

SISTEMA NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE DESASTRES DE COLOMBIA

**CONFERENCIA INTERAMERICANA
SOBRE REDUCCIÓN DE LOS DESASTRES NATURALES**
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA
MARZO 21-24, 1994

***Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de
Líneas Vitales y Estrategias para la
Mitigación del Riesgo en Cali - COLOMBIA***

Ana Campos García *
Febrero 1994

* Investigadora Observatorio Sismológico
del Suroccidente - OSSO - Universidad del Valle, Colombia

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LINEAS VITALES Y ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACION DEL RIESGO EN CALI - COLOMBIA

Ana Campos García *¹

ABSTRACT

This paper presents partial results in seismic vulnerability assesment project of the water supply, sewage, electric power and telephone systems in the city of Cali - Colombia. We show that damage in all systems is very likely because of problems like, lack of redundancy and flexibility of networks, high vulnerability of some elements because of its age and materials, and effects of soils, specially in those areas susceptible to large permanent deformations and zones of change of rigidity. Although this project is still develop, it has allowed to define some emergency procedures in case of seismic disaster, and has enforced the conformation of the vulnerability groups in each vital system and the assignment of resources for mitigation measures and policies.

RESUMEN

En este artículo se presenta el estado actual de la investigación sobre la vulnerabilidad de los servicios de acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y teléfonos en la ciudad de Cali - Colombia. Los resultados parciales, muestran que seguramente existirán fallas en todos los sistemas debido a problemas tales como falta de redundancia y de flexibilidad de las redes, alta vulnerabilidad de algunos de los elementos por su antigüedad y materiales, y efectos de los suelos, especialmente en aquellas zonas susceptibles a deformaciones permanentes y en los sitios de cambio de rigidez. Aunque el proyecto todavía está en etapa de desarrollo, ha permitido definir algunos preparativos para la respuesta en caso de desastre sísmico, y ha fortalecido la conformación de grupos de vulnerabilidad en cada sistema vital y la asignación de recursos para la mitigación.

INTRODUCCION

La ciudad de Cali fue fundada en 1536 y es el principal centro urbano, comercial, industrial y cultural del Suroccidente colombiano. Está localizada entre la margen izquierda del río Cauca y el piedemonte oriental de la Cordillera Occidental, al sur del valle geográfico del río Cauca (3° 27'N, 76° 32'W), a una altura promedio de 1000 m sobre el nivel del mar. Las características sismotectónicas de la región hacen que la ciudad esté expuesta a una amenaza sísmica alta. Cali se ha expandido rápidamente en las últimas cuatro décadas, alcanzando un área aproximada de 10000 km² y una población estimada de 1.8 millones de habitantes.

Sismos como los ocurridos en Niigata (Japón), 1964; San Fernando (California-USA), 1971; Tumaco (Colombia), 1979; Popayán (Colombia), 1983; México, 1985; Loma Prieta (California), 1989 y Northridge (California), 1994. entre otros, han confirmado una vez más cómo los sistemas vitales, además de ser fundamentales en el funcionamiento de una ciudad, son críticos debido a sus características inherentes de extensión y de operación en red, pues las fallas en unos pocos elementos pueden afectar la prestación del servicio en grandes áreas, ocasionando que las pérdidas directas (reparación, reposición, etc.) e indirectas (lucro cesante

* Investigadora Observatorio Sismológico del Suroccidente OSSO
- Universidad del Valle, A A 25360 Cali, Colombia, Fax (23) 313418.

e impactos por interrupción del servicio) sean muy elevadas.

Con base en la necesidad de entender mejor la vulnerabilidad sísmica y el impacto que puede tener la interrupción de la prestación de los servicios vitales en Cali, debido a efectos de terremotos futuros, se inició en 1992 el proyecto UNDR0/ACDI/DN-PAD/MUNICIPIO DE CALI "Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali - Fase II: Vulnerabilidad Sísmica de Líneas Vitales", cuyos objetivos específicos son identificar desde el punto de vista de la ingeniería sísmica aplicada a los servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y teléfonos) las áreas donde pueden presentarse mayores problemas y diseñar estrategias de mitigación, de reducción de daños, y de minimización del tiempo de suspensión de los servicios. El proyecto es coordinado por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal y ejecutado por el OSSO y las Empresas Municipales de Cali - EMCALI.

METODOLOGIA

La evaluación de las líneas vitales de Cali se ha venido haciendo por etapas. Debido a la gran complejidad y extensión de los sistemas, no es posible abarcar en el mismo nivel de detalle todos los elementos expuestos simultáneamente; por lo tanto, es necesario definir prioridades y estudiar primero los elementos más importantes dentro del funcionamiento del sistema y aquellos que se consideren más críticos por su localización y características físicas.

Los pasos fundamentales seguidos dentro del estudio son: identificación de la amenaza sísmica, inventario general de los sistemas, análisis de la vulnerabilidad, estimación del escenario preliminar de daños, estimación de las pérdidas económicas directas, cálculo de la capacidad residual y del tiempo de recuperación.

Con base en la vulnerabilidad observada durante eventos sísmicos recientes a nivel internacional, se hizo el análisis de todos los elementos que componen los diferentes servicios. No se usaron métodos de vulnerabilidad calculada con análisis detallados, ya que requieren una información muy precisa, la cual en el caso de Cali es desconocida parcialmente y por lo tanto difícil de obtener en el corto y mediano plazo. Es necesario realizar este tipo de estudios posteriormente para aquellos elementos que se identifiquen como altamente críticos.

IDENTIFICACION DE LA AMENAZA SISMICA

FUENTES DE AMENAZA SISMICA

El marco tectónico regional de la esquina noroccidental de América del Sur está dominado por la interacción entre las placas Nazca, Suramérica y Caribe, por la falla de subducción bajo el continente y por sistemas de fallas continentales de dirección NNE tales como los de Cauca y Romeral. Las regiones sismogénicas cuya actividad puede afectar a Cali (Meyer, 1983, 1989) pueden clasificarse según sus características, así:

- La zona de subducción frente al Litoral Pacífico, caracterizada por eventos superficiales de magnitudes extremas con distancias focales mínimas respecto a Cali de 150 km aproximadamente, como el terremoto del 31 de enero de 1906 ($M_s=8.6$) y el sismo del 12 de diciembre de 1979 ($M_s = 7.9$), los dos mayores durante este siglo en Colombia.
- La zona de Wadatti-Benioff, localizada bajo las cordilleras Occidental y Central, con eventos de profundidades intermedias y distancias focales típicas entre 60 y 150 km, como aquellos ocurridos en julio de 1962 ($m_b= 6.7$) y noviembre de 1979 ($m_b= 6.6$).

