

Capítulo 4
Escenario de Desastre

CAPITULO 4 ESCENARIOS DE DESASTRE

4.1 Revisión de los Escenarios de Desastre Actuales

4.1.1 Terremoto

1) Origen

Para analizar el escenario actual de desastre por terremotos, se revisó el estudio previo de micro zonificación para la ciudad de Bogotá, terminado en 1997. Para dicho estudio se debió haber desarrollado una extensa base de datos para evaluar la amenaza sísmica en la ciudad de Bogotá, utilizando Sistemas de Información Geográfica (GIS). Sin embargo, el Equipo de Estudio no pudo encontrar la información básica en la base de datos de la DPAE desarrollada para el estudio de microzonificación. El Equipo de Estudio trató de recopilar datos numéricos originales del INGEOMINAS o de la Universidad de los Andes, pero sin éxito alguno. Los resultados publicados en las páginas web de la DPAE o del INGEOMINAS están en formato de imagen, y no se pueden volver a usar para el Estudio.

Por consiguiente, el Equipo de Estudio tuvo que desarrollar una nueva base de datos SIG para el presente proyecto.

A continuación se resumen los problemas de la base de datos de la DPAE:

- La mayoría son archivos de imágenes que no se pueden utilizar para nuevos análisis.
- Falta de organización en los archivos.
- Falta de información básica sobre infraestructura para realizar análisis de riesgos.
- Falta de descripción de su contenido; y
- Carencia de interacción humana para los usuarios finales.

La revisión de los reportes del sub-proyecto para el estudio de micro zonificación previo también revela una falta de información básica, la cual se menciona a continuación:

- No se describe el modelo numérico empleado para el cálculo del movimiento del suelo.
- La distribución de aceleraciones calculadas para Bogotá no se encuentra en ningún lugar de ninguna forma.
- Los datos básicos de entrada para el análisis del riesgo no están descritos; y
- Los métodos usados para el análisis de riesgo no están totalmente descritos en los reportes.

Por las anteriores razones, el Equipo de Estudio sólo pudo examinar los resultados finales del estudio previo de microzonificación.

2) Estudio de Microzonificación Sísmica en Bogotá

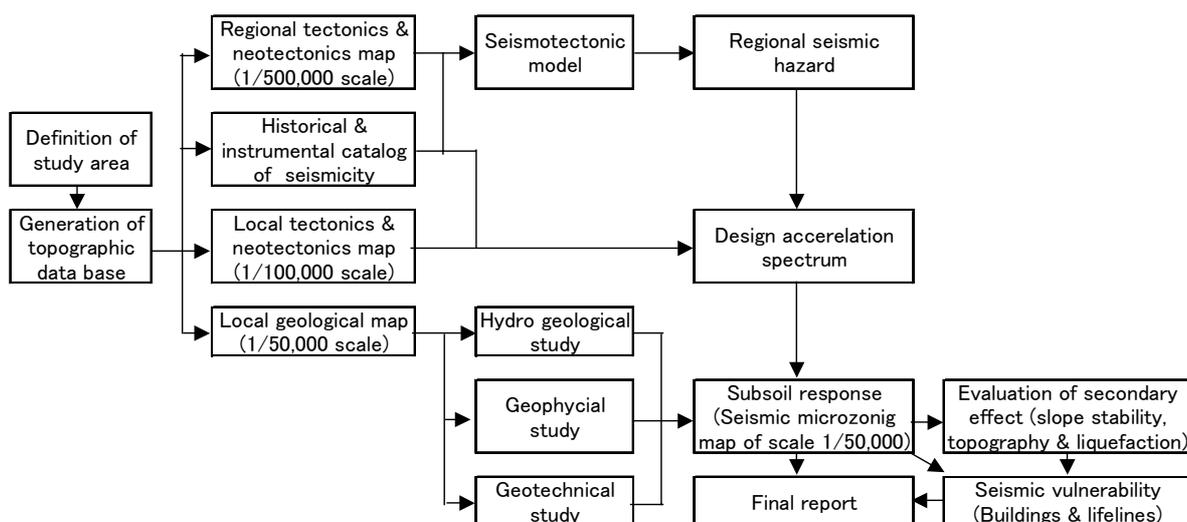
El estudio de microzonificación sísmica para la ciudad de Bogotá fue terminado en 1997 por el INGEOMINAS y la Universidad de los Andes, en colaboración con la UPES y la DNPAD. El estudio está compuesto por diecisiete sub-proyectos según se indica en la Tabla 4.1.1 y duró 28 meses en total.

La Figura 4.1.1 ilustra el diagrama de flujo del estudio de micro zonificación actual. El objetivo principal era evaluar el espectro del diseño para la ciudad de Bogotá según la zonificación geológica determinada por las respuestas sísmicas del subsuelo.

Tabla 4.1.1 Lista de Sub-Proyectos y Organización Ejecutora

No	Name of sub project	Executed organization
1	Technical direction	INGEOMINAS
2	Geological study	INGEOMINAS
3	Tectonics and neotectonics study	INGEOMINAS, UNIANDES
4	Hydro geological study	INGEOMINAS
5	Seismological study	INGEOMINAS
6	Microtremor	UNIANDES, INGEOMINAS
7	Geophysical study	INGEOMINAS
8	Recompilation of geotechnical information	INGEOMINAS
9	Boring execution	PSI limited.
10	Laboratory and field soil test for geotechnical zoning	UNIANDES
11	Seismic microzonation	UNIANDES
12	Interim and final reporting	INGEOMINAS
13	Technical direction	INGEOMINAS
14	Regional seismic hazard	UNIANDES
15	Seismic vulnerability	UNIANDES
16	Seismic vulnerability	UNIANDES
17	Interim and final reporting	INGEOMINAS

Fuente: Micro zonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS 1997



Fuente: Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS 1997

Figura 4.1.1 Diagrama de Flujo de la Evaluación de Amenaza Existente por Sismos

3) Estudio Geológico

En el estudio fueron seleccionaron tres tipos de terremotos (subducción, medio y falla cercana) como escenarios de terremotos según se aprecia en la Tabla 4.1.2. Se desarrolló una formula de atenuación usando los datos de movimientos del suelo observados en Colombia. La formula de atenuación calculó la aceleración de entrada en el basamento rocoso.

Tabla 4.1.2 Terremotos Usados en el Estudio de Microzonificación Sísmica en Bogotá

Type	Source	Distance(km)	Input acceleration at bedrock
Distant	Subduction	400	0.038g
Medium	Frontier of Cordillera Oriental	60	0.12g
Near	Local in Bogota area	15-20	0.20g

Fuente: Micro zonificacio sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS, 1997

En el estudio actual las fallas de terremotos potenciales están delineadas en tres niveles: a lo largo del país, un radio de 200 km y un radio de 50 km desde Bogotá. De este modo, esta delimitación cubre suficientes áreas de fallas potenciales conocidas que pueden afectar el Área del Estudio.

Estas fallas fueron examinadas para determinar características tales como longitud, tipo, movimiento anual, etc. En el actual estudio no sólo se usó la longitud de la falla sino también los tipos de fallas con el fin de evaluar la máxima magnitud probable.

En cuanto a la atenuación del movimiento del suelo, se creó una curva de atenuación usando los registros observados en Colombia con un número limitado de datos para el estudio actual. Debido a que existen características regionales en la atenuación, es apropiado seguir la curva existente.

Por las razones anteriores, se considera apropiado utilizar los cálculos de movimiento en el basamento rocoso existentes para el área de estudio, mientras que los valores de aceleración en la superficie son estimados en este estudio.

4) Estudio Geofísico

Se realizaron extensos estudios geofísicos para caracterizar las propiedades del suelo en Bogotá. La Tabla 4.1.3 enumera los métodos usados en la exploración geofísica y sus resultados. Dichos resultados se encuentran sintetizados para construir un modelo numérico del suelo, con el fin de calcular su respuesta sísmica.

