material en el cálculo de la vulnerabilidad para la tubería. Es conveniente llenar una matriz de valores de fpij como la mostrada en la figura.

Cuando se tiene para cada uno de los accesorios del componente y para cada parámetro los valores de vulnerabilidad de cada uno de los rangos y además se tienen los factores de ponderación de importancia, se hace el cálculo de vulnerabilidad de la siguiente manera:

$$Vc = \sum_{i=1}^{i=ni} \sum_{j=1}^{j=np} (fpij * vij)$$

en donde.

Vc . Vulnerabilidad del componente c
ni : Número de accesorios.
np : Número de parámetros
fpij : Factor de ponderación del parámetro j para el accesorio i.
vij : Indice de vulnerabilidad del accesorio i y del parámetro j.

Tabla No. 8
Factores de Ponderación del componente (fpck)

Tubería	Hidrante	Válvula	Unión	Codo y Tee	Otros	Factor Sísmico	
0.25	0.07	0.15	0.10	0.10	0.03	0.30	1.00

Toma el valor de 1 si el accesorio i cumple con las exigencias de la práctica ingenieril cuando se analiza el parámetro j, y si no las cumple toma el valor de 100 (más vulnerable).

2. *Cálculo de la vulnerabilidad para un sistema como un todo.*

Se deben definir los valores de importancia de cada componente dentro del sistema total de tal forma que la suma de los factores de todos los componentes sume la unidad. A continuación se presenta un ejemplo de dichos valores de importancia:

$$VT = \sum_{K=1}^{K=nc} (fpck * vck)$$

En donde

VT : Vulnerabilidad total del sistema (entre 1 y 100)
nc : Número total de componentes
fpck : Factor de ponderación del componente k
Vck . Vulnerabilidad asociada al componente k

Cálculo del factor de seguridad sísmico

Se tuvieron en cuenta los efectos axiales y de flexión producidos por una onda sísmica en una tubería de PVC de 3" de diámetro a una profundidad de 1.0 m. Se utilizaron los acelerogramas del sismo de México, del 19 de septiembre de 1985 y el de Corralitos de Octubre de 1989

El sismo de México se escaló a una aceleración de 0.10g para estudiar la vulnerabilidad frente a sismos grandes y distantes, el de Corralitos se escaló a 0.25g para analizar la vulnerabilidad frente a sismos cercanos y fuertes.

Para el cálculo de este factor se hizo uso del programa SHAKE (Ver referencia 11) que considera un modelo de propagación vertical de ondas a través de un sistema viscoelástico consistente de N capas horizontales que se extienden al infinito en la dirección horizontal y localizados sobre una capa rígida inferior. Con este programa se obtuvieron valores de aceleración y frecuencia del suelo a la profundidad a la cual se supuso la tubería (1.0 m) y con estos valores se calculó la longitud de la onda y el desplazamiento del terreno a la profundidad dada Con el desplazamiento producido sobre la tubería y suponiéndola simplemente apoyada se calculó el esfuerzo al cual está sometida la tubería bajo el efecto axial y el efecto de flexión y se calcularon los factores de seguridad comparando el esfuerzo aplicado con la resistencia del material a compresión y tensión para los dos efectos, para finalmente escoger el menor valor de factor de seguridad y utilizarlo en el análisis.

Resultados

A continuación se muestran los resultados de vulnerabilidad total obtenidos:

Tabla No. 9
Valores de Vulnerabilidad

Nombre del barrio:	Chap. Sur-Occ.	La Macarena	E. Santos	Sta. Bibiana	Americas Occ.
Tipo de suelo:	Arcill. Bland.	Coluvión	Arc. Duras	Arcill. bland.	Arc.duras y exp.
Area del barrio:	217000	245000	356400	200650	180275.00
VULNERABILIDAD SIN EFECTO SISMICO	37.65	38.93	36.07	29.26	27.22
VULNERABILIDAD CON EL SISMO DECORRALITOS A 0.25g	63.32	64.77	60.94	52.53	55.10
VULNERABILIDAD CON EL SISMO DE MEXICO A 0.10g	66.32	46.77	60.94	55.53	52.10

Los efectos producidos por el sismo en la tubería son críticos en el caso de acción axial a tensión, mientras que en el caso a flexión la tubería presenta factores de seguridad altos.

