

## CONCLUSIONES

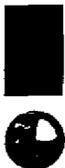
**E**n este capítulo se presentan las conclusiones geocientíficas obtenidas durante el desarrollo del estudio

- Las fallas de mayor potencial sismogénico están situadas en la región Suroriental y hacen parte del sistema de Piedemonte Llanero. Varios segmentos de las fallas de Servitá - Santa María, Guaicáramo y Yopal presentan valores estimados de Magnitudes Máximas Probables (MMP) superiores a  $7 M_s$ , con tasa de actividad alta, lo cual sugiere períodos de retorno del orden de 600 años (suponiendo una tasa de movimiento de 3 mm/año). Cabe resaltar los segmentos activos de Guayuriba y Servitá cuya ubicación coincide con una zona de sismicidad anormalmente baja a lo largo del sistema del Piedemonte.
- La Región Noroccidental presenta fallas cuyas magnitudes máximas probables no exceden el valor de  $7 M_s$ . Se destaca la falla de Ibagué, considerada como la más activa de este sector, cuyos indicios y evidencias de actividad lateral derecha se siguen prácticamente a lo largo de toda la traza. Otras fallas de importancia en esta región son las de Honda, Doima, Cocora y Cucuana, con valores de MMP superiores a 6.0 y tasa de actividad moderada - alta.
- La región central está caracterizada porque la mayoría de las fallas presentan actividad baja moderada, con magnitudes estimadas inferiores a  $6.5 M_s$ . Se destaca la Falla de la Cajita por su característica de falla activa (MMP =  $6.4 M_s$ ) y un sismo histórico asociado. Sin embargo, no debe descartarse algún tipo de actividad de la falla de Bogotá, ya que el tramo que atraviesa la ciudad está cubierto por diferentes tipos de construcciones y por lo tanto no se pudo hacer una análisis detallado de ésta.
- La cinemática de las fallas activas es coherente con el campo de esfuerzos determinado a partir de observaciones microtectónicas. El contexto sismo-tectónico regional es intermedio entre fallamiento inverso y fallamiento de rumbo, y está caracterizado por un eje compresivo horizontal  $\sigma_1$  de dirección E-SE y W-NW. Los esfuerzos tectónicos son compatibles con el movimiento inverso de los cabalgamientos que limitan ambos flancos de la Cordillera Oriental. Adicionalmente, se observan movimientos de rumbo a lo largo de fallas inclinadas de direcciones SE-NE (lateral derecho) y SE-NW (lateral izquierdo).
- Según los datos históricos, en los últimos quinientos años la sismicidad en Bogotá y su área cercana ha sido importante. En la capital, tres sismos han causado destrucción parcial de la ciudad (1785, 1827, 1917) alcanzando intensidad VIII, y cuatro han causado daños serios (1743, 1826, 1923, 1967) con intensidad VII.
- Durante el período histórico la recurrencia de los eventos de intensidad VIII es irregular (cuarenta y dos y noventa años). La de los sismos de intensidad VII también lo es, oscilando entre cuarenta y seis y noventa y tres años. Mirada globalmente, la sismicidad de Bogotá en los últimos quinientos años se caracteriza por largos períodos de quietud los cuales llegan a superar el siglo. Entre 1500 y 1743 y entre 1827 y 1917 no ocurrió ningún sismo de intensidad mayor de VI. Por otra parte, se observa una acumulación de sismos en ciertos períodos, como 1826-1827 con dos sismos de intensidad VII y VIII, y 1917-1928 con tres sismos de intensidad VIII, VII y VI.
- Los sismos destructores en Bogotá en los últimos quinientos años se originaron todos en la Cordillera Oriental, tomando como límites de esta el río Magdalena y el piedemonte llanero. Se observan dos particularidades: a) a más de 50 kilómetros hacia el norte, en Boyacá y los Santanderes, no se ha originado ningún sismo destructor de la capital, b) hacia el sur sí se han producido sismos destructores, y a distancias que llegan a 350 kilómetros. La zona comprendi-

da en una faja de treinta kilómetros de ancho, de orientación S-SW y N-NE, situada al oriente de la ciudad, se ha generado la mayoría de los eventos de intensidad VII y VIII.

