

## **CAPÍTULO 6**

### **ESTUDIO DE CASO**

El estudio de caso se centra en un sistema de producción de agua potable ubicado en la región norte-central de Venezuela, en la zona de interacción de las placas tectónicas del Caribe y América del Sur. Además de las fallas geológicas reconocidamente activas (figura 2.1), en el área de interés corre la cordillera de la costa en sentido este-oeste, con alturas de hasta 2.765 m (pico Naiguatá).

El sistema considerado, proyectado a inicios de la década de 1960, es uno de los que suministra agua potable a la ciudad de Caracas (4 millones de habitantes), ubicada en un valle a 950 m sobre el nivel del mar (Pieretti 1965).

#### **GEOLOGÍA GENERAL DE LA REGIÓN**

Desde el punto de vista geológico, el norte de Venezuela se encuentra en una zona de montañas jóvenes que están ascendiendo en relación con el nivel del mar. Aunque lentamente, tal ascenso se manifiesta en cambios topográficos, por ejemplo, el perfil de la cordillera este-oeste, paralela a la línea de costa, en su cara hacia el mar, permite ver intermitencias de erosión marina, hoy fuera del mar (Schubert 1977).

En la cara que mira hacia Caracas no se constatan terrazas de erosión marina; su perfil es escarpado e interrumpido abruptamente por el valle hoy urbanizado. Hacia el sur, este valle está bordeado por serranías geológicamente diferentes a las del norte y sus rocas son más blandas que las de la parte norte de la cordillera de la costa.

Estas serranías se extienden hasta más al sur de los valles del río Tuy, denominada serranía del sur o del interior. Entre esta serranía y la cordillera de la costa hay una zona de fallas, consecuencia del movimiento desigual de ambos bloques (figura 6.1).

#### **ANTECEDENTES DE INESTABILIDAD DE SUELOS Y LADERAS EN LA REGIÓN**

##### **Origen sísmico**

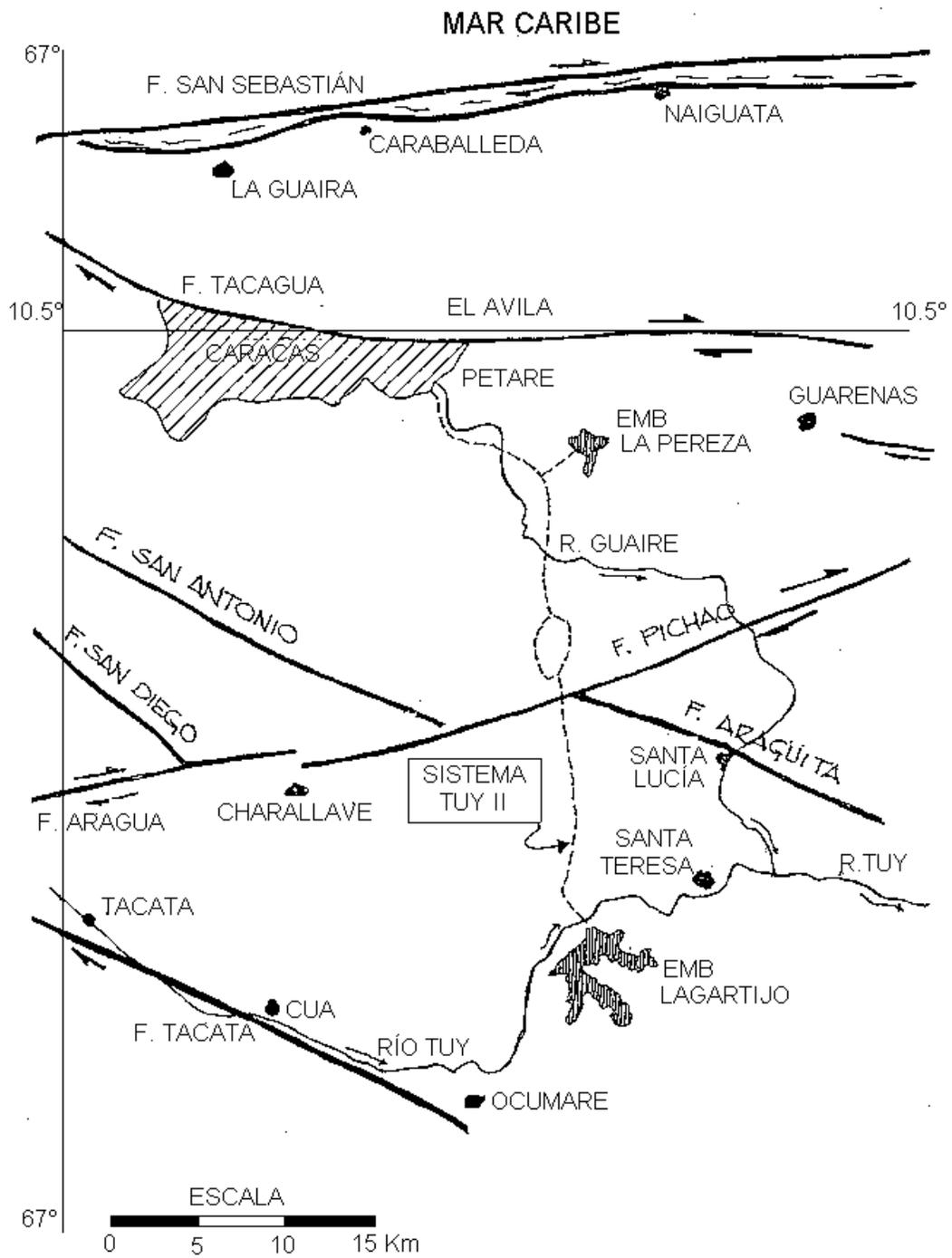
Singer y otros (1993) señalaron avalanchas de peñones en tiempos prehistóricos (1100-1500 DC), probablemente vinculadas a actividad sísmica en las siguientes áreas del valle de Caracas: El Pedregal-La Castellana, Altamira, San Michele-Parque del Este. Igualmente, reportaron subsidencia en el área Altamira-Los Palos Grandes durante el pleistoceno o tal vez más reciente (holoceno). Estos deslizamientos y caídas de rocas por sismos desde la cordillera que bordea el norte de la ciudad también se describen en fechas inmediatamente posterior al terremoto del 23 de marzo de 1812.