Tabla 4.1.3 Métodos y Resultados del Estudio Geofísico

No	Method	Quantity	Maximam depth of	Result
1	Vertical geoelectric sounding	50 lines	< 500m	Resistivity profile
2	Gravity survey	320 points	< 1600m	Distribution of bedrock depth
3	Seismic reflection	15 lines, 10.12km	<2760m	P wave velocity structure profiles
4	Seismic reflection	15 lines, 10.12km	50 m to 170 m	P&S wave velocity structure profiles
5	Down hole logging	2 points	<13 m	P&S wave velocity structure profiles
6	Microtremor	72 points		Distribution of predominant period

Fuente: Microzonificación sísmica de Bogotá, INGEOMINAS 1997

5) Estudio Geotécnico

Se recopilaron datos de perforaciones existentes, incluyendo perforaciones geotécnicas y de aguas subterráneas. Adicionalmente se hicieron 38 perforaciones que se distribuyeron en toda el área de Bogotá, y se realizaron pruebas geotécnicas usando las muestras de suelo obtenidas según se indica en la Tabla 4.1.4.

Se usaron dichos resultados para evaluar las propiedades dinámicas del suelo en el cálculo de la respuesta sísmica del subsuelo. Se creó una formula de rigidez y una curva de amortiguamiento versus deformación cortante e índice de plasticidad.

El área mencionada en el estudio con licuación potencial en Bogotá no fue evaluada cuantitativamente, aunque dicha área fue definida con base en registros históricos.

Tabla 4.1.4 Pruebas Geotécnicas Realizadas y sus Cantidades

No	Geotechnical test	Quantity
1	Boring	38 points, 20m to 250m deep, 2483m exploration in total
2	Humidity measurement	2000 samples
3	Geotechnical classification	2000 samples
4	Apparent density measurement	1000 samples
5	Specific gravity	100 samples
6	Granulometry	100 samples
7	Simple compression test	1000 samples
8	Static triaxial test	170 samples
9	Dynamic triaxial test	100 samples
10	Consolidation test	100 samples
11	Bender element test	40 samples

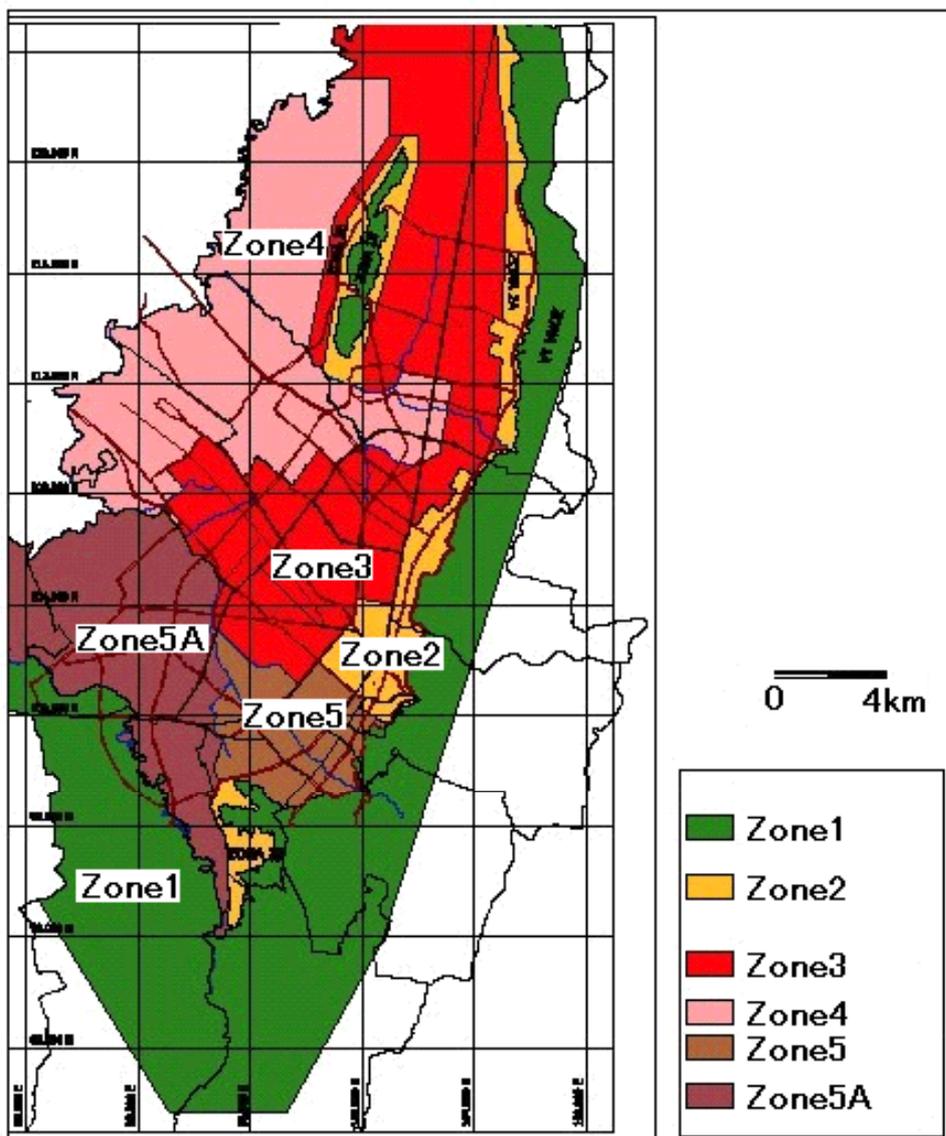
Fuente: Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS 1997

Con base en estos estudios de campo, el estudio clasificó a Bogotá en cinco zonas geotécnicas según se muestra en la Tabla 4.1.5 y la Figura 4.1.2.

Tabla 4.1.5 Microzonificación Geológica en Bogotá

Zone	Name
1	Mountainous
2	Piedmont
3	Lake deposit A
4	Lake deposit B
5	Terrace and cone
5A	Terrace and cone with liquefaction potential

Fuente: Micro zonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS 1997



Fuente: Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS 1997

Figura 4.1.2 Zonificación Geotécnica en Bogotá

6) Función de Daño

En el estudio anterior en la estimación de daños se asumió y se adoptó la función de daños de edificaciones según la definición del Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) y se clasificó la vulnerabilidad de las edificaciones en 7 tipos, principalmente para las unidades residenciales.

Las funciones de daño aplicadas parecen incrementar los factores de seguridad en comparación con las obtenidas en terremoto del Quindío.

7) Desastres Sísmicos

(1) Ciudad de Bogotá

De acuerdo con el estudio de micro zonificación sísmica, los daños sísmicos, como averías en edificios, servicios públicos y pérdidas humanas, fueron estimados con base en la aceleración por los tres tipos de terremotos para los casos diurno y nocturno. El número de personas en cada caso fue estimado con base en una población asumida según el tipo de edificación.

Para el estimado de pérdidas humanas y daños de edificaciones, la ciudad de Bogotá se dividió en 190 “celdas” en las cuales se presupone que la geología, y las divisiones constructivas y administrativas son homogéneas. El método empleado fue el ATC-13. La Tabla 4.1.6 muestra el total de daños como resultado de los tres escenarios de terremoto.

Tabla 4.1.6 Resultados de Pérdidas Totales por Escenario de Terremoto

Type	Daytime		Night		Lost house	Destructed area(million m2)	Damage cost (Million USD)
	Death	Injured	Death	Injured			
Near	3,500	20,000	4,500	26,000	74,000	33.8	14,000
Medium	1,600	9,000	1,400	7,700	44,000	20.6	8,800
Distant	300	1,600	350	1,900	27,000	12.3	5,100

Fuente: Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá, INGEOMINAS, 1997

Los daños a los servicios públicos como el acueducto, la electricidad y el gas fueron estimados con base en el ATC-13, al igual que las averías en las instalaciones telefónicas fueron estimadas con base en el ATC-13.

(2) Municipios en Cundinamarca

No se ha realizado ningún estudio de micro zonificación sísmica en los ocho municipios de Cundinamarca.

