

menos en parte, los bienes. Al respecto la nueva versión de la Norma AIS -100-95 (AIS,1996), que fue recientemente presentada al Congreso de la República con el fin de actualizar la norma sismo resistente nacional NSR, es más estricta en lo referente a la deformación máxima de las estructuras con el objeto de dar mayor protección a los elementos no estructurales, debido a sus costos y al impacto que pueden generar cuando al deteriorarse producen el colapso funcional de las actividades que se realizan en la edificación. Este tipo de situación se pudo detectar claramente en la ciudad de Pereira con el sismo del 8 de febrero de 1995, el cual causó cuantiosos daños en mampostería y acabados y no generó efectos importantes en las estructuras.

De acuerdo con la información obtenida de las evaluaciones presentadas anteriormente, se puede resumir en algunas cifras el alto riesgo sísmico de Santafé de Bogotá, entendido como el potencial de consecuencias sociales, ambientales y económicas en caso de terremoto. La Tabla 4.2 presenta las principales cifras obtenidas del estudio para cada uno de los escenarios sísmicos hipotéticos considerados.

factor de 10; lo que significa que una buena estimación de 1.000 puede ser un valor que oscila dentro de un rango de sobre o infraestimación de 350 a 3.500.

Ante el escenario hipotético de un sismo lejano que llegara con una aceleración del orden de 0.038g a nivel del basamento rocoso, se esperaría una amplificación importante de las ondas sísmicas en particular en las zonas de suelos blandos, lo que afectaría posiblemente edificios altos. Algunas zonas del norte, de Usaquén y Suba presentarían la mayor concentración de pérdidas, que se reflejarían en daños no estructurales de cierta consideración en algunas edificaciones y una afectación menor pero general de las edificaciones en toda la ciudad. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 300 muertos y 1.600 heridos. Si ocurre en la noche habría 350 muertos y 1900 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 4% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 12.3 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos serían del orden de 5.100 millones de dólares. Se estima que en el área afectada habría 270.000 habitantes, de los cuales por lo menos el 10% podrían tener

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO	EN EL DIA		EN LA NOCHE		SIN VIVIENDA (10% de afectados Habitantes)	AREA DESTRUIDA (millones m ²)	COSTO (US \$ Millones)
	Muertos	Heridos	Muertos	Heridos			
SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)	3.500	20.000	4.500	26.000	74.000	33.8	14.000
SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)	1.600	9.000	1.400	7.700	44.000	20.6	8.800
SISMO LEJANO (0.038g)	300	1.600	350	1.900	27.000	12.3	5.100

Tabla 4.2 RESULTADOS DE PÉRDIDAS TOTALES-ESCENARIOS SÍSMICOS

Además de las dificultades de acceso e interrupción del tránsito los cuales impedirían el rescate y la atención médica inmediata, se sumarán los heridos muy graves a los valores estimados de muertos obtenidos de la Tabla 4.2. Igualmente, teniendo en cuenta que un estudio de ésta naturaleza no puede ser exacto, se aproximarán las cifras obtenidas del cálculo a números globales, que sirven como valores indicativos de la dimensión de la catástrofe. Es importante reiterar que éste tipo de estimativos puede, en todos los casos, tener un nivel de incertidumbre muy alto, que puede ser del orden de un

problemas de alojamiento, es decir, unas 27.000 personas sin vivienda²

En la eventualidad de la ocurrencia de un sismo en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, que cause una aceleración del orden de 0.12g a nivel del basamento rocoso, el cual se considera podría ser un sismo con un período de retorno de 100 años, similar a los sismos que afectaron a la ciudad en 1785, 1827 y 1917, se esperaría una fuerte respuesta en la zona oriental de la ciudad cercana a los cerros, lo que afectaría notablemente

² En otros estudios se ha estimado entre el 20% y el 50% de las personas relacionadas con el área afectada, lo que significa que éste tipo de estimaciones son apenas indicativas de la magnitud del problema

edificaciones localizadas en las zonas de suelos rocosos y de piedemonte. Las zonas más afectadas serían posiblemente algunos sectores de Los Mártires y La Candelaria en el centro y de Chapinero y Usaquén hacia el norte. Habría daños también de consideración en algunos sectores de Barrios Unidos y Suba. Este sismo, a diferencia del anterior, causaría graves daños estructurales y no estructurales en edificaciones de diferentes alturas. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 1 600 muertos y 9.000 heridos. Si ocurre en la noche habría cerca de 1.400 muertos y 7.700 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 6.8% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 20 6 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos podrían alcanzar los 8.800 millones de dólares. Se estima en el área afectada habría 435.000 habitantes, de los cuales por lo menos el 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del orden de 44.000 personas sin vivienda.