En el cuadro 6.1 se hace referencia a deslizamientos de suelos en el área de Caracas y sus alrededores como consecuencia de sismos pasados. En el cuadro 6.2 se presentan fenómenos de licuefacción y hundimiento debidos al mismo fenómeno.

**Cuadro 6.1**  
**Deslizamientos en el área de Caracas y alrededores debido a sismos**

<b>Fecha</b>	<b>Ms</b>	<b>Breve descripción</b>
1900-10-29	7,6	Deslizamientos en la carretera Caracas-Guatire-Caucagua.
1967-07-29	6,5	Deslizamiento en Araira, Estado Miranda; derrumbes en la carretera vieja de Guarenas y en algunos tramos de la carretera Panamericana: Caracas-Los Teques. Caída de rocas en la carretera Macuto-Naiguatá y deslizamientos de rocas y suelos entre La Colonia Tovar y Carayaca.

Fuentes: Singer 1993; Hanson y Degenkolb 1996; y Grases 1980.



**Figura 6.1**  
**stema Tuy II y fallas tectónicas**

**Cuadro 6.2**  
**Fenómenos de licuefacción y hundimiento reportados en el área de Caracas y alrededores debido a sismos**

Fecha	Breve descripción
1878-04-12	Fenómeno de licuefacción en la quebrada Pitahaya, cerca de Charallave y en la quebrada La Culebra, cerca de Cúa. Asentamiento del terreno a orillas del río Tuy, cerca de Cúa.
1900-10-29	Dudas sobre rupturas de superficie en el área Los Moriches, al sur de Guarenas-Guatire. Probables fenómenos de licuefacción y desparramamiento lateral en la vía férrea de Carenero a río Chico, en río Chico y en otras localidades de Barlovento. En Paparo, el puente de hierro sufrió daños severos debido a movimientos en las pilas de apoyo; parte de las viviendas del pueblo se hundieron. Fenómenos de licuefacción al NE del caserío La Maturetera y en Las Morochas (río Agua Colorada) cerca de Capaya.