- Los sistemas de fallas continentales (Cauca, Romeral, sistemas transversales, Suaza, etc.). Este tipo de fuentes en principio son las más cercanas y las menos conocidas, sólo se tiene evidencia instrumental precisa para el terremoto del 31 de marzo de 1983 en Popayán ($M_s=4.9$) e información escasa para el del 9 de febrero de 1967 en el Huila ($M_s=6.5$).

ACELERACIONES MAXIMAS

Según el Estudio General de Riesgo Sísmico (García et. al., 1984), que sirvió de base para el Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes - CCCSR-84, el sismo de diseño está definido para un período de retorno de 475 años en la línea de 90% de corrección por incertidumbre, es decir para una vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10%; correspondiendo a Cali una aceleración horizontal pico igual al 25% de la gravedad.

Los resultados preliminares de los cálculos de amenaza sísmica realizados por GERSCO-92, para el mismo período de vida útil y nivel de probabilidad de excedencia, son superiores a los contemplados por el CCCSR-84. A pesar de que dichos resultados no se consideran en este trabajo, los niveles de aceleración a tener en cuenta para los diseños de sistemas vitales deben ser superiores a los de construcciones estándar, dada la necesidad de garantizar su funcionamiento durante y después de un sismo. Es de anotar que para las conducciones subterráneas la aceleración es poco relevante, ya que los mayores efectos sobre ellas se deben a deformaciones en los suelos y a la interacción suelo-tubería.

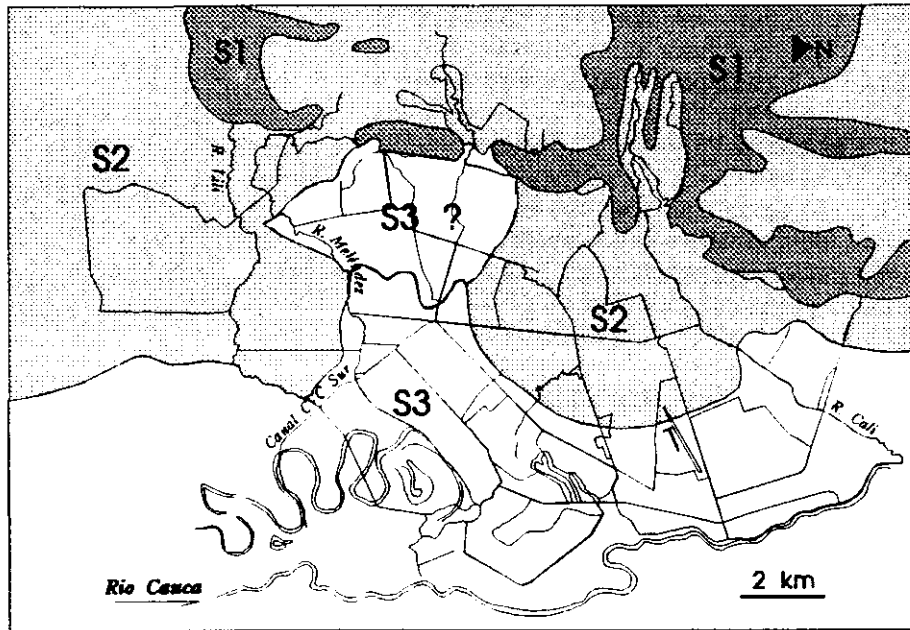
SUELOS

Prezonificación de Coeficientes de Sitio. La zonificación preliminar de los suelos de la ciudad, se hizo con base en criterios geológico-geomorfológicos parcialmente soportados en información de perforaciones y estudios geotécnicos (Velásquez y Meyer, 1992). Las áreas con coeficientes S-1, S-2 y S-3 corresponden a los criterios del CCCSR-84 (suelos compactos y rocas, medianamente consolidados y blandos respectivamente). En la Figura 1 se observan los siguientes aspectos:

- El área urbana cimentada sobre suelos con coeficientes de sitio S-1, al occidente de la ciudad es mínimo, ($< 5\%$).
- Sobre la franja central de la ciudad, aproximadamente el 60% del área urbana, el valor del coeficiente de sitio dominante es S-2.
- Sobre la franja Oriental, los suelos corresponden a depósitos aluviales recientes con coeficientes de sitio S-3.

La zona que representa una mayor amenaza desde el punto de vista sísmico para los sistemas de infraestructura urbana es la de suelos blandos (S3), debido a los posibles asentamientos que se pueden presentar allí y a su potencial de amplificación derivado, de la posible coincidencia del período natural de vibración del suelo con los períodos de vibración predominantes del sismo. También se considera que representan un peligro para las tuberías las zonas de cambio de rigidez, especialmente en la transición entre S2 y S3 por ser las zonas donde mayores daños se han presentado en sismos anteriores a nivel internacional.

Arcillas Expansivas. Se han identificado en algunos sectores de llanura al Norte y al Oriente, en conos y depósitos aluviales al suroccidente; en general los suelos contracto-expansivos identificados en Cali, se clasifican como limos arcillosos inorgánicos de alta plasticidad (Villafañe, 1990). Estos suelos representan una amenaza para las tuberías enterradas, ya que por procesos físicos y químicos las debilitan haciéndolas más vulnerables a los sismos (Ver Figura 2).