4.1.2 Deslizamiento

Sesenta y cinco por ciento 65% de los desastres en taludes en el Área de Estudio fueron deslizamientos y 89% de ellos ocurrieron en Bogotá. En los ocho municipios de Cundinamarca se destacan los flujos de detritos y las caídas de roca. Una de las principales características de los flujos de detritos y las caídas de rocas es una alta probabilidad de daños humanos y a la propiedad debido a que son fenómenos repentinos y rápidos, pero en la Ciudad de Bogotá las posibilidades de flujos de detritos son bajas.

En Bogotá se presentaron un par de flujos de detritos en los años de 1994 y 1995, sobre la margen derecha de la Quebrada Chiguaza a una elevación de 2940 m.s.n.m los cuales en el año de 1994 murieron dos personas y en 1995 una persona. Luego se construyeron gaviones en las riberas del río entre 1996 y 1997. Al mismo tiempo en los lugares donde existían puentes, el río fue

ensanchado y se trasladaron 63 casas. Adicionalmente, 300 casas ubicadas cerca al río o aguas abajo del mismo fueron trasladadas.

En el sitio, el lecho del río tiene pocos sedimentos; el ancho del cauce es de aproximadamente 5 m de ancho y la altura de sus riberas es de 5 m la izquierda y 2 m la derecha. Existe una cantera aguas arriba del río (Canteras El Zuque, a 3.280 m de altura) propiedad de la ciudad de Bogotá y se dice que es la fuente de los flujos de detritos. Es probable que una corriente de agua de gran densidad, causada por el drenaje de la cantera, junto con algunas rocas se deslizara, arrastrando la masa de suelo aguas abajo de la cantera, y acumulándose en una zona angosta del río en un área densamente poblada y en los lugares donde se encontraban los puentes.

De acuerdo con la observación de la cantera, los dos lados de la corriente principal están muy excavados (especialmente la ribera izquierda) y existe gran cantidad de rocas localizadas hacia la corriente. Como el lomo divisorio está cerca de la parte interna de la cantera, la cuenca de desagüe no es muy grande. La capa superficial de suelo de la ladera natural sobre la pared de roca excavada posee poco espesor, y la posibilidad de descarga es baja.

Con base en las condiciones arriba mencionadas, se concluye que el origen del flujo de detritos en el sitio no es la capa superficial del suelo en los taludes naturales ni en el sedimento del lecho del río, sino agua recolectada en la cantera que fluye con trozos de rocas. Por consiguiente, el desastre en el sitio se puede prevenir retirando dichas rocas y construyendo una represa tipo ranura aguas debajo de, o en la cantera. Este flujo de detritos es un caso especial y se espera que no ocurran en otros ríos en la ciudad de Bogotá.

Aunque han ocurrido muchos deslizamientos en la ciudad de Bogotá sólo ha muerto una persona en los últimos 5 años. Esto indica que hay suficiente tiempo para evacuación o contramedidas, antes de que ocurra el desastre en caso de deslizamientos. Además, los indicios de deslizamientos también se pueden ver fácilmente con antelación en las áreas densamente pobladas. Siendo este uno de los factores que reduce el riesgo de pérdidas humanas debido a fenómenos de remoción en masa.

El escenario de desastre de deslizamientos causados por terremoto se tiene en cuenta usando la aceleración lateral del suelo en el análisis de estabilidad de los taludes. Sin embargo, sólo se toma en cuenta en cada diseño individual de contramedidas y no se presenta un mapa de amenazas.

4.1.3 Inundación

El mapa de riesgo por inundación de la ciudad de Bogotá, sirvió como base para la creación del escenario de dicho evento. Dicho mapa fue preparado para las áreas de amenaza por inundación teniendo en cuenta períodos de retorno probables de 100 y 10 años.

Los ocho municipios de Cundinamarca presentan mapas de riesgo por inundación preparados con base en áreas ya predeterminadas, sin evaluación alguna de los aspectos hidrológicos.

Para poder desarrollar un mapa de riesgo por inundación óptimo para el área Metropolitana de Bogotá, es necesario realizar un análisis de inundación del Río Bogotá e identificar sus problemas.

4.1.4 Instalaciones Industriales

La Universidad de los Andes realizó un estudio sobre el efecto potencial de las instalaciones industriales de Puente Aranda y Fontibón sobre:

- La vida de los empleados de la industria.
- La infraestructura de servicios públicos.
- El equipamiento urbano.
- La actividad del área productiva de la ciudad.
- Las instituciones que soportan la sociedad (colegios).
- Instalaciones de eventos masivos.
- Centros de salud.

El proceso de generación de riesgo puede definir varios escenarios de fallas. Por ejemplo, si se toma un terremoto como un proceso de generación de riesgo, habrían escenarios definidos en términos del terremoto más probable, el más frecuente, etc. Sin embargo, lo que la Universidad de los Andes estudió fueron eventos como incendio, explosión, derrame y fugas en situaciones normales, y no en caso de un terremoto.

El modelo en discusión debe llevar a la definición de un cierto nivel de consecuencias por escenario considerado, y los resultados por escenario pueden presentar diferentes niveles de evidencia que soportan la decisión final. En general, las consecuencias se deben evaluar en términos de vidas humanas, aspectos económicos y daños a la infraestructura física. La consecuencia se debe definir con base en un parámetro o un índice que soporte la decisión. A continuación se presentan los comentarios del Equipo de Estudio sobre el estudio de la Universidad de los Andes:

- El método de análisis usado por la Universidad de los Andes es casi el mismo método (Incendio, Fuga, Derrame) aplicado en el Japón, salvo por la influencia de la presión debido a una explosión ($11,760\text{Pa} = 0.12\text{kgf/cm}^2$), que corresponde al estallido de los vidrios. Esto es importante porque el grado de daño al público se determina por la presión del estallido en las áreas residenciales.

- Para el cálculo de la fuga se asume la cantidad de la sustancia química, sin embargo, el supuesto de la cantidad de fuga real en caso de un verdadero accidente es difícil de calcular. Entonces se debe aplicar como escenario el peor caso, como en EPA o en OSHA para juzgar el riesgo. El peor escenario es probable durante un terremoto fuerte.

4.2 Nuevo Escenario de Desastre

4.2.1 Terremoto

1) Concepto Básico de Microzonificación

(1) Microzonificación sísmica

Para mitigar el daño debido a un posible desastre futuro en una área dada, es importante conocer el historial de desastres en ella, para entender su estado actual de prevención de desastres y respuesta y evaluar posibles desastres futuros en dicha área.

En este estudio, la microzonificación sísmica se define como la evaluación de la amenaza y el riesgo de un posible terremoto que afecte el área de estudio.

La microzonificación sísmica es uno de varios estudios de diagnóstico para evaluar las amenazas sísmicas tales como la distribución del movimiento del terreno o la licuación, y los deslizamientos en una área dada debido a un posible terremoto, para luego evaluar los riesgos asociados a estos eventos como pérdidas humanas, daños a las edificaciones y daños a las líneas de servicios públicos. El resultado de dicho estudio será usado como información básica para preparar un plan efectivo de mitigación de desastres. El estudio de microzonificación considera el estudio del área como una colección de pequeñas zonas subdivididas llamadas microzonas, usadas como unidad para la evaluación de la amenaza y el riesgo. El estudio de microzonificación sísmica debe evaluar el posible daño para grandes cantidades de datos en el área de estudio como la población, los edificios y la infraestructura; este estudio usa un enfoque estadístico. El diagrama de para la evaluación de la microzonificación sísmica en el Estudio se presenta en la Figura 4.2.1.