Finalmente, ante un sismo que se presente en la misma falla que genere aceleraciones del orden de 0.20g, lo cual equivale a un sismo de 475 años de período de retorno, considerado como el sismo para el cual se deben diseñar las estructuras de las edificaciones que se construyen en la ciudad, se tendría el escenario de pérdidas más notable de los considerados en este estudio. Las pérdidas de nuevo se presentarían de manera intensa en las cercanías de los cerros orientales, pero habría una participación elevada de otros sectores al norte y al sur. Se presentarían daños importantes en Ciudad Bolívar, Usme, Rafael Uribe y San Cristóbal, en el extremo sur de la ciudad. Habría daños significativos en Los Mártires, Teusaquillo y Barrios Unidos hacia el centro, y en amplios sectores de Suba y Usaquén al norte, donde se presentarían las mayores concentraciones de pérdidas. Este sismo causaría graves daños estructurales y no estructurales en todos los tipos de edificaciones. Habría colapsos totales de estructuras en diferentes sitios de la ciudad, con menor incidencia en la zona occidental donde los daños en general serían menores. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 3 500 muertos y 20 000 heridos. Si ocurre en la noche habría 4.500 muertos y 26 000 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 10.9% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 33 8 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos serían de 14.000 millones de dólares. Se estima que en el área afectada habría 738.000 habitantes, de los cuales por lo menos el 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del orden de 74 000 personas sin vivienda.

No se ha considerado en éstos análisis la posibilidad de ocurrencia de un sismo cercano muy intenso, generado

en una de las fallas locales como puede ser la Cajita, la de Usaquén - Los Lagartos, la de Bogotá o cualquiera similar. Este evento será catastrófico para la ciudad en especial para todas las edificaciones que se encuentran en terrenos de cierta competencia. Ante la falta de antecedentes claros y con la poca información disponible a nivel mundial para éste tipo de eventos, no se presenta en éste estudio una cuantificación sobre éste aspecto, pero se deja abierta la posibilidad que un sismo con las características descritas se presente en la ciudad en el futuro.

Tal como se mencionó con anterioridad, estas cifras no son exactas y solamente permiten dimensionar en ordenes de magnitud la problemática que para Santafé de Bogotá habría en la eventualidad de la ocurrencia de cualquiera de los escenarios hipotéticos propuestos, que obviamente tienen una probabilidad de ocurrencia y pueden llegar a ocurrir según la información disponible y las evidencias existentes en la actualidad. Por esta razón, es fundamental incorporar este tipo de evaluaciones a los programas de ordenamiento urbano y definir procedimientos y protocolos de respuesta institucional, áreas de alojamiento temporal y ejercicios de simulación de eventos hipotéticos.

4.3 VULNERABILIDAD DE LÍNEAS VITALES

Las líneas vitales son sistemas complejos cuya función es la distribución de recursos, el transporte de personas y bienes, así como la transmisión de información. Todas las líneas vitales incluyen componentes planificados por ingenieros. Hasta ahora, los efectos de los terremotos sólo se han considerado en el diseño de algunos componentes de estos servicios. Sin embargo, las prácticas de ingeniería están cambiando a medida que el comportamiento de los sistemas de los servicios públicos se convierte en una preocupación reconocida en el diseño sísmico, en el planeamiento de emergencia y en la fase de recuperación posterior a un terremoto.

