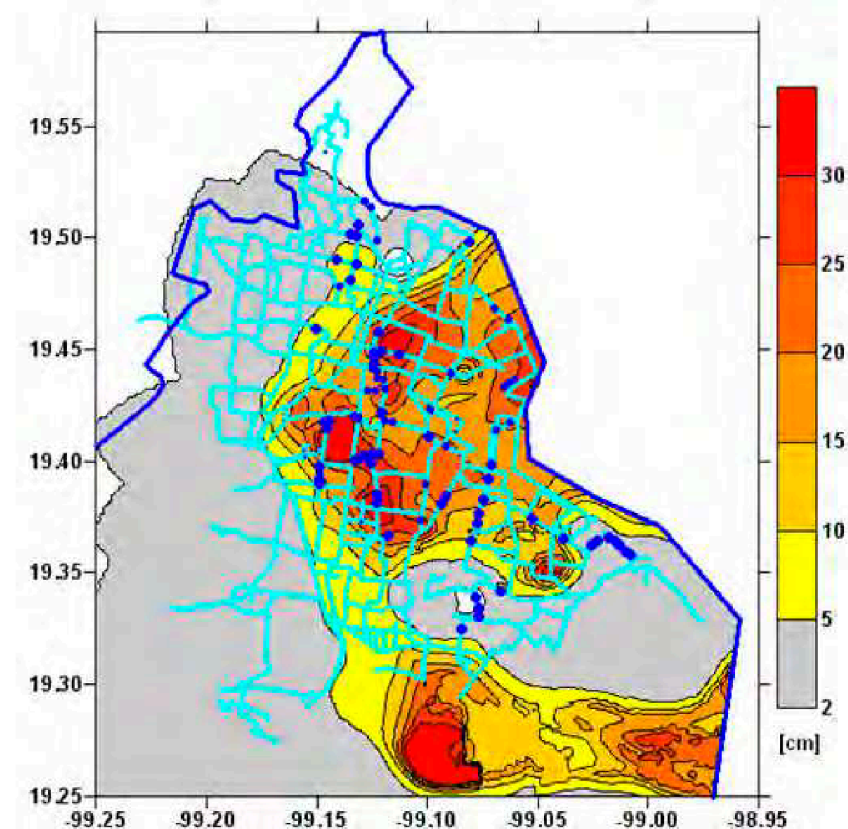
PGD

- Rupturas de fallas
- Licuación
- Desplazamiento lateral
- Deslizamientos