Fuente: Singer 1993 y Grases 1980.

### Otras causas

- *Gravitacionales:* por sus características geológicas, los casos de deslizamiento asociados a fenómenos gravitacionales, especialmente con presencia de humedad, han sido muy numerosos y han alcanzado niveles catastróficos al afectar áreas urbanizadas en las laderas del sur de la ciudad. El 15 de abril de 1976 el sistema sufrió daños por deslizamientos en la fila de Mariches, el Peñón de Lira (Las Marías).
- *Arrastres torrenciales:* además de las manifestaciones de riesgo geológico por fenómenos gravitacionales, las precipitaciones torrenciales han acelerado problemas de inestabilidad de laderas y ocasionalmente han originado arrastres torrenciales catastróficos. Entre ellos se destacan aquellos que han afectado componentes de sistemas de producción y transporte de agua potable o alcantarillado. En el cuadro 6.3 se sintetiza información recabada en la prensa local.

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La descripción esquemática del sistema seleccionado de producción de agua potable se da en las figuras 6.1 y 6.2, y sus principales componentes se presenta en el cuadro 6.4. Estos componentes han sido incorporados al modelo para el cálculo de la confiabilidad. Otros elementos del sistema, como galpones, edificaciones de control, válvulas y pilas de apoyo no han sido incluidos en el modelo.

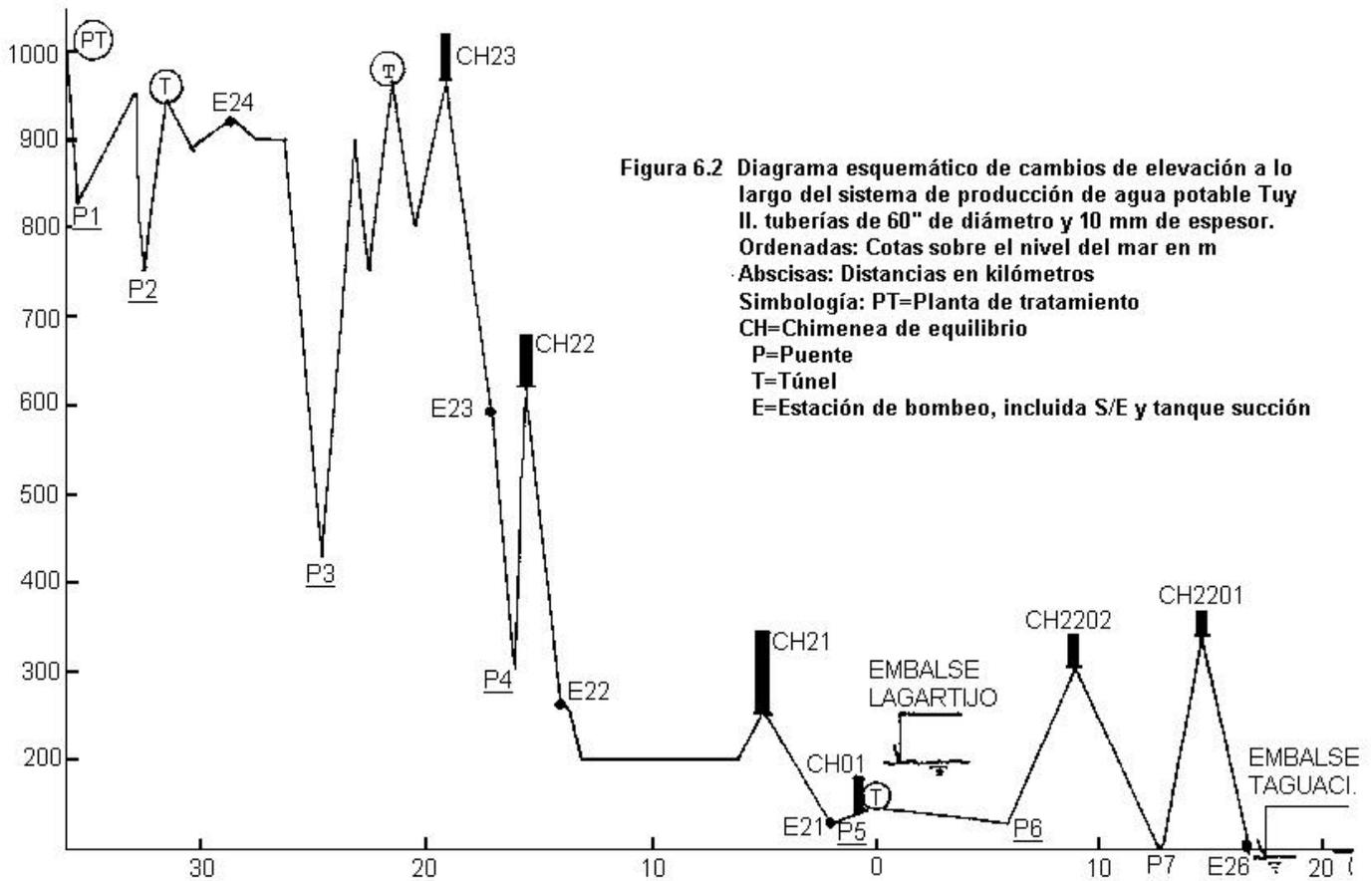
**Cuadro 6.3**  
**Casos de arrastres torrenciales que han ocasionado interrupciones importantes**