Mapa sujeto a comprobaciones de campo.
Adaptado de Meyer, 1990




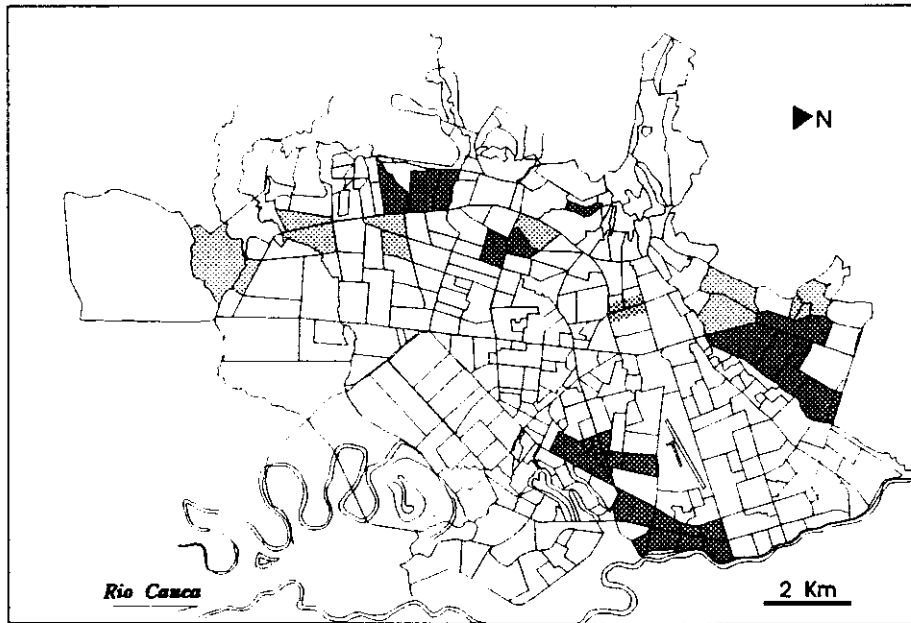
-  S1 Rocas y suelos consolidados
-  S2 Suelos medianamente consolidados
-  S3 Suelos blandos

Figura 1. Coeficientes de sitio



Mapa preliminar sujeto a comprobaciones de campo.
Adaptado de Campos, 1993.



-  Arcillas expansivas
-  Barrios con daños frecuentes en redes de acueducto. (Causas no identificadas)

Figura 2. Arcillas expansivas

AMENAZAS COLATERALES

Los efectos principales en los suelos por las vibraciones de un sismo son las rupturas superficiales de fallas geológicas, los deslizamientos y la licuación.

Rupturas Superficiales de Fallas Geológicas. Muchas de las fuentes sísmicas hasta ahora identificadas en Colombia, tienen profundidades intermedias, hasta cerca de 200 km, y por lo tanto no producen ruptura superficial. Para el Sistema de Fallas del Cauca que cruza la ciudad no se dispone de evidencias geológicas de movimiento superficial reciente; la información microsísmica aportada por 5 años de observación con la Red Sismológica del Suroccidente (GERSCO, 1992; OSSO, 1993) muestra una baja actividad superficial asociable a este Sistema con respecto a otras fallas de la región. Por estas razones el potencial de ruptura superficial de las trazas de las fallas que son cruzadas por líneas vitales en cuyas cercanías se asientan plantas, centrales o tanques de almacenamiento no es considerado todavía en los análisis de vulnerabilidad y riesgo.

Deslizamientos. Los deslizamientos de tierra y flujos de lodo pueden ser disparados por el sismo, especialmente si ocurre en época de lluvias, y por esto se consideran como amenazas colaterales.

En Cali, las zonas propensas por el tipo de formaciones geológicas superficiales, por pendientes naturales y por evidencias históricas, se localizan sobre saprolitos de rocas volcánicas, depósitos de vertiente y parcialmente sobre Terciario Carbonífero meteorizado y depósitos antrópicos. Estas zonas se localizan sobre la franja del piedemonte al Occidente del área urbana.

Licuación de Suelo. La licuación se presenta fundamentalmente en suelos granulares sueltos, saturados, y el grado de severidad del fenómeno depende de varios factores como distancia al epicentro, duración del sismo, aceleración del terreno, edad y densidad de los depósitos, posición del nivel freático y esfuerzos verticales a los que se encuentra sometido el terreno. Las zonas más susceptibles a la licuación son las riberas de los cauces de los ríos y los paleocanales. Aunque no es posible descartar "a priori" otras áreas de la ciudad y no se han hecho estudios muy detallados sobre el tema, se han identificado algunas áreas propensas a este fenómeno (Ver Figura 3):

- Franja Oriental, donde predominan los depósitos cuaternarios de origen fluvial cuya estratificación presenta capas de limos arenosos, arenas limpias y arenas limosas sueltas a medianamente densas (Villafañe, 1992).
- Riberas de los Ríos Cauca y Cali; riberas de otros ríos, quebradas y paleocanales no identificados.

En el terremoto de Loma Prieta en 1989 ($M_s = 7.1$), se presentó licuación generalizada en arenas aún a distancias de 100 km del epicentro, donde las aceleraciones máximas registradas fueron de 0.12g (Alva et. al., 1990), lo cual prueba que para el caso de Cali, de acuerdo con los suelos existentes, las fuentes sismogénicas descritas anteriormente y las aceleraciones esperadas, es posible que se presenten fenómenos similares. Según cálculos realizados por Villafañe (1992) sobre asentamientos por licuación esperados para un canal de drenaje al Oriente de la ciudad, en un tramo donde existen arenas sueltas se pueden presentar asentamientos entre 56 y 62 cm para aceleraciones de 0.10 g; en otro tramo de arenas densas, el fenómeno de licuación es poco probable para aceleraciones menores de 0.20g y muy probable para aceleraciones máximas de 0.35g.

INVENTARIO GENERAL DE LOS SISTEMAS

ACUEDUCTO

EMCALI presta el servicio de agua potable a las ciudades de Cali y Yumbo, y se calcula que la cobertura es del 81 % de la población.

La potabilización del agua se realiza mediante la operación de tres plantas de tratamiento San Antonio (1.4 m³/s), río Cauca (2.5 m³/s) y Puerto Mallarino (3.3 m³/s), las cuales se abastecen de dos fuentes superficiales: del río Cali la primera y del río Cauca las dos últimas. Próximamente entrará a funcionar la planta La Reforma, la cual se alimenta del río Meléndez con una capacidad de diseño de 1 m³/s.

Sistema de Distribución. La distribución del agua se hace a través de una red que tiene una longitud de 1912 km y cuenta con tuberías entre 56" y 12". Para atender las diferentes zonas de servicio el sistema se divide en red alta, que funciona por gravedad y bombeo y se abastece de la Planta Río Cali, y red baja que funciona solamente por bombeo y se alimenta de la plantas del Río Cauca y Puerto Mallarino.

Las conducciones principales que salen de la planta Río Cauca son de hierro fundido y de tipo American Pipe, mientras que Puerto Mallarino cuenta con tubos de acero con revestimiento interior de pintura epóxica y recubrimiento exterior de fibra de vidrio, fieltro y asfalto, con uniones hechas con soldadura en el sitio, lo cual hace que se comporte como un conjunto.