Una línea vital es un sistema que tiene diversas características distintivas. A diferencia de un edificio, puede extenderse muchos kilómetros y con frecuencia debe seguir derechos de vía que están confinados por ley o propiedad. Las líneas vitales están interconectadas; por lo general son parte de redes que se extienden sobre grandes áreas. El comportamiento en una localidad de la red puede estar influenciado en gran medida por las alteraciones en una localidad distante. Por consiguiente, los servicios vitales están afectados por características sísmicas, de suelo y basamento que difieren en varias partes del mismo sistema. Estos sistemas son interdependientes, es decir que el daño de un sistema dado puede afectar el comportamiento de otro. La ruptu-

ra de las líneas de combustible puede ser causa de incendio, lo que debe considerarse en el uso post-terremoto de las redes de distribución de agua. Las roturas simultáneas de las líneas de agua y desagüe pueden contaminar el agua potable. La interrupción de la energía eléctrica puede afectar las estaciones de bombeo de agua, limitando por consiguiente la disponibilidad de agua y sobrecargando el sistema de transporte para extender reparaciones de emergencia.

Por lo general, los daños en las líneas vitales están relacionadas con falla del suelo. En resumen, la profesión de la ingeniería sísmica ha realizado progresos significativos en el reconocimiento y antelación de daños potenciales a los servicios vitales como producto de los terremotos. En algunos casos se han tomado medidas concretas para mitigar los daños, sea mediante la aplicación de innovaciones o mediante el uso de conocimientos básicos de ingeniería así como el buen juicio. Es necesario que se realicen más investigaciones para así ampliar nuestros servicios vitales durante terremotos, así como para desarrollar soluciones eficientes de diseño, mitigación y refuerzo.

Para evaluar el funcionamiento de las líneas vitales se pueden seguir varios procedimientos. Entre ellos se encuentra el análisis multiescenario, en el cual se evalúa el funcionamiento del sistema para uno o varios sismos. Esta técnica de evaluación se ha empleado en este estudio para determinar el funcionamiento de un sistema durante y después de eventos catastróficos. Con este tipo de análisis se puede establecer el requerimiento máximo del sistema y sus resultados se usan para formular planes de emergencia y contingencia.

En el caso de Santafé de Bogotá se desarrolló una metodología que intenta identificar los puntos donde eventualmente se pueden presentar mayores daños en líneas vitales (acueducto, energía, teléfonos, gas) ante la ocurrencia de los tres escenarios hipotéticos de sismos probables. Para el estudio de redes de distribución de acueducto, energía y gas se siguió el método propuesto en el ATC-13. Para edificaciones tales como subestaciones eléctricas y centrales telefónicas, se utilizó, como herramienta de evaluación el ATC-21. En cuanto a subestaciones eléctricas y centrales telefónicas, se tuvo en cuenta las edades de las edificaciones, sus características estructurales, su ubicación dentro de la ciudad, e igualmente la intensidad a la que estarían sometidas de acuerdo con los sismos anteriormente definidos.

La clasificación de los elementos de cada línea vital se realizó de acuerdo con la clasificación propuesta por el ATC-13.

- Elementos principales
- Elementos de distribución
- Elementos de servicio

Se identificaron los problemas más frecuentes en el funcionamiento diario de las líneas vitales, para lo cual se obtuvo de cada sistema un reporte de daños ocurridos en el pasado y de esta manera se realizó un análisis de la incidencia de la edad, la localización y los materiales en el comportamiento del sistema. No necesariamente los daños observados provienen de un evento sísmico, pero los daños representan puntos críticos a los que se debe dar especial cuidado.

Debido al alcance del estudio, para el cálculo de la vulnerabilidad se tuvo en cuenta únicamente lo relacionado con elementos de distribución. Sin embargo, en los sistemas de energía eléctrica y teléfonos se consideraron también algunos elementos principales. En este documento se presenta el estudio de los siguientes elementos de líneas vitales:

- 1 Vulnerabilidad de redes
 - Red matriz de distribución de agua.
 - Líneas de alta tensión
 - Red de gas.
- 2 Vulnerabilidad de edificaciones que hacen parte de las líneas vitales
 - Subestaciones eléctricas
 - Centrales telefónicas.