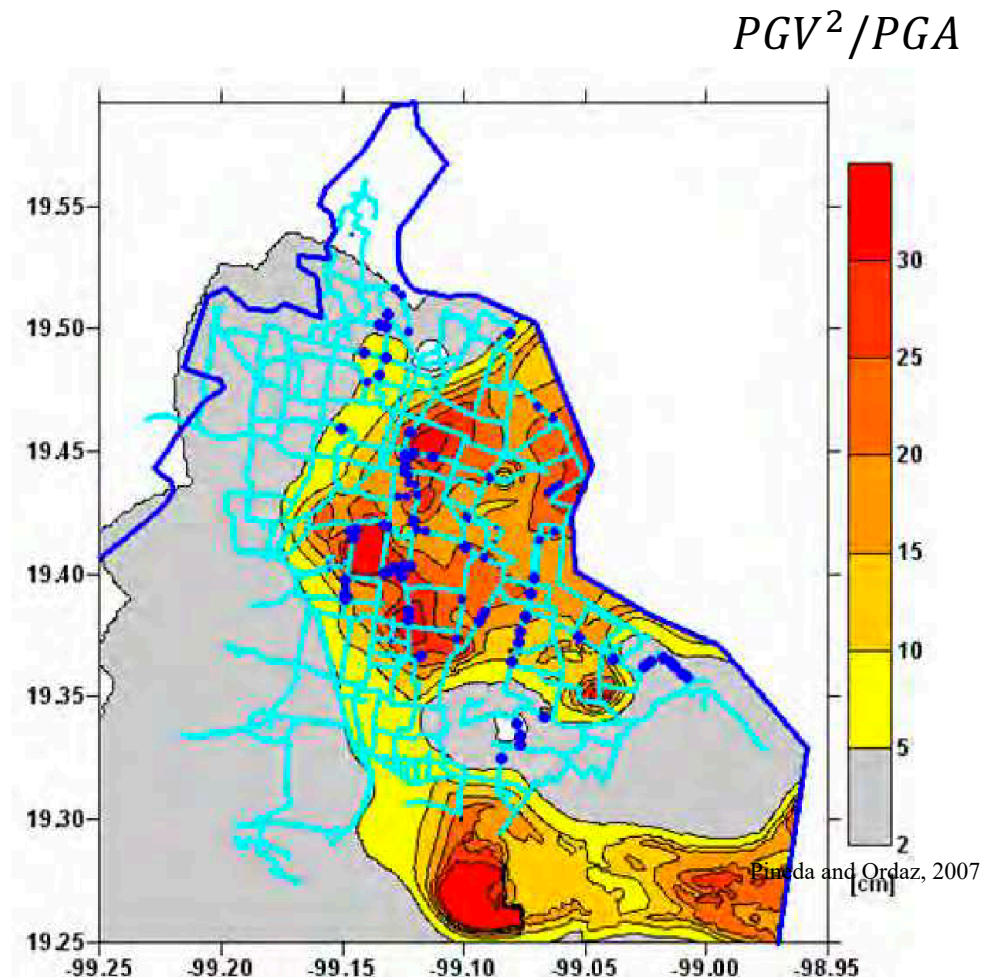
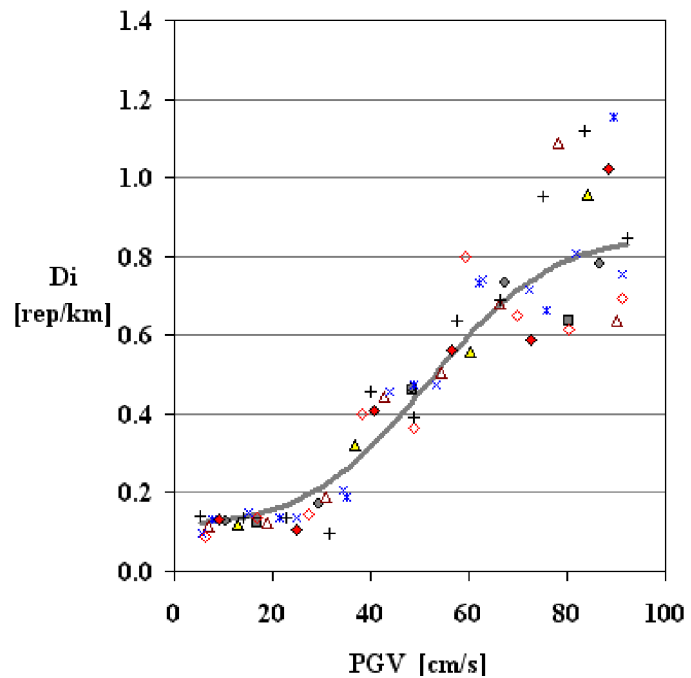
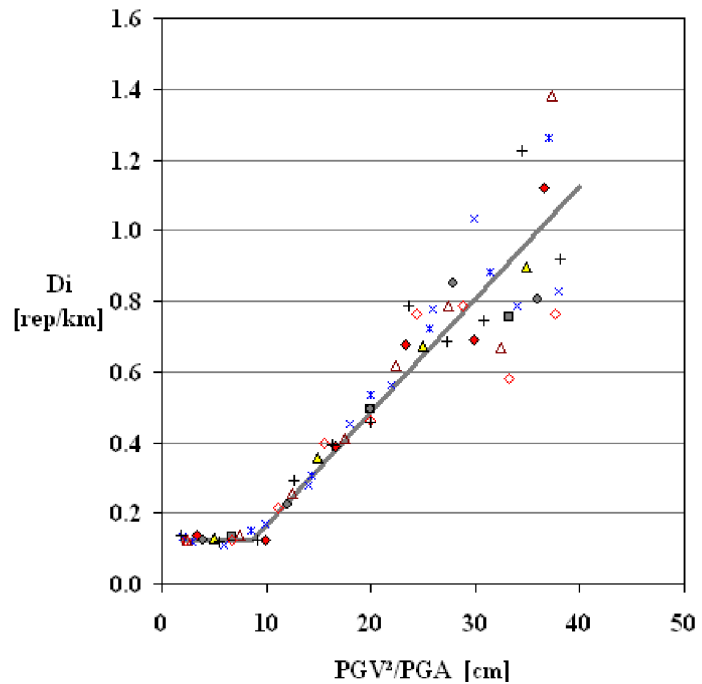