Comparando el efecto de los dos sismos sobre los sitios analizados se observa que el sismo de México afecta más las zonas que poseen períodos mayores como son las zonas de Chapinero

Sur-occidental y Santa Bibiana, mientras que el sismo de Corralitos afecta las zonas con períodos menores, como son La Macarena y el barrio Eduardo Santos. Vale la pena aclarar que estos valores de vulnerabilidad utilizando los 2 sismos se ven muy afectados por las condiciones intrínsecas de cada una de

Tabla No. 10
Tipos de material de tubería presentes en la red.

	Chap. Sur-Occ.	La Macarena	E. Santos	Sta Bibiana	Americas occ.
MATERIAL TUBERIA	Arc. Bland.	Coluvión	Arc. Duras	Arc. bland.	Arc. duras y exp
PVC	7 %	4 %	16 %	66 %	3 %
AC	13 %	53 %	36 %	34 %	94 %
CU	-	-	-	-	3 %
HF	15 %	11 %	12 %	-	-
HG	56 %	28 %	36 %	-	-
HA	9 %	4 %	-	-	-

Tabla No. 11
Edades de la tubería

	Chap. Sur-Occ.	La Macarena	E. Santos	Sta Bibiana	Americas occ.
ANO INSTALACION	Arc. Bland.	Coluvión	Arc. Duras	Arc. bland.	Arc. duras y exp
ANTES 1960	85 %	78 %	48 %	-	-
1960-1970	6 %	22 %	24 %	36 %	-
1970-1980	2 %	-	12 %	61 %	97 %
1980-1990	7 %	-	16 %	3 %	3 %
1990-1995	-	-	-	-	-

las zonas, es decir, que tan vieja está la tubería y de que tipo de material esta constituida. Al respecto se tiene el siguiente análisis:

Como se puede observar en la tabla No 9 el barrio La Macarena es el que presenta mayor vulnerabilidad sin tomar en cuenta el factor sísmico, lo que puede ser debido a que presenta una de las redes más antiguas (78% instaladas antes de 1960, seguida por el barrio Caracas occidental que presenta el 85% de las tuberías de la red antes del mismo año) y además es la que presenta mayor cantidad de tubería en asbesto cemento (53%) que como se comento en capítulos anteriores es el material más vulnerable.Observando la misma tabla se tiene que después del barrio La Macarena con VULNERABILIDAD=38.93% se encuentran en orden de mayor a menor vulnerabilidad las siguientes zonas: Caracas Occidental, Eduardo Santos, Santa Bibiana y Americas Occidental, haciendo notar que en los dos últimos barrios las instalaciones son más recientes y además poseen un buen porcentaje de tuberías en PVC.

Conclusiones y Recomendaciones

1. Para reducir el riesgo de sismos futuros, se puede modificar la importancia relativa de un elemento o reducir su vulnerabilidad. Estas medidas se pueden lograr, mejorando el diseño, incorporando materiales más flexibles, reubicando partes del sistema en zonas menos peligrosas o planificando para situaciones de emergencia.

2. La experiencia de sismos pasados revelan que el empleo de tuberías hechas a base de materiales dúctiles como PVC reducen considerablemente la probabilidad de rotura

3. En zonas de pendiente, la disposición menos vulnerable es la de un trazado horizontal con la tubería a poca profundidad

4. Teniendo en cuenta los daños producidos en la Red de la ciudad debido al sismo de Tauramena, es evidente la gran vulnerabilidad que presenta la red ubicada sobre la zona de arcillas blandas, lo que indica que es necesario incorporar o reubicar partes del sistema y planificar para situaciones de emergencia que puedan presentarse en caso de sismos más fuertes.

5 Con la curva de daños de la red desde Octubre de 1994 hasta Junio de 1995, se observa que el aumento en el número de daños a partir de la semana del 15 al 21 de enero fue realmente significativo (el sismo ocurrió el 19 de enero) aún cuando se sabe que en la ciudad se podrían presentar eventos sísmicos mucho mayores, lo que indica la necesidad de replantear las metodologías de diseño existentes y / o cambiar elementos del sistema que se encuentren en mal estado e implantar nuevos criterios sismoresistentes y medidas preventivas que incorporen los análisis de riesgo en todo aspecto.

6. Los factores de mayor influencia en la vulnerabilidad del sistema de acueducto son las características del suelo, el tipo de material utilizado, las normas de diseño y construcción, la edad de los componentes, la operación y el mantenimiento del sistema, los tipos de juntas o uniones y la interacción suelo-tubería.