4.3.1 Vulnerabilidad de redes

Para el estudio de las principales redes de distribución se utilizó la metodología de estimación de daño propuesta por el ATC-13. El daño se evaluó como un porcentaje de la longitud caída de cable para el caso de líneas de alta tensión y por número de rupturas por Km para el caso de tuberías enterradas. El daño se relaciona con la intensidad sísmica esperada en cada uno de los tramos de la red.

El concepto de "matriz de daño" es fundamental para el cálculo de la vulnerabilidad. Las matrices de daño relacionan el nivel de daño (por ejemplo: leve, moderado, alto) con su probabilidad de ocurrencia para diferentes niveles de intensidad del evento sísmico. La probabilidad de ocurrencia se calculó con base en las opiniones de expertos. En la Tabla 4.3 se presenta una matriz de daño típica para líneas de energía (redes de alta tensión).



FACTOR CENTRAL DE DAÑO	INTENSIDAD MM						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.00	94.10	6.90	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	5.90	78.80	51.00	2.90	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	14.30	48.00	96.30	63.70	10.60	0.50
20.00	0.00	0.00	0.00	0.80	36.30	82.70	39.00
45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.70	59.20
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
FACTOR DE DAÑO MEDIO	0.03	1.11	2.66	4.99	10.45	20.09	35.51

Tabla 4.3 MATRIZ DE DAÑO PARA LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

Las matrices de daño calibradas mediante la consulta de expertos para líneas vitales se combinaron con las de intensidad sísmica esperada para determinar la distribución de daños en la ciudad. Las matrices de daño utilizadas en este estudio se obtuvieron del ATC-13 y se modificaron de acuerdo con los procedimientos descritos en el ATC-25 dependiendo de la edad, el mantenimiento, la calidad de los materiales y la calidad de la construcción colombiana.

Para evaluar la vulnerabilidad, el primer paso consiste en utilizar las longitudes de las redes de los sistemas, con el fin de construir la matriz de longitudes.

$$L = [L_{1,1} \dots L_{1,m}]$$

donde :

L_{ij} = Longitud de la red del sistema i en el tramo j

m = Número de tramos.

De igual manera la intensidad sísmica obtenida del estudio de amenaza ha sido usada para construir la matriz de amenaza sísmica.

$$SI = \begin{vmatrix} SI_{1,1} & SI_{1,2} & \dots & SI_{1,n} \\ SI_{2,1} & SI_{2,2} & \dots & SI_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SI_{m,1} & SI_{m,2} & \dots & SI_{m,n} \end{vmatrix} \quad m \times n$$

donde :

$SI_{m,j}$ = Intensidad sísmica (MM - Mercalli Modificada) estimada en el tramo m para el terremoto j .

m = Número de tramos en los que se dividió la red.

n = Número de sismos ($n = 3$)

Usando las matrices de probabilidad de daño de líneas vitales del ATC-13, el Factor de Daño Medio para un sistema dado y para una intensidad dada es :

$$MDF(S,D) = \sum_{DS=1}^n P_{DSI} \times DR_{DS} \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde :

DS = Estado de daño (damage state).

P_{DSI} = Probabilidad de daño para un estado de daño del sistema S a intensidad I

DR_{DS} = Relación de daño (damage ratio) por un estado de daño.

Obteniendo así, la matriz MDF.

$$MDF = \begin{vmatrix} MDF_{1,1} & \dots & MDF_{1,L} \\ \vdots & MDF_{ij} & \vdots \\ MDF_{k,1} & \dots & MDF_{k,L} \end{vmatrix} \quad k \times L$$

donde :

MDF_{ij} = Mean Damage Factor (MDF) para el sistema i a una intensidad j .

(Este valor es el que se obtiene de las matrices de daño).

K = Número de sistemas bajo consideración.

L = Número de niveles de intensidad sísmica considerados.