Deformación en estructuras subterráneas

- Los sismos pueden causar deformación transitoria de suelo (TGD) o deformación permanente del suelo (PGD).
- TGD (definido por PGV, velocidad máxima) es la respuesta dinámica del suelo y PGD es el movimiento irrecuperable que persiste después del sismo.
- El daño por PGV puede ser muy significativo si hay efectos de sitio



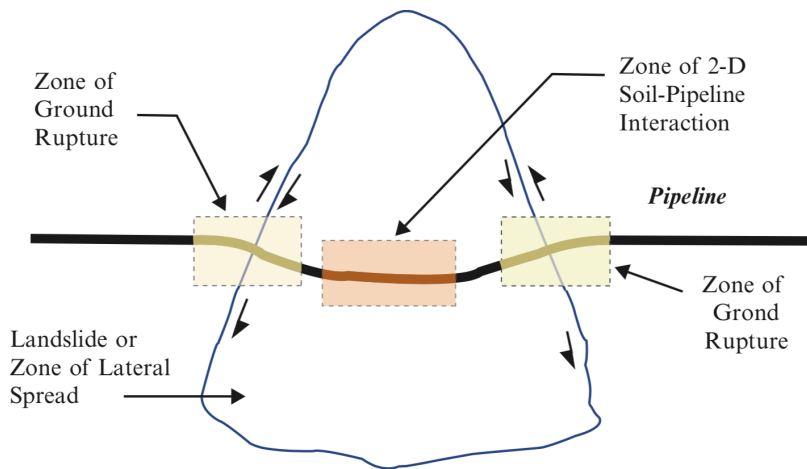
Curvas de la Ciudad de México



Pineda-Porras y Ordaz (2002)

Deformación de suelo permanente, PGD

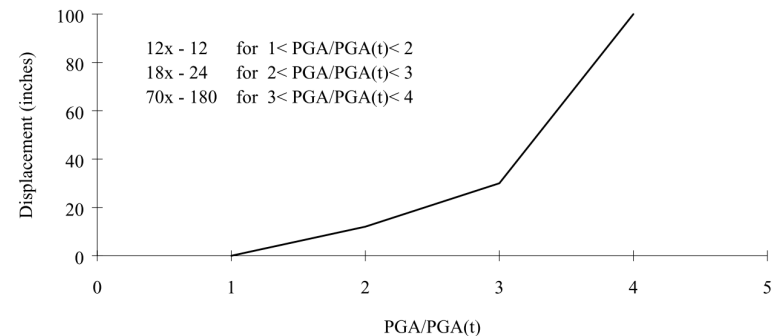
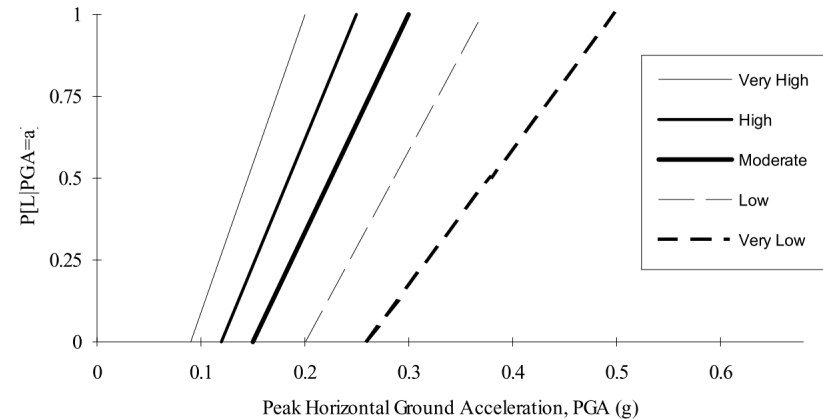
- Causas: fallas, subsidencia y levantamiento tectónico, licuación, deslizamientos y densificación de suelos granulares sueltos
- Deformación de tuberías causada por licuación sucede por desplazamientos laterales, fallas de flujo, subsidencia local, consolidación post-licuación, pérdida de capacidad de carga, etc.
- El daño por PGD es localizado pero es muy severo, lo que provoca más daño en estructuras enterradas
- Los patrones de desplazamiento de suelo asociados con sismos dependen de la Fuente del PGD, el tipo de suelo, la profundidad del nivel freático, taludes, intensidad y duración del sismo