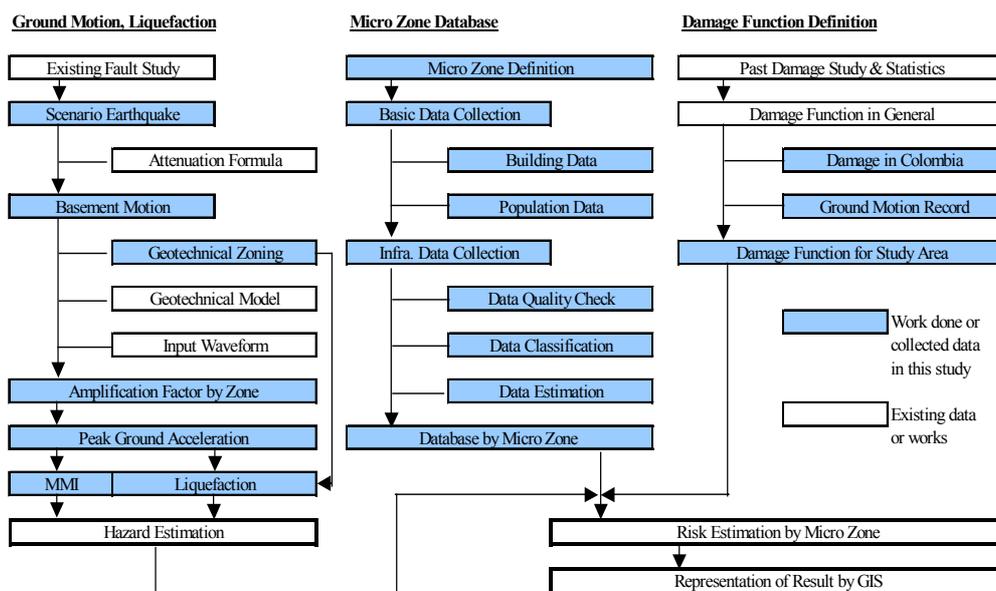


Figura 4.2.1 Diagrama de Flujo de la Microzonificación Sísmica del Estudio

2) Condiciones Básicas

(1) Escenario de terremoto

A. Parámetro de falla

Este estudio considera tres escenarios de terremotos, los mismos empleados en el estudio de microzonificación previo. Ellos son MZSB97 (microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá, 1997): “Terremoto cercano” que estudia los efectos de fallas en un radio de 50 km de Bogotá. El “Terremoto regional” que estudia los efectos de fallas en un radio de 200 km de Bogotá y los eventos de subducción en la costa Pacífica a una distancia de 400 km de Bogotá. En la MZSB97, se asumió una distribución uniforme de la aceleración del manto rocoso en Bogotá. Se considera que los escenarios de terremotos para el Estudio tienen un enfoque más específico y realista por las siguientes razones:

- Se ha considerado una distribución no uniforme de la aceleración del manto rocoso debido a una mayor extensión espacial del área de estudio; y
- Se ha considerado que los terremotos más probables y típicos simulan las situaciones más realistas en un posible evento para la planificación de la mitigación del desastre.

Por consiguiente, entre las fallas enumeradas en las Tablas 2.1.2 y 2.1.3, se seleccionaron dos fallas como escenarios de terremotos para evaluar el análisis de riesgos, adicionales al evento de subducción, el cual no está especificado. Los siguientes son los criterios para seleccionar las fallas:

- Fallas clasificadas como de “Gran actividad”.
- Fallas con mayor “Magnitud máxima probable”.
- Fallas que satisfacen la distancia especificada en la MZSB97.

En cuanto a los parámetros de las fallas, las magnitudes se tomaron del MZSB97, estimadas según las características de esta, como por ejemplo el tipo de falla. La longitud de ruptura de la falla se toma como un segmento de longitud indicado como “Longitud con alcance neotectónico” en MZSB97. Como resultado de lo anterior, la Tabla 4.2.1 muestra los escenarios de terremoto para el Estudio.

Tabla 4.2.1 Fallas para Escenarios de Terremotos

Case	Fault name	Type	Magnitude	Total fault length (km)	Fault rupture length (km)	Distance (km) *
1	La Cajita	Near	6.4	35	10	20
2	Guayuriba	Regional	7.0	60	29	60
3	Subduction	Subduction	8.3	--	--	400

* Distancia más cercana de INGEOMINAS
Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogota, INGEOMINAS 1997

B. Atenuación del movimiento a nivel del basamento rocoso

Basamento sísmico

Las ondas sísmicas generadas por el movimiento de la falla se extienden a lo largo del basamento rocoso a medida que su amplitud disminuye con la distancia, y finalmente se amplifica por el efecto de la geología de superficie. El basamento sísmico se define como el estrato geológico donde la onda sísmica incidente puede tratarse comúnmente, la variación de la impedancia por debajo del estrato es insignificante y donde la onda sísmica es geológicamente uniforme. Luego la aceleración del suelo se puede tratar según los efectos de la geología en superficie.

Relación de la atenuación

Existen varios estudios para evaluar la atenuación del movimiento del suelo. La Figura 4.2.2 muestra la atenuación del movimiento del suelo usado para el Estudio, propuesto por McGuire (1974) según se indica en la ecuación 4.2.1. Se usa ésta ya que ofrece casi el mismo valor que la curva de atenuación propuesta en la MZSB97.

$$A=472*e^{0.64M}*(R+25)^{-1.30} \quad (\text{Ecuación 4.2.1})$$

En la cual:

A: Aceleración en el basamento rocoso (gal).

M: Magnitud del terremoto.

R: Distancia a la falla (km).

El centro de cada microzona se toma como el punto de cálculo. Se toma la distancia de cada punto de cálculo hasta la falla como la distancia mínima desde la falla para los casos 1 y 2. En cuanto al caso 3, se usa el valor uniforme en el basamento debido a que el área de Estudio está a 400 km desde la fuente, de tal forma que la diferencia en distancia es insignificante.

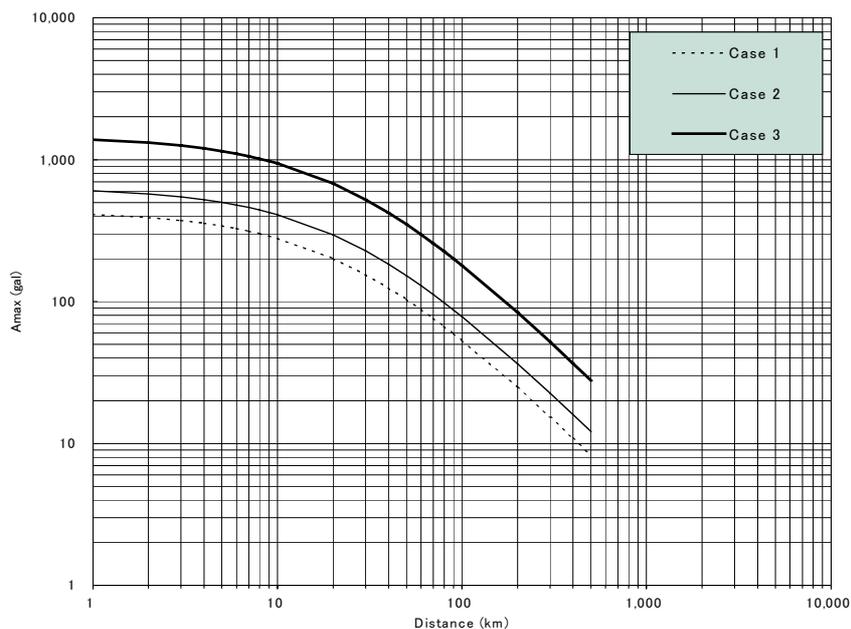


Figura 4.2.2 Atenuación del Movimiento del Suelo en el Basamento

C. Distribución de la aceleración en el basamento rocoso

La aceleración del manto rocoso se calcula a partir del centro de cada microzona, usando la magnitud de cada falla y la distancia.

Caso-1: Falla La Cajita

La Falla La Cajita está ubicada al sur de Soacha, así que la aceleración en la base rocosa es de hasta 0.5 g en el sur del área de Estudio, debido a su proximidad a la falla. En el sur de Bogotá la aceleración en el basamento rocoso varía entre 0.2 g y 0.3 g.