Finalmente el daño del sistema S en el i-ésimo tramo, el cual tiene una intensidad sísmica estimada $SI_{i,e}$ para el terremoto hipotético e, se estima como el producto del elemento $(S, S_{i,e})$ de la matriz MDF por el total de longitud $L_{s,i}$ del tramo (matriz de longitudes).

$$D_{s,i} = \text{MDF}_{s,SI_e} \times L_{i,j} \quad \text{Ec.4.3}$$

donde:

$D_{s,i}$ = Daño del Sistema S en el i-ésimo tramo

MDF_{s,SI_e} = Factor de daño dado por las matrices para un sistema S sometido a una intensidad e.

$L_{i,j}$ = Longitud del sistema i en el tramo j.

El factor de daño en los sistemas de acueducto y gas se expresa en términos del número de roturas por Km de tubería. El procedimiento descrito anteriormente se utilizó para evaluar las redes de distribución de los sistemas de acueducto, alta tensión y gas.

4.3.2 Vulnerabilidad de edificaciones de líneas vitales

Para el cálculo de la vulnerabilidad de las edificaciones principales de los sistemas de energía eléctrica (subestaciones eléctricas) y teléfonos (centrales telefónicas) se utilizó una metodología aproximada que considera los siguientes aspectos

- Importancia
- Vulnerabilidad intrínseca
- Vulnerabilidad a la amenaza

El cálculo de la vulnerabilidad se realiza de la siguiente forma

$$V_T = I \cdot 0.3 + VI \cdot 0.4 + VA \cdot 0.3 \quad \text{Ec. 4.4}$$

donde:

I= Importancia

VI= Vulnerabilidad Intrínseca

VA= Vulnerabilidad a la Amenaza

V_T = Vulnerabilidad Total

Los valores de 0.3 y 0.4 que se expresan como porcentajes y representan el peso de la calificación de la importancia, la vulnerabilidad intrínseca y la vulnerabilidad a la amenaza en el cálculo de la vulnerabilidad total.

La importancia define la participación de un elemento en el funcionamiento del sistema completo o su participación en la operación de zonas especiales. Para la cali-

ficación de la importancia tanto de las subestaciones eléctricas como de las centrales telefónicas, se hicieron encuestas a personas calificadas dentro de cada una de las empresas de servicio público.

Con respecto a la vulnerabilidad intrínseca, ésta se define con base en el comportamiento de la estructura de acuerdo con sus características propias (regularidad e irregularidad tanto en planta como en alzado, construcción con base en el Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes, presencia de columnas cortas y otros factores).

Para las subestaciones eléctricas, adicionalmente a las visitas, se observó el estado de la estructura de la casa de control y el anclaje de los transformadores, de las celdas y de las baterías, elementos indispensables para el buen funcionamiento de la subestación. Los demás instrumentos de la subestación no fueron revisados debido a que se salen del nivel de detalle de este estudio. De la misma manera que para las centrales telefónicas, la vulnerabilidad intrínseca de cada subestación se calificó entre 0 y 1 siendo 1 la más vulnerable.

4.3.3 Estimación del riesgo

La Figura 4.10 muestra los daños esperados en las redes del acueducto para el caso de un sismo cercano moderado que ocurra en la falla Frontal de la Cordillera Oriental con una aceleración máxima en terreno firme del orden de 0.12g. La Figura 4.11 presenta los daños esperados para un sismo hipotético en la falla Frontal con una aceleración de 0.20g. Este último correspondería a una de las peores situaciones que podría esperarse.

Para redes de alta tensión a diferencia de tuberías enterradas, los daños se calcularon como porcentaje de longitud caída de la red. Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran los tramos de cables afectados debido a un sismo cercano moderado de 0.12g y los daños esperados para un sismo cercano fuerte con una aceleración máxima de 0.20g, respectivamente.

En cuanto a las redes primarias y secundarias de teléfonos de la ciudad la Empresa no suministró la información necesaria para realizar el estudio. Por lo tanto se realizaron visitas a cada una de las centrales telefónicas y se obtuvo información de las características más importantes de cada una de ellas. En las Figuras 4.14 y 4.15 se presenta la calificación de la vulnerabilidad de las centrales telefónicas ante los dos sismos probables esperados en la Falla frontal de la Cordillera Oriental.