O'Rourke (2002)

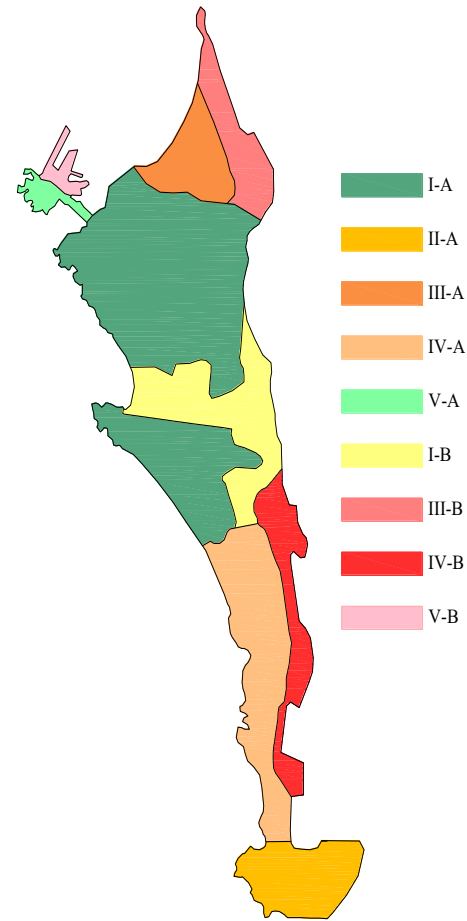
Licuación

- El análisis de licuación debe proveer un estimado de la probabilidad de que un sitio específico se licúe y, si lo hace, proporcione también la cantidad de deformación de suelo permanente (PGD) esperada.
- PGD puede ser vertical (asentamiento) u horizontal (desplazamiento lateral), o una combinación de ambos. Para una combinación, el vector de suma de PGD debe ser utilizado en las curvas de fragilidad.



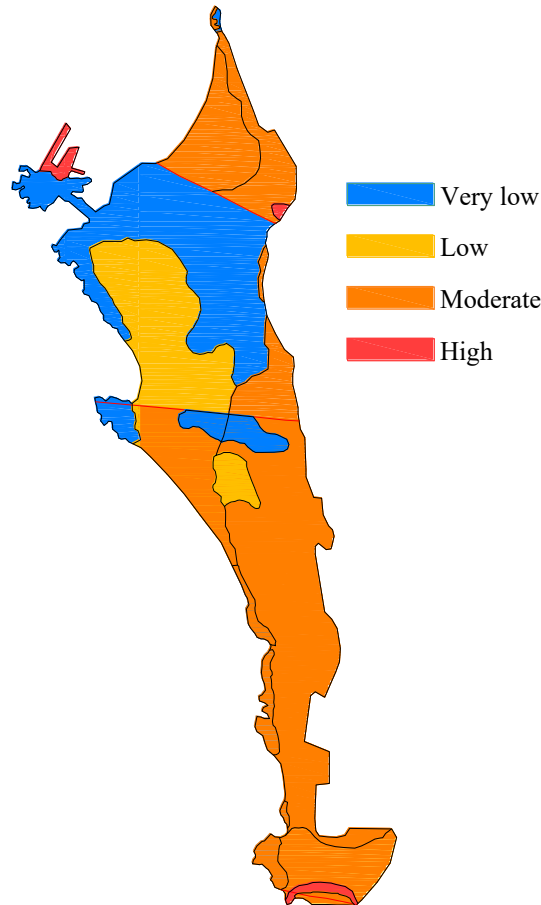
Youd and Perkins (1978)