La red de distribución secundaria es una malla formada por tuberías de menos de 12" de diámetro, que llega hasta el frente de las edificaciones. Según datos de 1992 obtenidos de EMCALI, se tiene una longitud total de 1'799631 kilómetros con la siguiente composición (incluyendo la red baja y alta): el 65.93% corresponde a tuberías de asbesto-cemento, el 16.25% a tuberías de hierro fundido y el 17.82% a tuberías de PVC. Además existen 2000 metros aproximadamente en tubería de hierro galvanizado, la cual se está sustituyendo por tubería de otros materiales.

Sistema de Bombeo. Se dispone de 14 estaciones de bombeo que alimentan los sitios altos de la ciudad.

Almacenamiento y Compensación. Red Alta: Constituido por tres tanques principales de almacenamiento (localizados en predios de la planta de San Antonio) y por los tanques denominados "menores".

Red Baja: Tiene tanques que funcionan básicamente como compensadores, los cuales han sido localizados en los cerros del sector occidental de la ciudad.

ALCANTARILLADO

EMCALI presta el servicio de alcantarillado en el área urbana del municipio de Cali y comprende la recolección, transporte y evacuación de las aguas residuales y lluvias, para lo cual cuenta con un sistema que tiene 2980 km de colectores y redes, y 79.9km de canales, se calcula una cobertura del 75 % de la población.

Parte de la red de alcantarillado es combinada y otra es separada, sin embargo no se puede hablar de redes estrictamente separadas pues una parte considerable de ésta funciona como combinada debido a problemas hidráulicos, estructurales y al uso inadecuado que se ha dado a los diferentes componentes de la red.

Drenaje Pluvial. El río Cauca es el receptor final de las aguas lluvias recolectadas en los canales. El sistema pluvial de la ciudad se divide en tres zonas independientes Suroccidental, Oriental y Norte.

Drenaje Sanitario. Las aguas residuales de la ciudad, provenientes de los interceptores sanitarios y del río Cali son vertidas también al río Cauca. El sistema está compuesto de colectores, interceptores y redes secundarias.

Estaciones de Bombeo. Se dispone de tres estaciones de bombeo principales para evacuar aguas residuales y/o combinadas. Existen otras 13 móviles ubicadas en el Distrito de Aguablanca (al nor-oriente).

ENERGIA

EMCALI distribuye energía a los municipios de Cali, Yumbo y Puerto Tejada (zonas urbana y rural) y para este fin compra el 70% de la energía vendida por la Corporación Autónoma Regional del Cauca- CVC y la Central Hidroeléctrica del Río Anchicayá-CHIDRAL.

Sistema de Generación. En el Valle del Cauca existen cuatro centrales hidroeléctricas (Alto y Bajo Anchicayá, Salvajina y Calima I) con una capacidad efectiva de 799 MW, una central térmica de 50 MW y algunas plantas menores con una capacidad efectiva de 12MW. Estas plantas suministran parte de la energía requerida en el sistema del Valle, obteniéndose el resto a través de la interconexión con el sistema eléctrico nacional.

Sistema de Subtransmisión. En la actualidad el sistema urbano de Cali cuenta con 15 subestaciones interconectadas, 7 periféricas conectadas directamente al sistema de 115 Kv (compartidas con la CVC) y 8 subestaciones interiores propiedad de EMCALI.

La red de subtransmisión a 34.5 Kv tiene 55 Km, distribuidos en 20 circuitos de los cuales uno es subterráneo con una longitud de 2.1 Km.

Sistema de Distribución. La red de distribución cuenta con circuitos radiales a nivel de 13.2 Kv y 34.5 Kv y enmallados a nivel de 34.5Kv para alimentación de las industrias más importantes del área de Yumbo. Actualmente se dispone de una capacidad efectiva para distribución 115/13.2 Kv y 115/34.5 Kv de 680.5 MVA.

La red de distribución a 13.2 KV está constituida por 88 circuitos, con una longitud aproximada de 1486.10 Km, de los cuales 8 circuitos son subterráneos. Al sistema están conectados aproximadamente 10000 transformadores de distribución, de los cuales 7476 están ubicados en el área urbana, y representan una capacidad instalada de 899240 KVA.

TELEFONOS

EMCALI presta el servicio de teléfonos a los municipios de Cali, Yumbo y Jamundí.

Centrales Telefónicas. El sistema cuenta con 34 centrales telefónicas (310994 líneas de capacidad total) construidas entre 1944 y 1992, y clasificadas según la tecnología en analógicas, semielectrónicas, digitales y equipo de radiotelefonía móvil con capacidad actual de 800 abonados y 1869 teléfonos públicos.

Redes. Las redes primarias se encuentran canalizadas en su totalidad, y son de cable con chaqueta de plomo o cable barrera contra humedad (BCH), ambos con conductores de cobre, aislados con papel y presurizados para evitar que les entre humedad.

CRITERIOS DE VULNERABILIDAD OBSERVADA

A nivel nacional y local, desafortunadamente existen muy pocos reportes de daños en líneas vitales, no porque no hayan ocurrido sino porque no se ha guardado la información. Por lo tanto, se hizo necesario analizar los daños producidos en algunos sismos anteriores a nivel internacional (los mencionados en la introducción, entre otros).

De estos reportes se puede concluir que las fallas en los sistemas de tuberías dependen del material y tipo de juntas empleados, de la respuesta del terreno ante la acción sísmica y de la interacción suelo tubería. Las tuberías que muestran un mejor comportamiento aún bajo perturbaciones sísmicas fuertes son las de mayor flexibilidad (hierro maleable, acero dúctil con soldadura de arco) y las tuberías con uniones mecánicas que tienen suficiente capacidad de absorber desplazamientos relativos; las tuberías de asbesto cemento, de acero con uniones de rosca, de hierro fundido con uniones de espigo y campana, y las tuberías de PVC, son vulnerables desde el punto de vista sísmico porque no pueden absorber las deformaciones del suelo durante los sismos fuertes (Katayama, 1991). Los puntos de la tubería más vulnerables son los nudos, uniones, conexiones domiciliarias y sitios donde cambia de sección o dirección bruscamente. Las principales causas de daños en tuberías enterradas, en orden de importancia son: la licuación y los deslizamientos, el cruce de fallas activas superficiales y la propagación de ondas en el suelo, que depende de la rigidez del mismo. Según Katayama (1991) para el sismo de Kanto (Japón) en 1923, se observaron numerosos daños en las zonas de transición entre suelos blandos (llanuras aluviales) y suelos más firmes (conos y terrazas aluviales).