7. Las principales causas de daño en tuberías son la vibración producida por ondas sísmicas o por tráfico pesado, la licuaciñn de suelos, los deslizamientos y el cruce de fallas activas

8. Bajo la acción de ondas sísmicas el efecto más crítico es el producido por el efecto axial a tensión, aunque a compresión presenta también valores muy similares

9 A partir de los resultados obtenidos en las 5 zonas analizadas, se observa que la vulnerabilidad en cada una de ellas varía dependiendo del sismo al que esté sometido, en

general los suelos blandos fueron más afectados por el sismo de México y los suelos un poco más duros afectados por el de Corralitos: vale la pena mencionar que en la zona de Chapinero Sur-Occidental (arcillas blandas) se obtuvieron valores de vulnerabilidad altos con ambos sismos, lo que indica que en algunas ocasiones no es solamente influencia del suelo sino también del estado en que se encuentren los elementos de la red , es decir, el tipo de material que tengan las tuberías, la edad, el número de uniones , la calidad de éstas, etc. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las zonas de Santa Bibiana y Américas Occidental, se observa que obtuvieron las vulnerabilidades menores para ambos sismos, debido a que tal vez son las zonas donde se utiliza un mayor porcentaje de tuberías de PVC y las tuberías son un poco más recientes que las de las otras zonas.

10. Las uniones flexibles son mejores que las rígidas debido a que pueden absorber mayores deformaciones, además las tuberías de materiales como PVC , hierro maleable y acero dúctil son las que resisten mejor las vibraciones producidas por ondas sísmicas o por paso de tráfico pesado.

11. Otro aspecto que es importante mencionar es el relacionado con las estadísticas de daño durante el primer trimestre de este año, donde se observa que los accesorios que mayor número de reparaciones tuvieron fueron las válvulas y el material que mayor número de daños reporto en tuberías, fue el asbesto cemento, lo que indica la importancia de reducir o mitigar la influencia de estos factores en la vulnerabilidad total del sistema.

Referencias bibliográficas

1 CARDONA OMAR DARIO. Notas y Artículos dados en el curso de ìSeminario de Vulnerabilidad Sísmica».

2. CONDICIONES OPERACIONALES SISTEMA ACUEDUCTO RESUMEN Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá D C Gerencia Operativa. Dirección Operación y Control Acueducto. Santafé de Bogotá D C.

3. GERENCIA DE OPERACION INFORME ANUAL DE DESEMPE—O Enero-Abril 1995. Santafé de Bogotá D C. Mayo 8 de 1995.

4 INFORME ANUAL 1994. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá D.C Gerencia de Operación. Dirección Operación y Control Acueducto. Santafé de Bogotá D C. Marzo de 1995.

5 MARTINEZ RODRIGUEZ JUAN MANUEL. PIÑEROS CALA JORGE DAVID RUBIANO VARGAS DIANA MARCELA. Propuesta de Zonificación Geotécnica para Bogotá. Sextas Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia. SCI. 1990.

6 PLANES DE EMERGENCIA PARA EL MANEJO DE ACUEDUCTOS. Manual de M 19 de la A.W.W.A (American Waters Works Association)

7 SANCHEZ JUDITH RAQUEL. Análisis de Vulnerabilidad Sísmica de la Red del Acueducto de Santafé de Bogotá Septiembre 1994

8. SARRIA ALBERTO. Ingeniería Sísmica Uniandes 1994

9. SEMINARIO INTERNACIONAL PREVENCION Y REDUCCION DE RIESGOS EN SISTEMAS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO. ACODAL. Agosto 25 - 27 de 1993 Cali Colombia.

10 SEMINARIO SISMOTECTONICA DE COLOMBIA. INGEOMINAS. Santafé de Bogotá , marzo 23 de 1995.

11 SHAKE. A computer program for Earthquake Response Analysis of Horizontally layered sites Per b. Schnabel, John Lysmer y Bolton Seed Report December 1972 College of Engineering, University of California Berkeley, California Shake. manual pcshake.

12 SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO PARA BOGOTA, D.E. INVESTIGACION GEOTECNICA 1983. Resumen de Trabajos Ejecutados. Empresa Metro S.A. Alcaldia Mayor de Bogotá,D.E Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería. CIFI.

ACODAL desde el pasado mes de octubre, es miembro de la:

Water Environment Federation®

Preserving & Enhancing the Global Water Environment

Organización con sede en los Estados Unidos, y que congrega a más de 20 países del hemisferio