Para obtener los daños de cada tramo de la tubería de la red de gas se hizo uso del sistema de información geográfica con la metodología para redes explicada anteriormente. Las Figuras 4.16 y 4.17 muestran los daños esperados para los escenarios hipotéticos que causarían los sismos ya descritos de la falla Frontal.

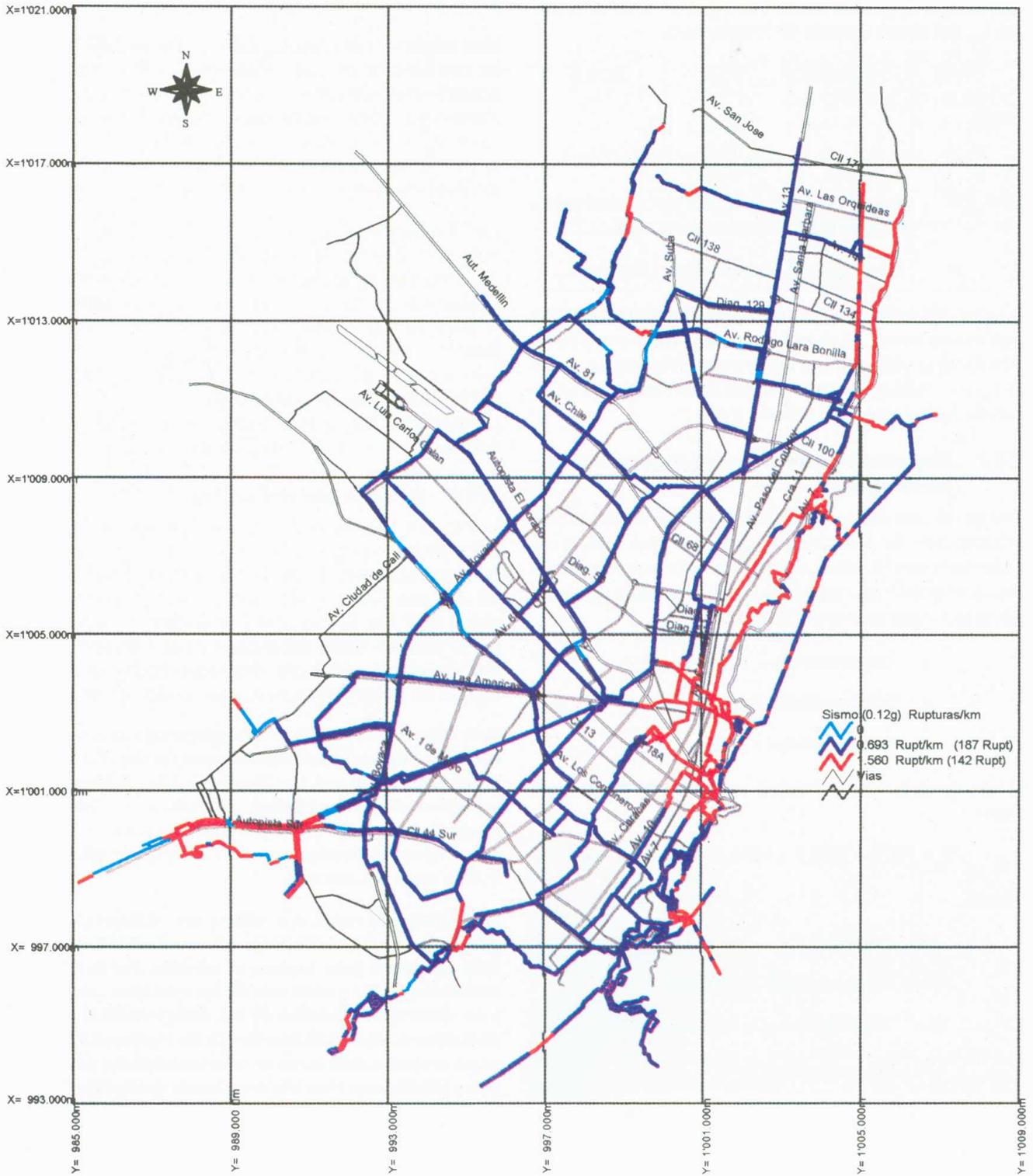


FIGURA 4.10 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AL SISMO CERCANO MODERADO (0.12g).