En el caso de sistemas de energía eléctrica los daños más típicos son en volcamiento de equipos por deficiencias en las estructuras de apoyo, ruptura de aisladores de porcelana o cerámica, fallas en las líneas de transmisión de alto voltaje, caída de elementos de distribución como postes y transformadores aéreos, etc.

En el sistema de teléfonos un sismo puede causar daños en cables (especialmente en los aéreos), enlaces de la red, así como en las instalaciones de las centrales telefónicas y en los equipos técnicos (generalmente por volcamiento o por caída de cielo-rasos y objetos). Además de un apagón total, la red también puede sufrir sobrecarga.

ESTIMACION DEL ESCENARIO PRELIMINAR DE DAÑOS

El escenario que se presenta a continuación muestra cuales de los elementos principales y de distribución de los diferentes servicios se verían probablemente más afectados por la ocurrencia de un evento sísmico fuerte en el futuro. En esta evaluación se correlacionó la información (gráfica y analítica) del inventario, con la de amenazas colaterales.

ACUEDUCTO

La vulnerabilidad actual del sistema de acueducto, está determinada por la falta de redundancia y de flexibilidad, que se manifiesta en la ausencia de redes en paralelo y/o de interconexiones entre las redes existentes, lo que genera la interrupción de su funcionamiento ante la falla de algunos de sus componentes. Por otro lado no se dispone de adecuadas reservas de agua para enfrentar períodos de emergencia.

Elementos Principales. Una falla en las conducciones y el sistema de bombeo de agua cruda de cualquiera de las plantas dejaría sin agua a gran parte de la ciudad (aproximadamente el 51% si es en la planta de Puerto Mallarino, 30% en Río Cauca y 19% en San Antonio). Los factores que afectarían la conducción de agua cruda son: fallas en los suelos que soportan la tubería y un apagón general que deje fuera de servicio las estaciones de bombeo. Como

reservas de agua cruda existen varios pozos profundos que pertenecen principalmente a la industria.

Las fallas en las plantas de tratamiento pueden ser tan diversas que se hace necesario el análisis detallado de cada una: asentamientos en las cimentaciones, asentamientos diferenciales en elementos adyacentes, rompimientos de tuberías en aquellos puntos donde se conectan a las estructuras de tratamiento, daños en bombas por cargas impuestas por el flujo cuando ocurran asentamientos diferenciales, flotación de algunas estructuras subterráneas generada por licuación en áreas de alto nivel freático, agrietamientos y colapsos de las paredes y tapas de los tanques, daños en los anclajes y soportes de los reactores y paletas, daños en edificios que pueden ir desde caída de cielorasos hasta colapso de pórticos, deslizamiento o volcamiento de equipos mal anclados, falta de energía por daños en los transformadores, etc..

Los elementos principales también podrían ser afectados por otros efectos colaterales. Los más relevantes, en el contexto regional, serían fenómenos de remoción en masa en las cuencas, averías de presas y ruptura de diques.

Elementos de Distribución. Las líneas de conducción son vulnerables a asentamientos diferenciales, licuación o deslizamientos y a movimientos diferenciales de los soportes. Los puntos más débiles son codos, uniones, válvulas y cambios de sección.

Una falla en una de las conducciones principales puede dejar hasta el 36% de la población sin agua, dependiendo del punto donde ocurra el daño y de la tubería que se vea afectada. Se consideran críticas las tuberías principales de la red baja, por los suelos que atraviesan (blandos y/o con potencial de licuación), principalmente en las salidas de las plantas. También pueden ocurrir daños por cambios de rigidez en la interfase entre S3 y S2 (ver Figura 3).

En la red alta son elementos críticos el ramal que abastece el principal hospital de la región (Evaristo García) y, por su antigüedad, la tubería del centro; además en ambos puede haber daños por deslizamientos y cambios de rigidez en el suelo (interfase entre S1 y S2). Se puede ver aumentada la vulnerabilidad de las tuberías frente a sismos por deterioros debidos a la existencia de arcillas expansivas en algunas zonas, especialmente en el Noroccidente.

Elementos de Servicio. La vulnerabilidad funcional es alta, ya que el sistema de válvulas es de poca confiabilidad y no permite, en algunos casos, el funcionamiento parcial de las redes. Existe un proyecto de reposición de 350 válvulas con un horizonte de acción hasta el año 2005. Adicionalmente predominan las tuberías de asbesto-cemento (63.47%) y las de hierro fundido (16.80%), las cuales han demostrado, empíricamente, ser más vulnerables a los efectos sísmicos.

ALCANTARILLADO

Los factores que pueden afectar la conducción de aguas lluvias y negras son: un apagón general que deje fuera de servicio las estaciones de bombeo, fallas en los suelos que soportan la tubería y grandes deslizamientos que causen represamientos. A consecuencia de lo anterior se generaría reboso e inundaciones, causando problemas de salubridad y de contaminación de aguas blancas en caso de coincidir con zonas de rompimiento de tuberías de acueducto, lo cual es probable.

Elementos Principales. Por su importancia dentro de la red pluvial y sanitaria y su localización en zonas de suelos blandos, se consideran críticos los canales, colectores y estaciones de bombeo principales que se encuentran localizados al oriente, especialmente el canal CVC Sur, que drena aproximadamente el 50% de la ciudad (Ver Figura 4).