Caso-2: Falla Guayuriba

La mayor parte del área de estudio está entre aceleraciones de 0.1 g a 0.2 g. En la parte nororiental del área de estudio, la aceleración del basamento rocoso es inferior a 0.1 g debido a la atenuación.

Caso-3: Subducción

La aceleración en el basamento rocoso es igual para toda el área de estudio debido a que ésta se encuentra a considerable distancia de la falla.

(2) Evaluación de la geología de superficie

A. Zonificación geológica

Recopilación de datos geológicos

Basados en la interpretación de fotos aéreas y visitas de campo para verificar el mapa geológico existente, se preparó un mapa de zonificación geológica para el área de estudio a escala 1/50,000, el cual sirvió como base para realizar un mapa de zonificación geotécnica.

B. Zonificación geotécnica

El Equipo de Estudio recopiló datos de perforaciones de organizaciones relacionadas como la DPAAE, INGEOMINAS, EAAB, CAR, DAMA, IDEAM, INVIAS, la gobernación de Cundinamarca, el departamento de planeación de cada municipio, etc.

Recopilación de datos de las perforaciones geotécnicas

La Tabla 4.2.2 muestra la información recopilada de 417 perforaciones geotécnicas. De estos, se han usado 254 que poseen coordenadas y que están distribuidas entre todas las municipalidades del área de estudio. Esta información contiene resultados de pruebas en el sitio pero la profundidad de exploración es inferior a 30 m fuera de Bogotá.

En Bogotá hay 57 perforaciones con propiedades geotécnicas, lo que permite un análisis de la respuesta sísmica. Sin embargo, no hay suficiente información de las perforaciones en los municipios de Cundinamarca para llevar a cabo dicho análisis.

Tabla 4.2.2 Número de Perforaciones Geotécnicas Utilizadas en el Análisis

Municipality	No. of study	No. of boring	No. of boring with coordinate	Explorated depth(m)
Bogota	N/A	57	57	20.0 - 250.0
Chia	8	45	15	2.5 - 7.0
Cota	5	15	8	5.0 - 21.0
Facatativa	9	76	50	3.0 - 20.0
Funza	3	17	17	2.0 - 14.0
La Calera	7	43	27	2.5 - 10.0
Madird	4	39	30	4.0 - 12.0
Mosquera	8	83	44	4.3 - 30.0
Soacha	5	42	6	3.0 - 5.0
Total	49	417	254	

Fuente: Equipo de estudio JICA

Recopilación de datos de la perforación de agua subterránea

La Tabla 4.2.3 muestra la distribución de la información del estudio de aguas subterráneas. En total se recopilaron 59 sitios de exploración. Dichas perforaciones llegaron hasta los 530 m de profundidad como máximo y sólo contienen descripciones geológicas.

Tabla 4.2.3 Número de Perforaciones de la Capa Freática con la Información Recopilada

Municipality	No. of boring	Explorated depth(m)
Chia	2	121.0 - 145.0
Cota	9	48.0 - 530.0
Facatativa	12	60.0 - 400.0
Funza	12	173.0 - 510.0
La Calera	0	N/A
Madird	18	140.0 - 400.0
Mosquera	3	202.0 - 500.0
Soacha	3	201.5 - 360.0
Total	59	

Fuente: Equipo de estudio JICA

Zonificación geotécnica

El mapa de la zonificación geotécnica, evaluada a escala de 1/50,000, se basó en la información de las perforaciones, el mapa topográfico y el mapa de zonificación geológica. La Tabla 4.2.4 presenta la clasificación con la correspondencia de las zonas evaluadas en la MZSB97.

Tabla 4.2.4 Clasificación Geotécnica Definida en este Estudio

Zone	Zone in MZSB97	Name	Characteristics
1	1	Sedimentary rock predominantly sandy	Sandstone of Guadalupe group, sandstone formation of Regadera, Cachi formation
2	1	Sedimentary rock predominantly clayey	Chipaque, Guaduas and Bogota formation
3	2	Residual soil	Product of meteorization from parental material
4	2	Piedmont soil	Deposit of slope or pending (located preferentially in the base of the hills in the form of cone or fan) Slopes, coluvions, and fluvigracial deposit.
5	5, 5A	Terrace and cone	Preconsolidated clay with intercalation of sandy soils. It can contain layers of peat of thickness less than 4m in the depth deeper than 30m.
6	3	Lake deposit A	Soft clay of high compressibility with thickness more than 50m.
7	4	Lake deposit B	Soft clay of higher compressibility, with thickness from 200m to 400m or more.
8	--	Riverbed and wetland	Clayey deposit of lacustrine origin or of alluvial type inundation. In this zone also exist the body of water such as river, quebrada, wet zone, old lakes and inundation zone.
--	--	Garbage fill	Filled by garbage
--	--	Excavation	Filled excavation