Fecha	Breve descripción
1977-08-20	Arrastres torrenciales por lluvias en las cuencas de los ríos San Pedro y Macarao inundaron la parte baja de Caricuao y Las Adjuntas, al oeste de Caracas, por súbita creciente del río Guaire a las 17.30 del sábado 20. Sistemas de drenaje colapsados por arrastre de sólidos; el lodo invadió las plantas bajas de las edificaciones del área. Se reportaron cinco muertos, tres personas desaparecidas y 700 vehículos dañados o arrastrados por el río. En la referencia 55 se anota que la represa La Mariposa fue dañada, pero ese dato no ha sido confirmado en la prensa consultada.
1979-09- 7 y 8	Fuertes precipitaciones en la parte alta de la cuenca del río Valle (urbanización Colinas de Carrizal), ocasionaron derrumbes y la formación de una laguna de hasta seis metros de profundidad en el área de la urbanización. Tres muertos, varios lesionados, pérdidas materiales importantes entre ellas el acuario Agustín Codazzi de la UCV; la altura del lodo arrastrado se estimó en dos metros. La Carretera Panamericana bloqueada por deslizamientos. Este ha sido un fenómeno recurrente; el último episodio fue en agosto de 1996.
1979-09-10	Derrumbes en el barrio La Carbonera, km 17 de la Panamericana, Estado Miranda. La aducción de agua a Los Teques quedó fuera de servicio; vía obstruida.

### Criterios de diseño sismorresistente

No se dispone de información detallada relativa a los criterios de diseño sismorresistente. En el volumen 1 de Pieretti (1965) se indica que se consideró el efecto sísmico: “a razón de 0,1g”.

En un estudio geológico posterior, de mayo de 1965, firmado por el geólogo Sergio Bajetti B., para el diseño de la presa La Pereza, se establece que la aceleración máxima del terreno a considerar en el diseño no debe ser menor de  $300 \text{ cm/seg}^2$  según recomendaciones de Fiedler, pues “no se puede considerar que los focos se hayan tranquilizado”.



De acuerdo con las normas vigentes COVENIN 1956 (1982), el Estado Miranda queda en la zona sísmica cuatro, con aceleraciones de diseño iguales a  $0,30g \times 1,25 = 0,38 g$  para obras de importancia excepcional, como es el caso de un sistema de abastecimiento de agua.