Cómo hacer mapas de riesgo de licuación



Zonificación sísmica
Suelos A: Período
mesozoico
Suelos B: Depósitos
eólicos y marinos

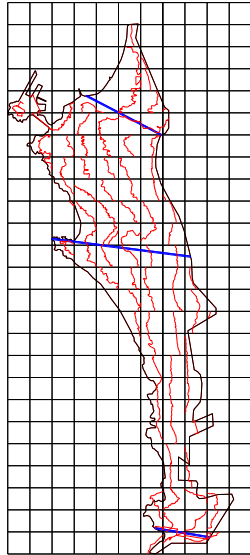
Riesgo de licuación



- Existen diversos métodos para realizar un mapa de riesgo de licuación.
- Uno de los más básicos consiste en analizar la geología y las aceleraciones máximas esperadas en la superficie del terreno.
- Para ello Youd and Perkins (1978) y Wakamatsu (1992) tienen parámetros definidos para identificar riesgo algo, moderado, bajo y muy bajo.

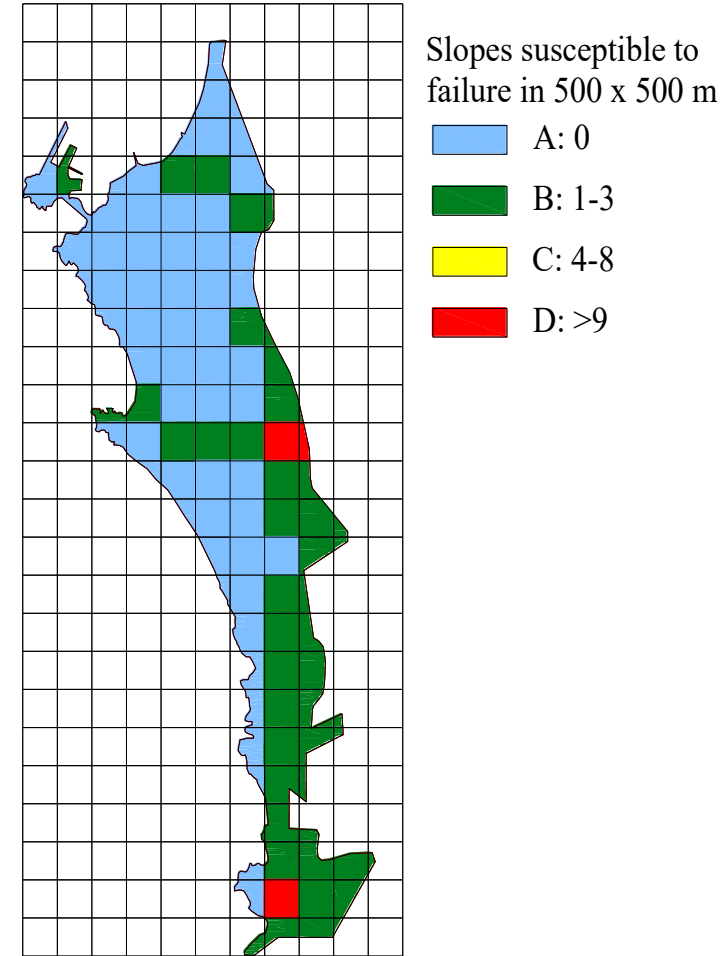
Deslizamientos de suelo

1. Definir áreas de 500 m x 500 m
2. Evaluación geológica
3. Método de la Prefectura de Kanagawa
4. Identificación de zonas susceptibles



7 factores a considerar:

- Aceleración máxima en la superficie
- Tipo de suelo
- Fallas
- Tipo de pendiente
- Elevación
- Existencia de taludes artificiales
- Longitud



Retos para la evaluación de riesgo en infraestructura subterránea

- Obtención de datos de las propiedades del suelo en diferentes áreas
- Desarrollo de mapas de riesgo sísmico que incluyan los parámetros de intensidad relacionados con el daño (PGA, PGV, PGD)
- Definir diferentes niveles considerando el comportamiento físico de la estructura y su nivel de deterioro





¿Preguntas?

Información de contacto
yalberto@uchile.cl
+56-2-2977-7510
Edificio Civil, Of. 432