Fuente: Equipo de estudio JICA

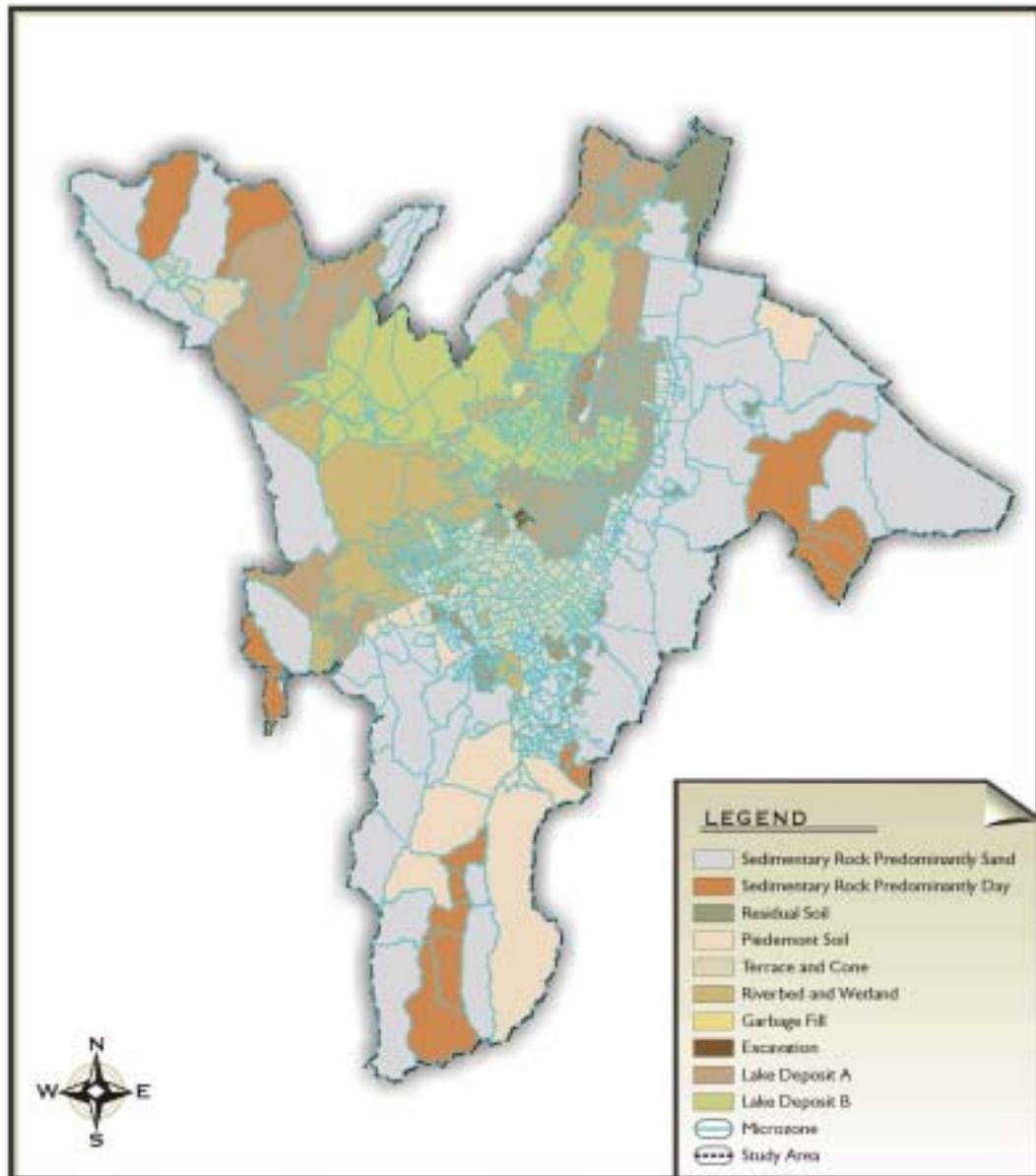


Figura 4.2.3 Clasificación Geotécnica por Micro zonas

Fuente: Equipo de estudio JICA

C. Función de transferencia para la geología de superficie

Las propiedades dinámicas del suelo tales como la variación en el módulo de corte son necesarias para evaluar la respuesta sísmica, mientras la disminución de la amplitud de onda versus las deformaciones de corte son requeridas para evaluar el comportamiento no lineal del suelo a mayor nivel de deformación. Dichas propiedades son evaluadas para diferentes suelos cohesivos y granulares a partir de pruebas de laboratorio y de datos geotécnicos recopilados usando el índice de plasticidad (I_p) como un índice en la MZSB97. Las Figuras 4.2.4 y 4.2.5 muestran dichos resultados.

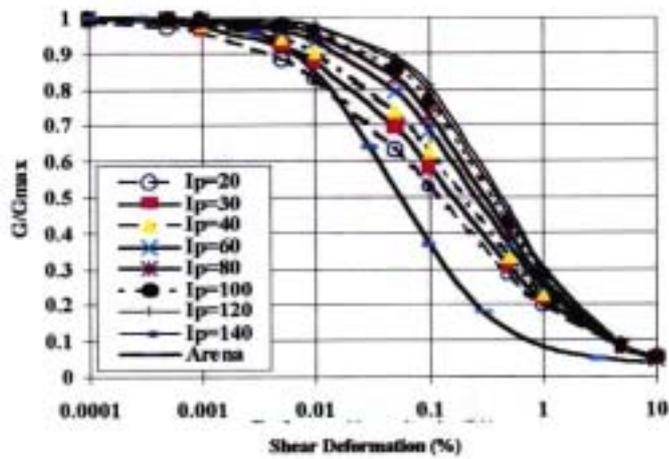


Figura 4.2.4 Modo de Corte con Variación del Suelo en Bogotá

Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogota, INGEOMINAS 1997

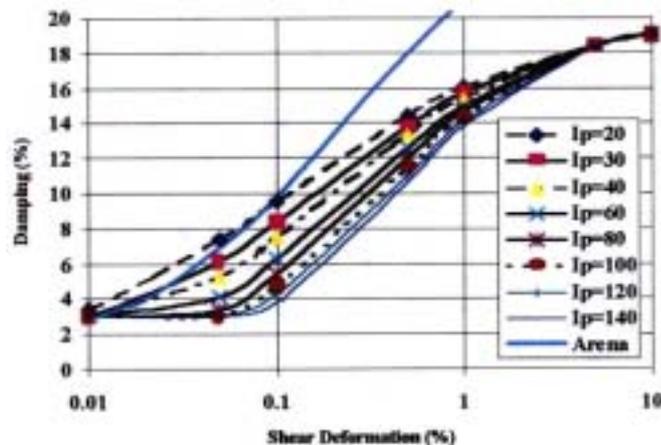


Figura 4.2.5 Variación del Suelo por Amplitud de Onda en Bogotá

Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogota, INGEOMINAS 1997

Usando las propiedades dinámicas del suelo, se realiza un cálculo de la respuesta uni-dimensional; la función de transferencia resultante para los sitios de las perforaciones en Bogotá se muestra en la Figura 4.2.6. Sin embargo, los datos geotécnicos recopilados para los municipios en Cundinamarca no incluyen las propiedades dinámicas para calcular la función de transferencia. Por consiguiente, para estimar dicha función en estos municipios se tomaron los siguientes pasos:

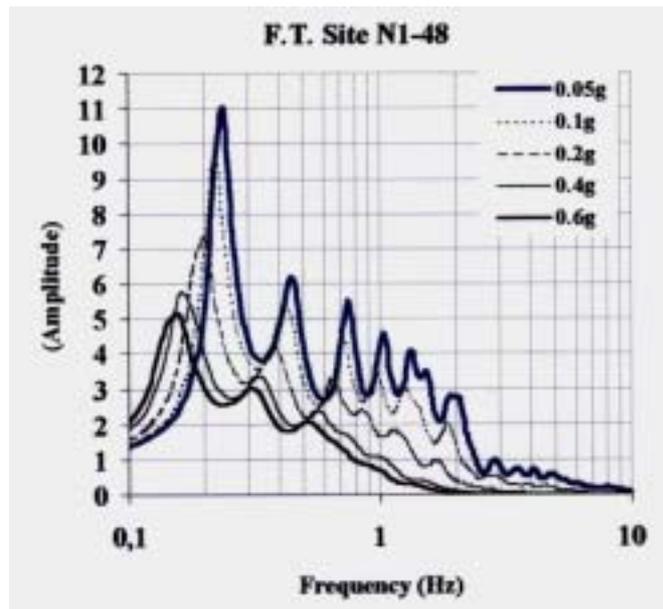
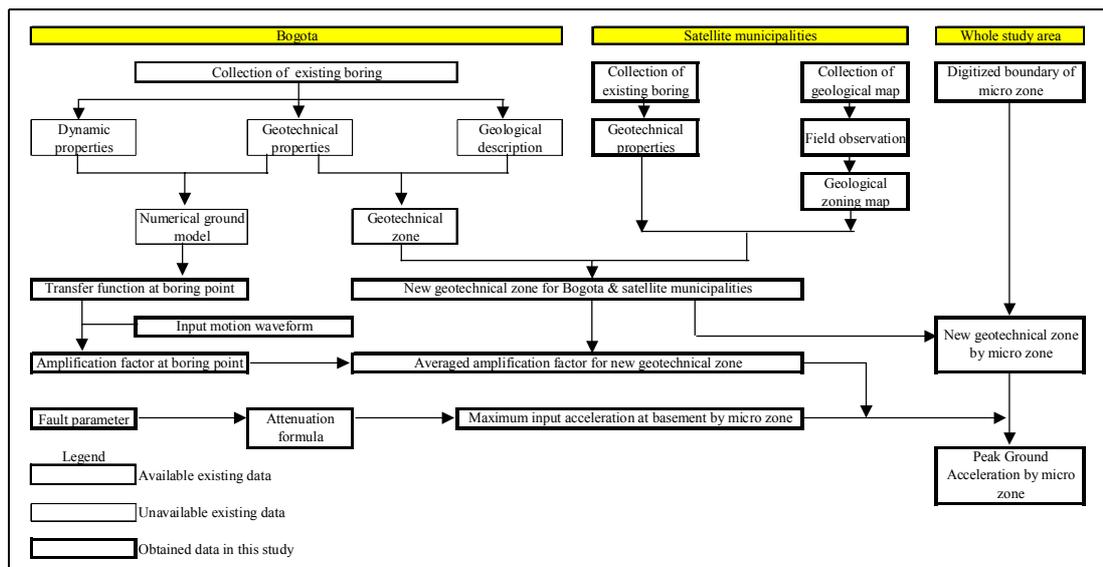


Figura 4.2.6 Ejemplo de la Función de Transferencia Calculada

Fuente: Equipo de estudio JICA

- Calcular la PGA (Aceleración Pico del Terreno) en 57 puntos para 3 formas de ondas de entrada.
- Calcular el factor de amplificación (PGA / nivel de entrada) para cada cálculo.
- Calcular el factor de amplificación promedio para cada zona geotécnica.
- Calcular la aceleración pico de terreno (PGA), multiplicando la aceleración del basamento rocoso por el factor de amplificación para toda el área.