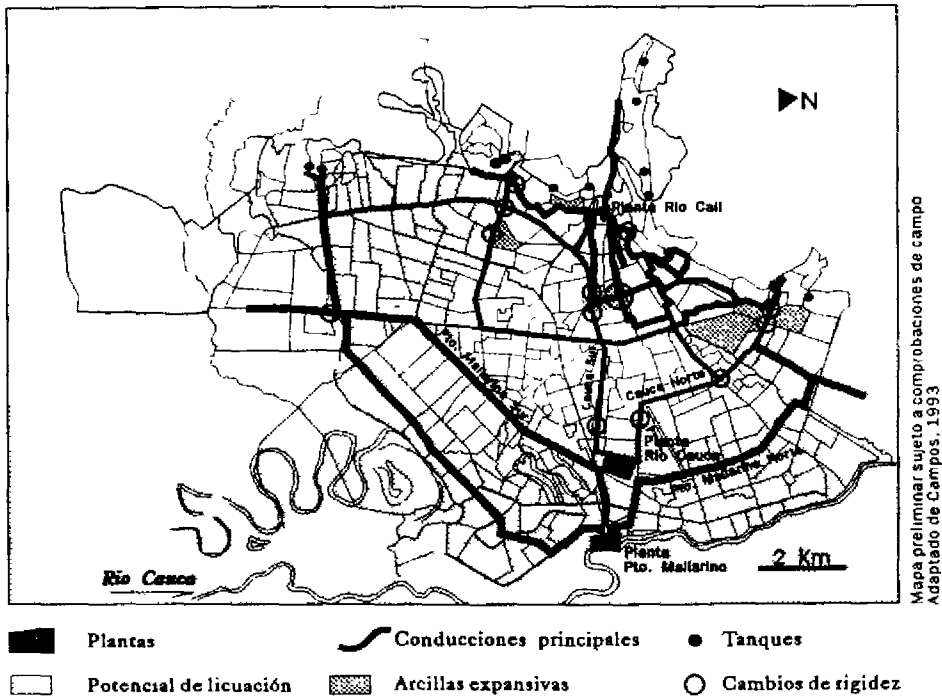


Figura 3. Suelos y sistema primario de acueducto

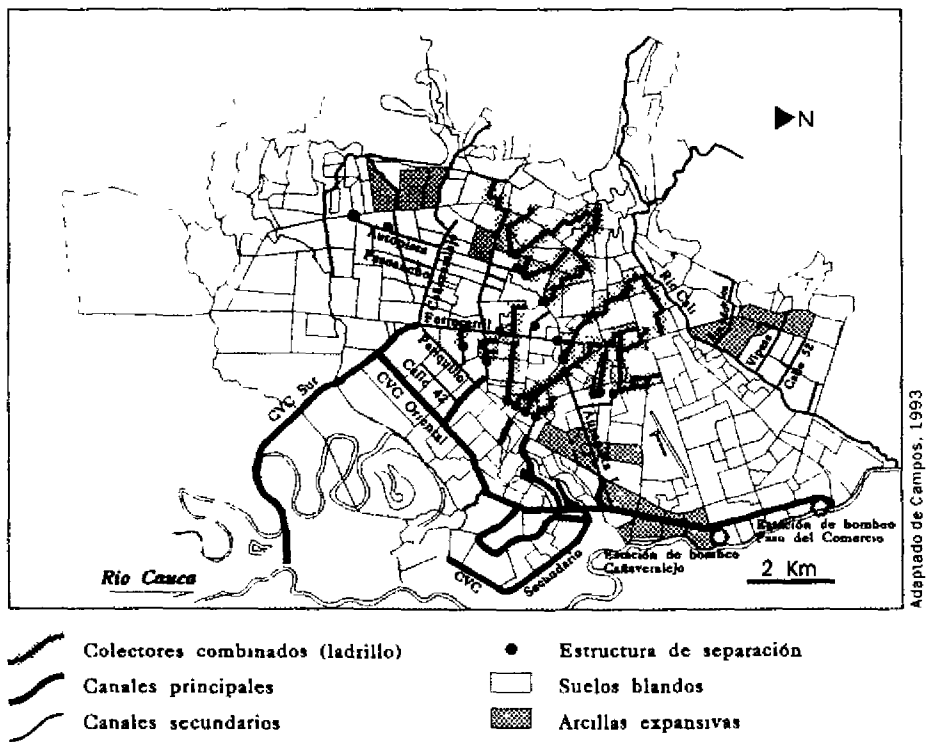


Figura 4. Suelos y alcantarillado pluvial

Elementos Secundarios. Se consideran como elementos altamente vulnerables los colectores combinados de ladrillo ubicados en la parte antigua de la ciudad debido a su edad, al material y al mal estado en que se encuentran. Ya se están tomando medidas de mitigación pertinentes, como es el reemplazo de 115 km de colectores de ladrillo.

Los canales e interceptores secundarios de la zona Suroccidental y Suroriental se encuentran en casi todo su recorrido sobre suelos blandos; por lo tanto, deben considerarse como críticos aquellos que hallan sido construidos en estas zonas sin haber tenido en cuenta para su diseño las deformaciones potenciales por asentamientos o por licuación.

ENERGIA ELECTRICA

El sistema eléctrico tiene una adecuada redundancia y flexibilidad funcional ya que existen diferentes conexiones entre subestaciones (esto se debe a las grandes crisis que ha tenido que enfrentar este sector en los últimos años por fenómenos como El Niño 1982-1983, 1992-1993). Es necesario conocer bien la distribución de los circuitos y estimar los posibles tipos de falla para poder calcular el porcentaje de la población afectada.

Elementos Principales. Como las centrales de generación de energía no están dentro del perímetro urbano del Municipio de Cali, no se analizan en este estudio, pero sí se recomienda hacer una evaluación de la influencia de la falla de cada una de las centrales y sus respectivos sistemas de transmisión a las subestaciones de la ciudad.

Se consideran como prioritarias para la evaluación las subestaciones que reciben la energía directamente de las centrales generadoras, y en especial la subestación Juanchito que está localizada en una zona de suelos blandos (Ver Figura 5).

En general los puntos más vulnerables son los sistemas de soporte de los equipos en las subestaciones y los aisladores de porcelana.

Elementos de Distribución. Para las subestaciones de distribución se repite la misma situación que para las principales, con la diferencia que el área afectada es menor. Se debe analizar prioritariamente, entre otras la subestación San Antonio, ya que alimenta los circuitos de la planta de tratamiento del río Cali, del Hospital Departamental, del Centro Administrativo Municipal, etc.

También se pueden presentar fallas por volcamiento de postes y transformadores aéreos que, aunque no son tan costosos como los equipos de las subestaciones, sí son muy numerosos y requieren una gran cantidad de hombres para su reparación. En los terremotos recientes este tipo de daños fue frecuente en la ciudad (p.e. el 23 de noviembre de 1979 se interrumpió completamente el servicio).

TELEFONOS

Elementos Principales. Debido a la importancia de las comunicaciones con el resto del país y del mundo es necesario y prioritario incluir dentro de la evaluación todos aquellos elementos que estén relacionados con esta función (antenas, conexiones, equipos, edificaciones, etc., tanto de TELECOM-Empresa Nacional de Telecomunicaciones como de EMCALI).