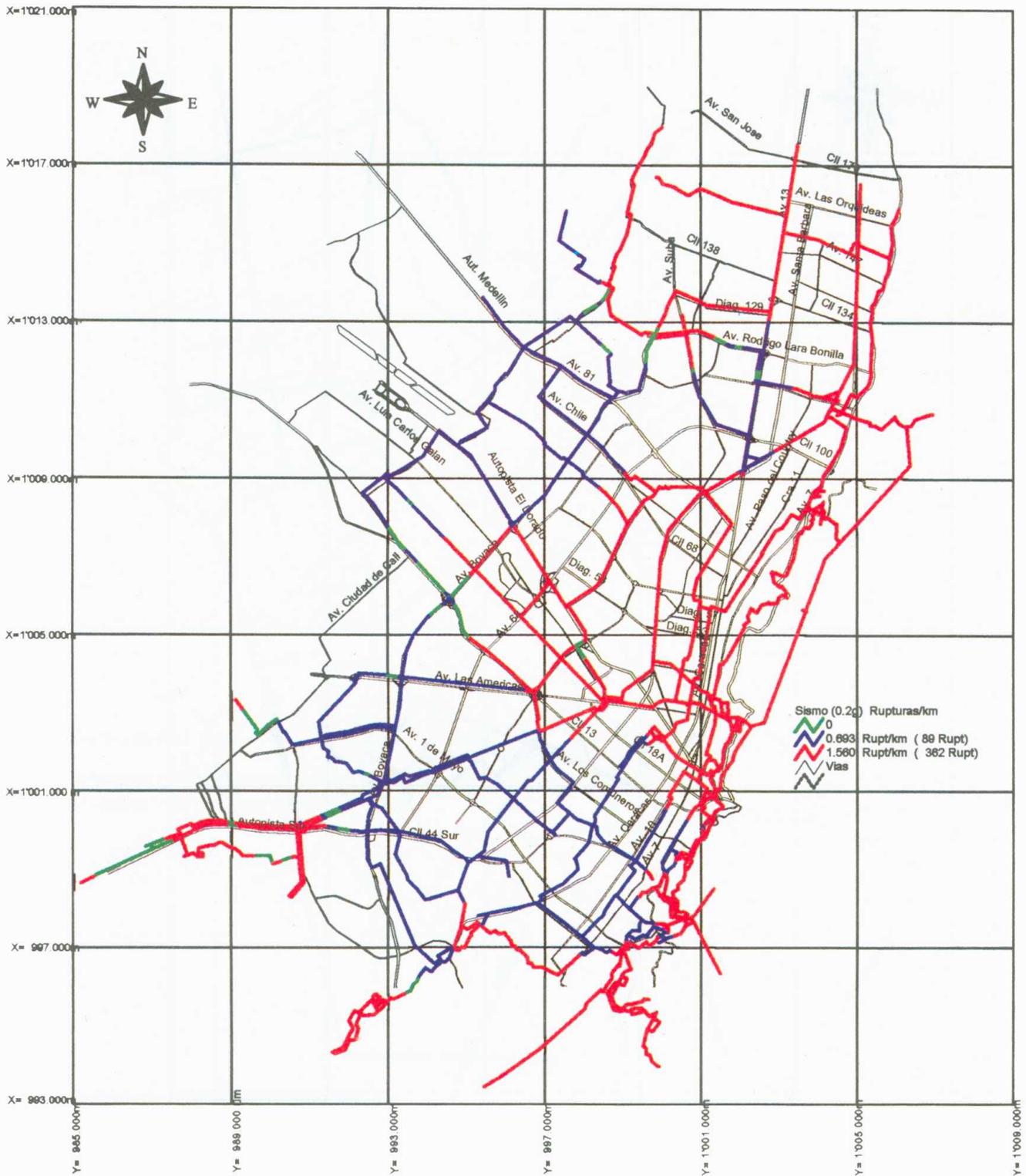


FIGURA 4.11 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AL SISMO CERCANO FUERTE (0.20g).