**Cuadro 6.4**  
**Componentes del sistema estudiado**

<b>Componentes</b>	<b>Descripción</b>
Represas	- L. Construida entre 1960 y 1962; tierra; 60 m de altura; 113 Mm <sup>3</sup> capacidad. Torre toma de concreto armado (cota 190 msnm). - L.P. Construida entre 1966 y 1969; enrocado; 65 m de altura; 8 Mm <sup>3</sup> de capacidad (cota 1068 msnm).
Estaciones de bombeo, tanque de succión y subestación de alto voltaje	Cinco estaciones con tanques de succión principalmente de acero y alturas hasta de 38 m. Subestación de 115/6,9 kW con equipos tradicionales de porcelana.
Tuberías	Longitud total: 56 km: 2 km 84"; 34 km 78"; 13 km 60"; 7 km 48".
Puentes	Cuatro puentes de vanos importantes; uno de ellos autoportante sobre el río Tuy.
Chimeneas de equilibrio	- Ocho chimeneas: 2 unidireccionales, 1 inclinada y 4 verticales hasta de 98 m de altura.
Túneles	Tres túneles con tubería a presión.
Planta de tratamiento	Una a la entrada del sistema de distribución con 8 m <sup>3</sup> /seg de capacidad.

Ref.: Grinteins (1997)

### **Criterios de diseño contra vientos máximos**

De acuerdo con Pieretti (1965), volumen I, el caso de viento máximo se tomó a razón de 150 kh/m<sup>2</sup>. Esto equivale aproximadamente a velocidades de viento de 108 km/hora, lo cual resulta adecuado según la norma COVENIN 2003 (1986) con un factor de importancia eólica  $\alpha = 1,15$ .

## **MODELO DEL SISTEMA Y PROBABILIDADES DE FALLA**

Para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas y su confiabilidad ante las amenazas naturales, es preciso:

- identificar los componentes del sistema;
- caracterizar su vulnerabilidad física y operativa;
- identificar el origen de la vulnerabilidad;
- explorar los cambios posibles tanto en las amenazas, como en el desempeño esperado de los componentes del sistema.

El procedimiento es válido para cualquier otra amenaza siempre que ésta y la vulnerabilidad del sistema se encuentren debidamente caracterizadas.

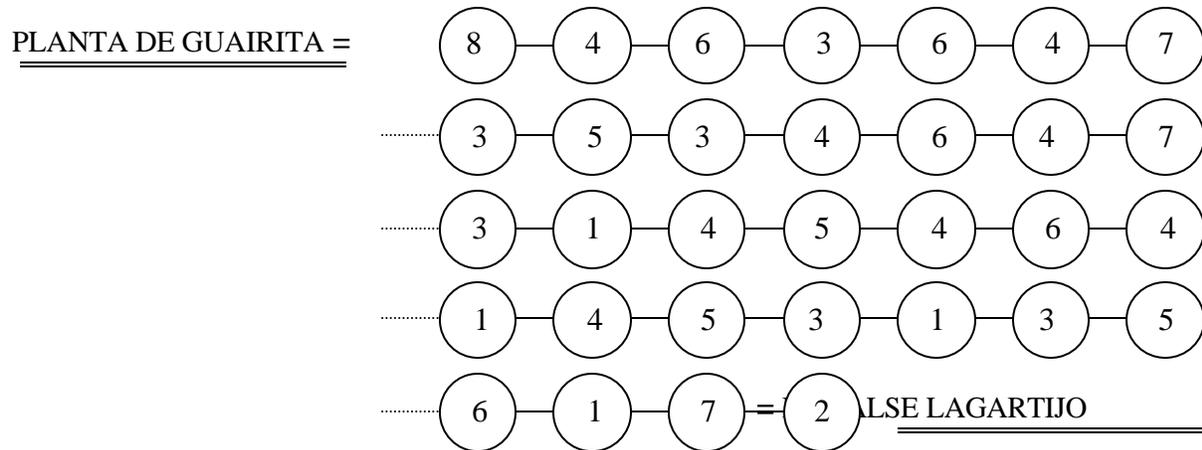
### **Modelo del sistema seleccionado como estudio de caso**

En una primera evaluación, el sistema de producción y transporte de agua seleccionado como estudio se modeló como un conjunto de 32 componentes en serie, tal como se describe en la figura 6.3. Estos elementos están concatenados desde el embalse Lagartijo (cota 190 msnm) hasta la planta de tratamiento de La Guairita (cota 1.000 msnm). Obsérvese en el cuadro 6.5 que en el caso de tuberías de gran diámetro se ha hecho una distinción entre tramos ubicados en terrenos planos y tramos dispuestos en ladera; estos últimos presentan una vulnerabilidad considerablemente mayor. No se ha diferenciado el eventual cruce de fallas geológicas activas.