Elementos de Distribución. Los puntos más vulnerables son los sistemas de soporte de los equipos y las edificaciones que los albergan, ya que, por lo general, son bastante antiguas y no cuentan con un diseño sismoresistente adecuado. Así, se determinaron como centrales con prioridad de evaluación las siguientes (ver Figura 6):

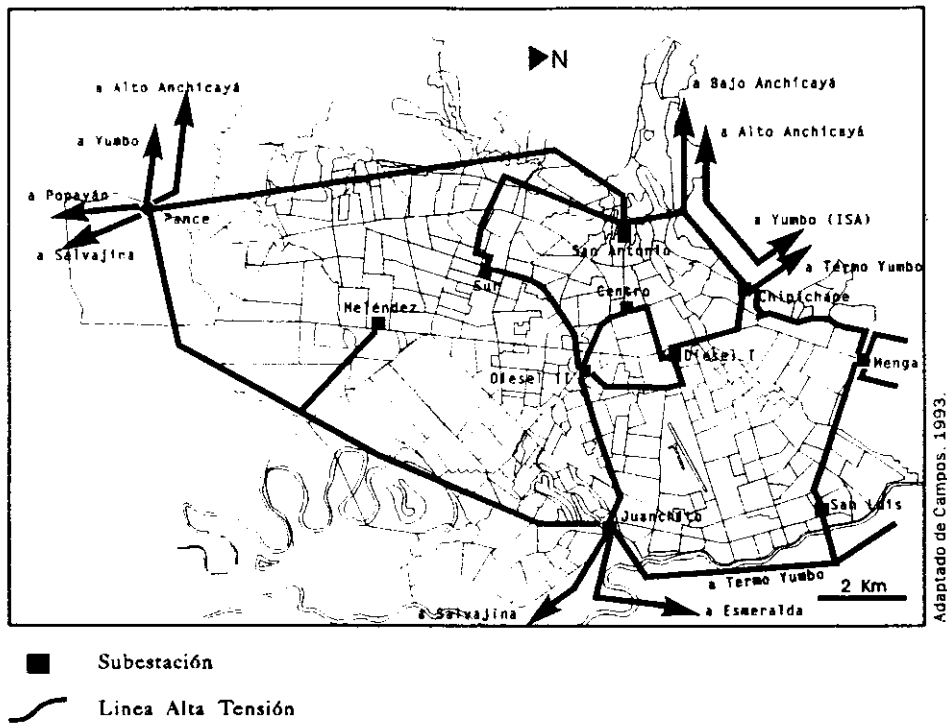


Figura 5. Sistema de energía

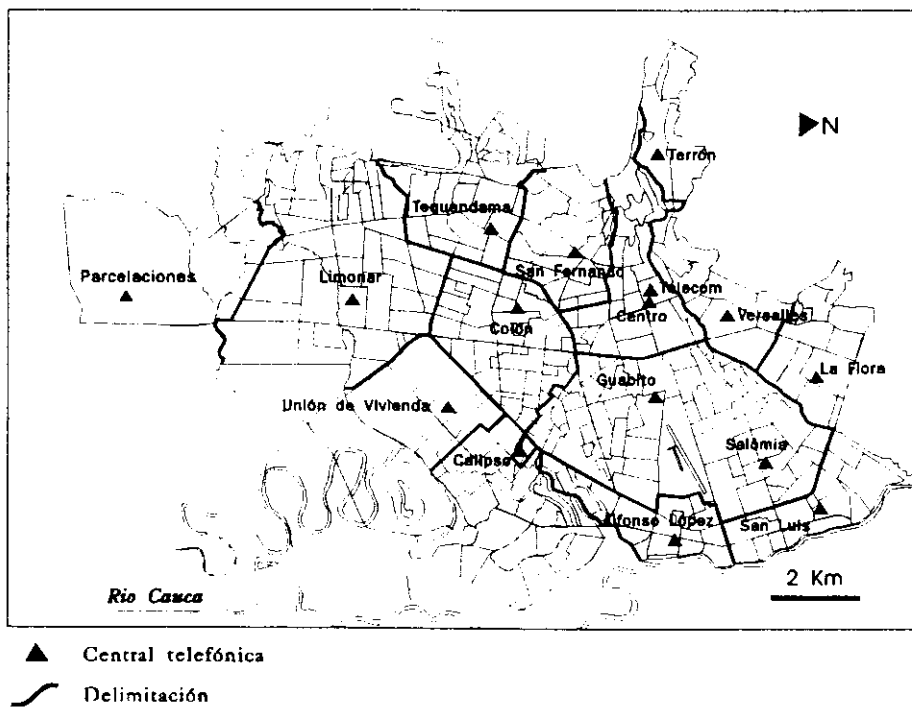


Figura 6. Centrales telefónicas

El Centro por su importancia en las interconexiones con TELECOM, por el porcentaje de líneas allí concentradas, por la antigüedad de la edificación y por cubrir junto con la central de Versailles un área donde son muy importantes las comunicaciones para la atención de emergencias.

Las centrales de San Fernando, Guabito y Limonar, comprenden un gran porcentaje de líneas y también son de construcción antigua, merecen especial atención los suelos sobre los cuales se encuentra ubicada la última.

Las centrales de Colón, Tequendama, La Flora y Salomia, abarcan el 31% de las líneas, aproximadamente, y son edificaciones, aunque más recientes que las anteriores, construidas antes de la existencia del CCCSR-84. Tienen el agravante de estar localizadas sobre suelos blandos con potencial de amplificación y de licuación. En la central de Colón se identificaron agrietamientos severos en un muro en el primer piso, lo cual puede ser debido a la combinación de problemas de suelos con las vibraciones de los últimos sismos con efectos en Cali (Chocó, noviembre 19 de 1991; Urabá, octubre 18 de 1992).

Para las otras centrales se considera que la prioridad de evaluación es baja y aunque algunas están localizadas en zonas de potenciales problemas de suelos, son edificaciones construidas recientemente y por lo tanto se supone que han sido diseñadas bajo los parámetros del CCCSR-84, además cubren una porcentaje muy pequeño de las líneas telefónicas de la ciudad. Vale la pena destacar que esta situación debe ser revaluada en caso de existir proyectos de ampliación.

ESTIMACION DE LAS PERDIDAS ECONOMICAS, CALCULO DE LA CAPACIDAD RESIDUAL Y EL TIEMPO DE RECUPERACION

En la medida en que se dispone de mejor y mayor información en cuanto a las amenazas y las características de los sistemas, se están mejorando los análisis y por lo tanto los resultados. La etapa que sigue una vez identificados los posibles daños, es calcular las pérdidas económicas directas, la capacidad residual de los sistemas y evaluar el tiempo de recuperación necesario para volver al funcionamiento normal. Con este análisis se identifican cuales son los componentes más críticos y se toma una determinación sobre las medidas de mitigación necesarias.