La Figura 4.2.7 muestra un diagrama del proceso de esta aplicación.



Fuente: Equipo de estudio JICA

Figura 4.2.7 Diagrama de Flujo para Calcular la Aceleración Pico del Suelo

(3) Cálculo de movimiento fuerte

A. Registros de entrada del movimiento del suelo

Los registros de entrada de la forma de la onda usados en este estudio para calcular la aceleración del suelo son los mismos usados en la MZSB97, según se muestra en la Tabla 4.2.5; y la Figura 4.2.8 presenta las formas de onda.

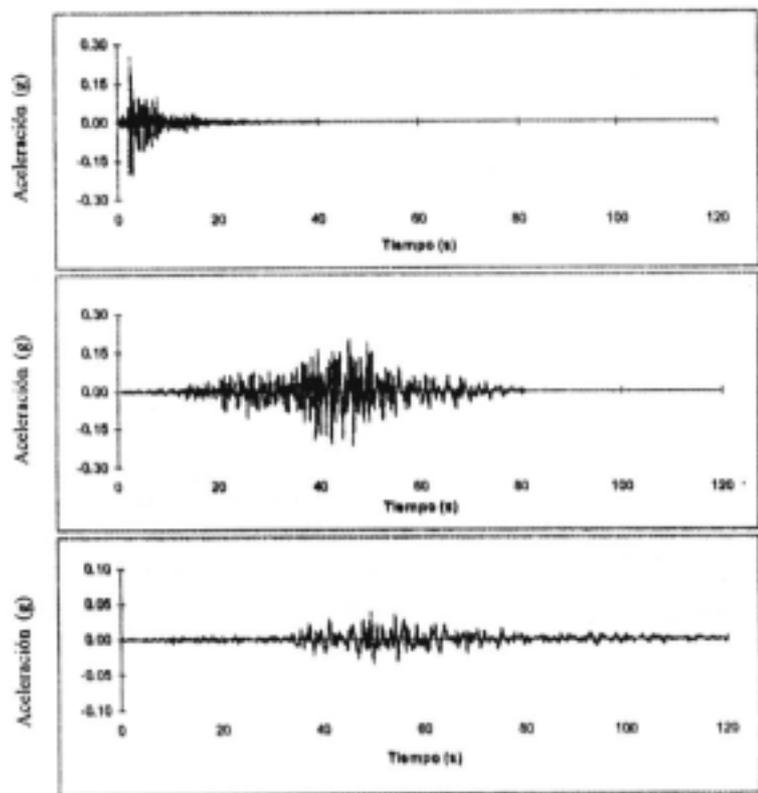
Tabla 4.2.5 Formas de Onda de Entrada

Case	Site name	Earthquake name	Date	Magnitude	Distance (km)	Input level (g)**
1	Corralitos	Loma Prieta, USA	198910/17	Ms=7.0	10	0.20
2	El Rosal	Tauramena, Colombia	1995/1/19	Ms=7.2*	60	0.12
3	Ciudad Universitaria	Michoacan, Mexico	1985/8/19	Ms=8.1	400	0.038

* Synthesized from original record

** Input level at INGEOMINAS

Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogota, INGEOMINAS 1997



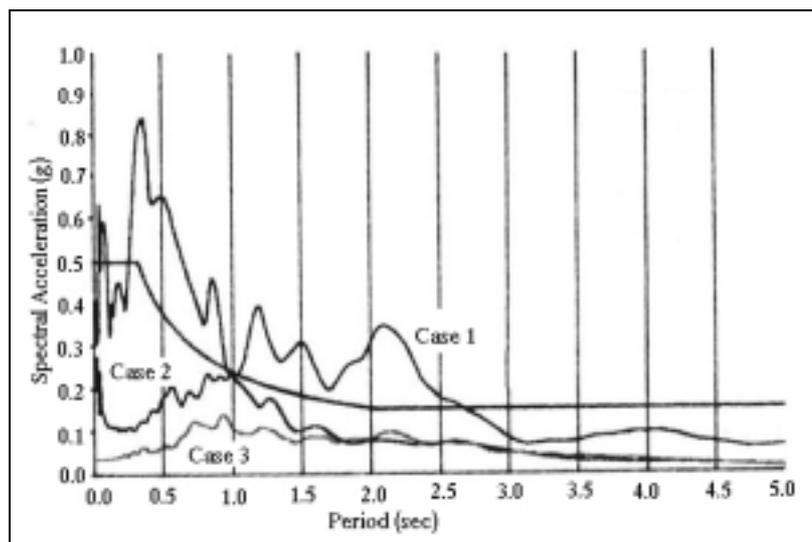
Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogota, INGEOMINAS 1997

Figura 4.2.8 Formas de Onda de Entrada (Superior: Caso 1, Centro: Caso 2, Inferior: Caso 3)

Los registros usados para el caso 1 y el caso 3 fueron obtenidos durante terremotos de gran magnitud a distancias similares respectivamente. El registro usado para el caso 2 es sintético

calculado por el método de la Función Empírica de Green a partir de terremotos de menor magnitud.

Cada registro muestra diferentes componentes de frecuencia y amplitud espectral según se muestra en la Figura 4.2.9, pues fueron obtenidos de diferentes tipos de eventos sísmico a diferentes distancias del epicentro. El registro para el caso 1 tiene un pico pronunciado a 0.4 segundos mientras que el del caso 2 tiene varios picos a 0.6 segundos, 1.1 segundos y 2 segundos. El registro para el caso 3 tiene un espectro uniforme, con un pequeño pico a 0.6 segundos.



Fuente: Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá, INGEOMINAS 1997

Figura 4.2.9 Espectro de Respuesta de las Ondas de Entrada

El pico de aceleración de la onda de entrada en cada punto de cálculo fue ajustada para equiparar la aceleración del manto rocoso según se calcula con la fórmula de atenuación, en un período dado. El Apéndice 4.2.3 muestra la aceleración del suelo.

B. Aceleración pico del suelo

La aceleración pico del suelo (PGA) se calcula usando un registro de movimiento de entrada y una función de transferencia. Resultado del cálculo muestran en Apéndice 4.2.4

Caso-1: Falla La Cajita

La PGA va desde 0.7 g hasta 1 g en aquellas microzonas donde se incluye la falla. Las microzonas en las cuales la PGA está entre 0.3 g y 0.5 g se observaron principalmente en la parte sur de Bogotá; sin embargo, también se observan dichas aceleraciones en algunas microzonas en la parte norte de Bogotá y parte de La Calera debido a la amplificación de sitio. En una gran parte del norte del Área de Estudio la PGA varía entre 0.1 g y 0.2 g.

Caso-2: Falla Guayuriba

La PGA varía desde 0.3 g hasta 0.5 g en el centro de Bogotá y la parte sur del Área de Estudio, pero la PGA disminuye de 0.2 g hasta 0.3 g en la parte noroccidental del Área de Estudio debido a la atenuación. La PGA en la mayor parte del suburbio del Área de Estudio está entre 0.1 g y 0.2 g.

Caso-3: Subducción

La PGA es inferior a 0.1 g en más de la mitad del Área de Estudio. En la parte central de Bogotá y el noroccidente del Área de Estudio, la PGA está entre 0.1 g y 0.2 g debido a la amplificación del depósito lacustre profundo.

C. Intensidad sísmica

La PGA se convierte en Intensidad Mercalli Modificada (MMI) usando la relación empírica propuesta por Trifunac & Brady presentada a continuación como la Ecuación 4.2.2 para evaluar varios riesgos. El Apéndice 4.2.5 describe la escala MMI.

$$MMI = (\text{Log}(PGA) - 0.014) / 0.3 \quad (4.2.2)$$

El Figura 4.2.10 muestra la distribución de la MMI para los 3 casos.

Caso-1: Falla La Cajita

En la parte sur del área de estudio, cerca de la falla, la MMI varía desde IX hasta X. Aunque la MMI está en VII en la mayor parte del área de estudio, algunas zonas alejadas de la falla están en VIII debido a la amplificación por la condición del sitio.