El personal que opera el sistema observó que en los tramos afectados por deslizamientos, las tradicionales juntas Dresser (foto 6.1) han resultado ser más vulnerables a las fugas que las uniones soldadas; aparentemente estas últimas confieren una mayor deformación al conjunto antes de que aparezcan fugas.



**Foto 6.1**  
**Acceso al puente sobre el río Guaire, donde se ha tomado la fotografía;**  
**detalle de la Junta Dresser**



**Nota:** No se incorporan en este modelo otros tramos del sistema. Embalse La Pereza a la Estación de Bombeo 25; Embalse Taguacita a la Estación de Bombeo 21

**Figura 6.3**

**Modelo en serie del sistema seleccionado como estudio de caso. La identificación de los componentes enumerados dentro de cada círculo se da en el cuadro 6.5**

### Resultados preliminares

El modelo de la figura 6.3 y los valores del cuadro 6.5 permiten la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad del sistema a sismos. Esto se ilustra a continuación con dos ejemplos.

**Ejemplo :** Sismo local sobre la falla de Túcata (figura 6.1), con intensidad de Mercalli grado VIII hasta la CH 22 (figura 6.2), Mercalli grado VII hasta el túnel del km 20-21, y Mercalli grado VI hasta la planta de tratamiento de La Guairita. Para este evento, comparable a otros reportados en la región, la confiabilidad del sistema resulta ser igual a 0.46; la probabilidad de que el sistema deje de operar es bastante elevada (0,54). Los componentes que más contribuyen a este resultado son los que se encuentran en el área de mayor grado de intensidad (grado VIII), entre ellos, la represa de tierra y las tuberías en ladera.

### Toma de decisiones bajo incertidumbre

En la eventual decisión de aplicar medidas de mitigación, es preciso reconocer la naturaleza incierta de los fenómenos de la naturaleza y el desempeño esperado de los elementos del sistema. Este problema se presenta con un ejemplo seleccionado del estudio de caso.

**Cuadro 6.5**  
**Vectores de probabilidad correspondientes a los daños severos o ruina (sismo en época de estiaje)**

Intensidad de Mercalli	Chimenea equilibrio	Represa de tierra	Tuberías gran diámetro		Estación de bombeo y subestación	Puente	Túneles	Planta de tratamiento
			Plano	Ladera				
			1	2				
VI	--	--	--	--	--	--	--	--
VII	--	0,05	--	0,02	0,02	--	--	--
VIII	0,05	0,20	--	0,15	0,10	0,05	0,02	--
IX	0,40	0,50	0,05	0,40	0,30	0,15	0,10	0,15
X	0,70	0,80	0,20	0,80	0,60	0,30	0,30	0,40

**Nota:** En este modelo no se incorporan otros tramos del sistema, tales como el del embalse La Pereza a la estación de bombeo 25 y del embalse Taguacita a la estación de bombeo 21

- *Incertidumbre en las acciones y en el desempeño del elemento seleccionado*

El área en la cual está construido el sistema estudiado puede ser caracterizado en términos de su historia sísmica Grases (1994); Grases (1995) y Coral 83 (1997). Los valores del cuadro 6.6 sintetizan la información necesaria para este ejemplo.

El elemento seleccionado pertenece al estudio de caso y se trata de la chimenea de disipación de energía, de 98 m de altura. El vector correspondiente a los estados de daños severos y ruina para este elemento particular aparece en la columna 1 del cuadro 6.5.

**Cuadro 6.6**  
**Tasas de excedencia de intensidades de Mercalli**  
**y probabilidades de ocurrencia en 30 años**

Grado de Mercalli (IMM)	Tasas de excedencia (1/año)	Probabilidad de que ocurra IMM (2)
VI	0,05	0,28
VII	0,018	0,23
VIII	0,007	0,12
IX	0,0025(1)	0,06
X	0,0003(1)	0,01(3)

**Notas.** (1) Valores extrapolados; (2) excluye grados (IMM) inferiores a VI; (3) incluye grados (IMM) en exceso de X.

- *Estados de la naturaleza, alternativas de decisión, consecuencias esperadas y costo asociado*

En este ejemplo se consideran dos alternativas de decisión: (i) la alternativa X1 que es la de no intervenir, es decir, no reforzar; (ii) la alternativa X2 que consiste en reforzar la chimenea para minimizar su probabilidad de ruina.