MEDIDAS DE MITIGACION

Aunque todavía no se tienen los resultados finales de la evaluación de los posibles daños, se ha decidido dividir las medidas de mitigación en cuatro categorías generales (ATC 25-1): geotécnicas, estructurales, sistemáticas y operacionales, esto con el fin de reducir el impacto causado por un sismo e incrementar la confiabilidad operacional durante y después del terremoto. Una vez definidos los daños se determinarán las medidas específicas para cada caso, por ahora se pueden mostrar los lineamientos generales dentro de cada categoría.

MEDIDAS GEOTECNICAS

Dirigidas básicamente a mejorar las condiciones del suelo en el cual se encuentran localizados los elementos considerados como críticos, con el fin de reducir el impacto por licuación, deslizamientos, etc. Algunos métodos son: densificación, excavación y remoción de suelos, modificación de la geometría del sitio, rellenos, filtros, etc.

MEDIDAS ESTRUCTURALES

Reforzar estructuras, tuberías, conexiones, apoyos, etc; reemplazar elementos críticos por otros de mejor resistencia sísmica; proveer cimentaciones profundas donde se espera licuación; hacer o reforzar cimentaciones superficiales; diseñar elementos para resistir desplazamientos previamente calculados; construir estructuras de contención ; mejorar y adicionar válvulas para corte del servicio; aislar sísmicamente componentes o estructuras, etc.

MEDIDAS SISTEMATICAS

Se refieren a aquellas medidas relacionadas con la localización y composición de los sistemas y redes, por ejemplo: incluir nuevos elementos para aumentar la redundancia, relocalizar elementos para evitar las zonas de suelos pobres, etc.

MEDIDAS OPERACIONALES

Son procedimientos encaminados a definir la operación durante el sismo y a su restauración rápida en caso de que se vea interrumpida. Algunos ejemplos son: desarrollar un plan de emergencias y de recuperación; asegurar que el personal conozca plenamente sus responsabilidades; identificar los componentes más vulnerables y mantener existencias de sus repuestos; identificar los requerimientos de ayuda mutua a través de contratistas, proveedores y empresas de otros municipios; tener mapas detallados de todo el sistema y guardar copias en diferentes lugares; etc.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que hay una mayor concentración de amenazas colaterales en la zona oriental de la ciudad; allí se encuentran localizadas dos de las principales plantas del acueducto con sus tuberías de conducción, y es además la zona más baja de la ciudad, en donde se concentran los colectores y canales más importantes del sistema de alcantarillado.

Se estima que la vulnerabilidad física de los sistemas es alta ya que en la mayoría de los casos fueron diseñados sin considerar los conocimientos actualmente disponibles sobre los parámetros de amenaza y los criterios de diseño sismoresistente. Por ello es necesario evaluar con mayor detalle tanto las instalaciones, plantas y redes, como los soportes de equipos.

La vulnerabilidad funcional se expresa básicamente en la falta de redundancia y de flexibilidad de los sistemas, los elementos principales al fallar pueden causar la salida de servicio de gran parte de ellos.

Es apremiante ajustar adecuadamente las formas espectrales a las condiciones locales y coordinar el desarrollo urbano de la ciudad teniendo en cuenta los efectos potencialmente graves, para esto es necesario que se desarrollen investigaciones sobre el potencial de amplificación por efecto del suelo (estudios de microzonificación).

AGRADECIMIENTOS

El OSSO agradece a todas las dependencias de servicios públicos en Cali su cooperación con sugerencias e información. Al grupo de vulnerabilidad de acueducto y alcantarillado, a los grupos operativos y de seguridad de EMCALI por su permanente apoyo y al Ingeniero Germán Villafañe de la Universidad del Valle por sus comentarios y aportes sobre características geotécnicas de algunos lugares de la ciudad.

La autora agradece a las personas que colaboraron en la elaboración del informe, y en especial a Jorge Mendoza del OSSO quien procesó la información gráfica.

REFERENCIAS

ALVA. J., et. al. (1990). "El Terremoto de Loma Prieta-San Francisco del 17 de Octubre de 1989". CISMID. Lima.

ATC 25-1 "A Model Methodology for Assesment of Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Water Supply Systems". Report by Applied Technology Council. Redwood City, CA, 1992.

CAMPOS, ANA (1992). "Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali". Informe Final proyecto UNDRO/ACDI/DN-PAD - Fase I.

CAMPOS, ANA (1993). "Vulnerabilidad de Líneas Vitales" Informe preliminar proyecto UNDRO/ACDI/DN-PAD/MUNICIPIO DE CALI - "Mitigación del Riesgo Sísmico en Cali" - Fase II. UNIVALLE - Observatorio Sismológico del Suroccidente. Cali.

CCCSR-84. "Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes". Decreto 1400 de 1984. Cámara Colombiana de la Construcción.

CONSORCIO GOARH (Gandini y Orozco Ltda, Angel y Rodríguez, Hidrotec) (1989). "Estudio de Mejoras y Ampliaciones al Acueducto de Cali". EMCALI, 10 volúmenes. Cali.

EMCALI. Informes de Balance y Servicios Anuales.

GARCIA L.E., SARRIA A., ESPINOSA A., BERNAL C., PUCCINI M.(1984) "Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia". Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá.

KATAYAMA, T. (1991) "Zonation Issues in Lifeline Earthquake Engineering". Proceedings, IV International Conference on Seismic Zonation, Vol. I. p323-353, EERI, Standford, California.

MEYER, Hj. (1983) "Un Sistema Regional de Observación e Investigación Sismológica para el Suroccidente Colombiano". Propuesta a Colciencias. Universidad del Valle, inédito.

MEYER, Hj. (1989) "Un Sistema Regional de Observación e Investigación Sismológica para el Suroccidente Colombiano". Informe Final a Colciencias. Universidad del Valle, 112p. Inédito.

VELASQUEZ A. y Hj. MEYER (1992). "Ofertas y Amenazas Ambientales en Cali". II Simposio Latinoamericano sobre Riesgo Geológico Urbano, II Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Simposio sobre Geología de las Ciudades de Colombia. Pereira.

VILLAFANE, G. (1989) "Factor de Suelos (S) para Evaluar la Vulnerabilidad Sísmica de las Edificaciones en Cali". Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Sección Mecánica de Suelos. 4p. Inédito. Cali

VILLAFANE, G. (1992) "Licuación de Depósitos de Arena y Asentamientos Esperados Durante un Terremoto". Séptimas Jornadas Geotécnicas-Geotecnia en la Infraestructura. Bogotá.