Caso-2: Falla Guayuriba

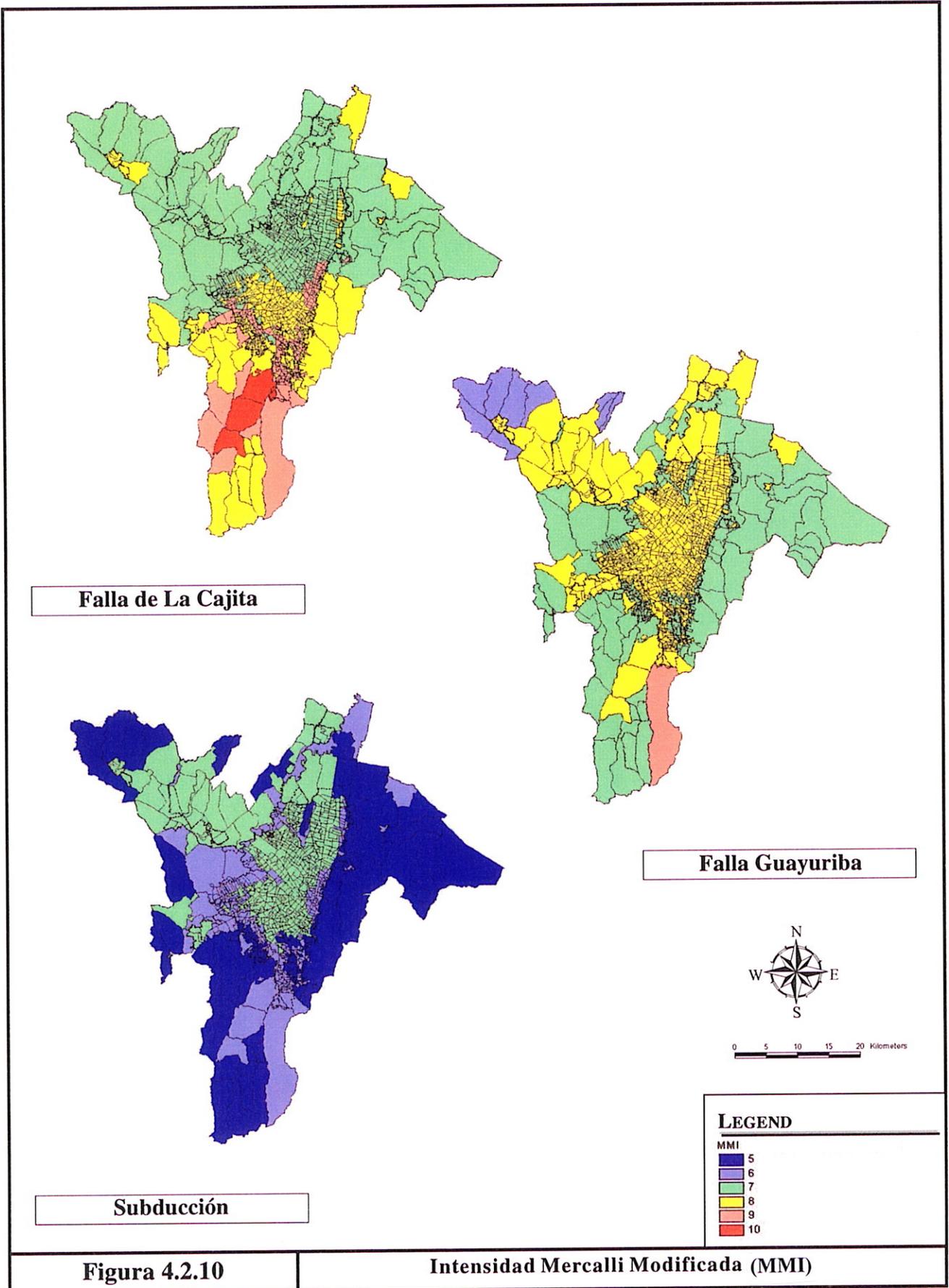
En la mayor parte del Área de Estudio, Bogotá y nor-occidente, la MMI parece ser VIII. El resto del área está en MMI de VII, salvo al nor-occidente del Área de Estudio con una MMI de V y una microzona en el borde sudeste que parece estar en una escala MMI de IX.

Caso-3: Subducción

Las microzonas con MMI de VII se encuentran en el centro de Bogotá y en la parte nor-occidental del área de estudio, debido a la amplificación generada por el depósito lacustre profundo. La MMI para el área montañosa en los suburbios del área de estudio permanece en V.

D. Evaluación de la licuación

En general, la licuación ocurre cuando existe arena fina nivel freático alto, junto con un intenso movimiento del suelo. Se sabe que la licuación se repite en el mismo sitio para diferentes terremotos, y por ello el registro histórico de la licuación sirve de referencia para identificar las posibles áreas de licuación por posibles terremotos en el futuro.



El método Japonés

En Japón la licuación ha sido estudiada por la ingeniería de terremotos desde la experiencia del terremoto de Niigata en 1964, cuando este fenómeno causó daños importantes en las edificaciones, los puentes y la refinería de petróleo construida en un área recién desarrollada sobre tierras reclamadas que formaban parte del lecho de un río.

La Sociedad Internacional de Mecánicas de Suelo e Ingeniería Geotécnica propone el siguiente método como de grado 1:

- En términos de intensidad sísmica, se espera que ocurra una licuación significativa donde el suelo es aluvial y la Intensidad MMI es mayor a VIII.
- En términos de topografía se espera posible licuación según se muestra en la Tabla 4.2.6.

Tabla 4.2.6 Posibilidad de Licuación Evaluada con Base en la Topografía

Rank	Topography	Liquefaction possibility
A	Existing river bed, Old river bed, Wet land, Reclaimed land, lowland between dune	High
B	Fan, Natural bank, Sand dune, Flood plain, Sea shore, other lowland	Possible
C	Plateau, Hill, Mountain	Low

Fuente: "Manual para zonificación de riesgos geotécnicos sísmicos,"
Comité Técnico para Ingeniería Geotécnica de Terremotos, TC4 ISSMGE 1998

Método usado en este estudio

El área con potencial de licuación en Bogotá se mencionó en un estudio existente basado en la descripción de documentos históricos.

En este Estudio se obtienen nuevos datos de perforaciones en Bogotá, usados para revisar el área de licuación desde el punto de vista geotécnico. En general, el depósito en el Río Tunjuelito contiene arena fina, mientras que el depósito en el Río Bogotá está compuesto sobretodo de material arcilloso que tiene menor posibilidad de licuación.

Sin embargo, debido a insuficientes datos cuantitativos tales como la distribución del tamaño del grano en el suelo, pruebas de valores N de penetración estándar y el nivel freático, no fue posible hacer una evaluación detallada de la licuación en el presente estudio. Por consiguiente, se usó un método de evaluación aproximado usando la información existente.

En este estudio, el área sujeta a la evaluación de la licuación es la revisada y mencionada anteriormente y la zona 5. La posibilidad de licuación fue evaluada usando un estimado de la intensidad sísmica y la condición geotécnica según los criterios mostrados en la Tabla 4.2.7.

Tabla 4.2.7 Criterios usados en este Estudio para Evaluar la Licuación

Seismic Intensity (MMI)	Area		
	Liquefiable area defined by boring data	Zone 5	Others
Less than VII	None	None	None
VII	Possible	Possible	None
VIII or more	Probable	Possible	None

Fuente: Equipo de estudio JICA

El siguiente es el resultado de la evaluación, presentado en la Figura 4.2.11.

Caso-1: Falla La Cajita

El área probable de licuación parece estar en la recién definida área de licuación; y la posible área de licuación parece estar en la zona 5.

Caso-2: Falla Guayuriba

El área probable de licuación parece estar en la mayor parte de la recién definida área de licuación; y la posible área de licuación parece estar en la zona 5.

Caso-3: Evento de subducción

No se define área posible de licuación debido a la baja intensidad sísmica en dicha área.