En el cuadro 6.7 se sintetizan las consecuencias esperadas de las dos alternativas anteriores y los costos estimados (C). Por razones obvias, resulta conveniente expresar los costos asociados a la intervención o a las pérdidas esperadas en términos del costo de reposición del elemento en cuestión, aquí designado por la letra R.

- *Toma de decisiones*

Las utilidades esperadas dependerán tanto de la acción X1 ó X2, como del estado de la naturaleza (IMM). La mayor utilidad esperada, menor pérdida en este caso, se obtiene mediante la comparación de las pérdidas probables asociadas a cada alternativa de decisión. Estas son:

Alternativa X1:

- 0,0023% R - 0,6% R - 6% R - 10% R = -0,166 R

Alternativa X2:

$$- C_0 - 0,0012\% R - 0,30\% R - 1\% R = - 0,013 R - C_0$$

Si el costo de la intervención inicial  $C_0$  es mayor que  $(0,166 R - 0,013 R) = 0,153 R$ , la alternativa X1 es la de mayor utilidad económica esperada.

El total acumulado de tiempos probables de rehabilitación, calculado en forma similar y con los mayores tiempos de interrupción del cuadro 6.7, resulta ser cuatro veces mayor para la alternativa X1 (2,6 días) que para la alternativa X2 (0,62 días). Estos tiempos son pequeños debido a las pequeñas probabilidades de que ocurra el suceso (cuadro 6.6) y parecen ser riesgos tolerables.

El procedimiento permite la comparación sistemática entre componentes, sistemas o subsistemas e identifica aquellos que requieren intervención en forma prioritaria.

**CONCLUSIONES**

- a) La principal utilidad de la metodología descrita se centra en la posibilidad de evaluar cuantitativamente la influencia de las modificaciones, mejoras o trazados alternos en la respuesta esperada del sistema.
- b) Las incertidumbres en las acciones esperadas pueden incorporarse en la selección de las alternativas de acción con el fin de optimizar las medidas preventivas. Esto ha sido ejemplificado con el análisis de un componente del sistema seleccionado del estudio de caso.
- c) La extensión de su aplicación a los tiempos probables de rehabilitación del sistema es inmediata, sea para sismos o para otras causas de disrupción, siempre que se disponga de estadísticas confiables sobre los diferentes tipos de averías.
- d) Para la cuantificación de efectos y la vulnerabilidad de los componentes del sistema, es preciso combinar la estadística de casos (si existe) con los resultados de evaluaciones cuantitativas fundamentadas en la normativa vigente.

**Cuadro 6.7**  
**Estados de la naturaleza, alternativas de acción, consecuencias esperadas y costos asociados**

Estados de la naturaleza en términos de IMM	Acciones alternativas, consecuencias esperadas y costo (C) (1)	
	X1: No reforzar Co = 0	X2: Reforzar Co = 50% R
$\leq V$	No daños	No daños
VI	No daños	No daños
VII	Daños menores. No hay interrupción de la operación C = 0,01% R	No daños C = 0
VIII	Daños reparables. Pequeña probabilidad de ruina. Corta interrupción de operación: 3 a 7 días C = 5% R	Daños menores. No hay interrupción de la operación C = 0,01% R
IX	Daños importantes. Probabilidad de ruina 0,40. La interrupción de las operaciones puede extenderse entre 7 días y 30 días C = R	Daños reparables. Pequeña probabilidad de ruina. Corta interrupción de operación: 3 a 7 días C = 5% R
$\geq X$	Ruina total. Interrupción de la operación durante 30 a 50 días (2). C = 10 R	Daños estructurales controlados; baja probabilidad de ruina. Interrupción de la operación de 10 a 20 días C = 50% R

**Notas:** (1) C referido al costo de reposición R; Co = costo inicial.

(2) Incluye grados en exceso de X y construcción de una chimenea inclinada. La construcción de una nueva chimenea requiere más tiempo.