- Bogotá, ha sido destruída o averiada no sólo por sismos de campo lejano sino también por sismos de campo cercano. De los tres sismos de intensidad VIII, dos se originaron a unos cuarenta kilómetros de la ciudad y uno a trescientos cincuenta kilómetros. Los de intensidad VII están todos, exceptuando 1923 cuyo epicentro es cuestionable, dentro de un radio de 40 kilómetros. De especial interés son los eventos de 1616 (Cajicá), 1644 (Tunjuelo) y 1826 (Sopó), localizados en un radio de 20 kilómetros alrededor de Bogotá, prueba de la existencia de fuentes cercanas que hay que tener en cuenta en los análisis de amenaza.
- Los efectos locales en la Sabana de Bogotá han sido bastante claros en los sismos históricos. Los más notables son comportamiento diferencial de la capital, bien detectados en 1917 y en 1928, efecto de acumulación de daños por sismos sucesivos, en 1928; licuación de suelos en la Sabana, identificada en Tunjuelo en 1644; efectos topográficos muy claros en los cerros de Guadalupe y Monserrate en 1743, 1785, 1826 y 1917
- La versión del Catálogo Sísmico de Colombia resultado de una recopilación de manera sistemática, unifica la información de diversos catálogos que cubrían diferentes periodos y regiones geográficas e incluye la información histórica de estudios recientes y la información instrumental hasta 1995, presentando una serie homogénea respecto a la magnitud  $M_s$  y discriminando las réplicas y premonitorios. Se obtiene como resultado un catálogo que proporciona datos más robustos para el cálculo de las tasas de recurrencia sísmica a nivel regional
- En el estudio de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá D.C. se establecieron tres fuentes sismogénicas principales. La primera corresponde a la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, la cual es significativa únicamente por las características de respuesta de algunas partes del subsuelo de la ciudad; el acelerograma representativo para esta zona fué registrado en el sismo de México, 1985. La segunda fuente corresponde a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental la cual resulta dominante en el caso de la ciudad; para esta zona se hizo un acelerograma sintético, usando como base el sismo de Tauramena, 1995. La tercera corresponde a las fuentes locales; como acelerograma característico se tomó el registrado en California por el sismo de Loma Prieta en 1989
- De acuerdo con el modelo utilizado para evaluar la aceleración horizontal máxima probable sobre la cuenca rocosa de Santafé de Bogotá, se obtuvo un valor igual a 0.19g que para efectos de análisis posteriores se tomó como 0.20g, tal como se encontró en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, donde se ubica a Santafé de Bogotá en zona de amenaza sísmica intermedia.
- Se establecieron tres fuentes sismogénicas principales. La primera corresponde a la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, la cual es significativa únicamente por las características de respuesta de algunas partes del subsuelo de la ciudad. La segunda corresponde a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental la cual resulta dominante en el caso de la ciudad. La tercera corresponde a las fuentes locales.
- La Sabana de Bogotá es una cuenca sedimentaria en la cual sobre un basamento de rocas antiguas constituidas por arcillolitas y areniscas se depositó un gran espesor de sedimentos en un ambiente fluvio lacustre, litológicamente compuesto por arcillas, limos, lentes de arenas y gravas y localmente cenizas volcánicas y turbas
- El modelo geológico-geofísico del perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores, está conformado por dos subcuencas principales: la cuenca occidental, ubicada hacia el NW del área de estudio; la cuenca oriental ubicada dentro del perímetro urbano, y ramificada en la parte norte por los cerros de Suba, dando lugar a otras dos cuencas secundarias, una en la parte occidental de los cerros de Suba y otra entre estos últimos y los cerros Orientales.

- Los mayores espesores de sedimentos calculados en el presente modelo se encuentran en la cuenca occidental, donde sobrepasan los 780 m. Para la cuenca oriental se calcularon espesores del orden de 540 m en la parte occidental de los cerros de Suba y 240 entre los cerros de Suba y los cerros orientales.
- Los métodos geofísicos aplicados permitieron establecer, no sólo la geometría de la cuenca de la Sabana de Bogotá, sino también determinaron información tectónica nueva como son las fallas de Molinos-Sasaima y San Cristóbal, ésta última corroborada en superficie por campaña especial de campo.
- La zonificación geotécnica de síntesis definió cinco áreas de comportamiento homogéneo:
  - I. Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillocitas cuya existencia y deformabilidad dependen de su humedad.
  - II. Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.
  - III. Zona de suelos duros en donde predominan arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial. La zona arcillosa se caracteriza por su baja plasticidad, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20% y 70% en los primeros 30m. A mayores profundidades la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30 %. Adicionalmente, se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental de esta zona, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas.
  - IV. Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad. En los primeros 60 m de profundidad es posible encontrar límites líquidos en un amplio rango que varía de 30% a más de 200% disminuyendo en profundidad a valores del orden de 30%. Hacia la parte sur oriental de la zona se encuentran suelos preconsolidados en un espesor del orden de 10 m; espesor que disminuye hacia la parte nor-occidental. En esta zona es común encontrar una pequeña capa de arena a una profundidad aproximada de 50 m e intercalaciones de capas de turbas que en su mayoría no superan los 5 m de espesor.
  - V. Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación
- La microzonificación sísmica de Bogotá definió 5 zonas homogéneas de acuerdo con la respuesta sísmica del subsuelo. Los parámetros de diseño en cada zona son los siguientes:
  - Zona 1. Cerros:** Caracterizada por la presencia de formaciones rocosas de suelos con capacidad portante relativamente mayor. La aceleración máxima ( $A_m$ ) es de 0.24g.
  - Zona 2. Piedemonte:** Conformada por la zona de transición entre los cerros y la zona plana. Consta principalmente de depósitos coluviales y conos de deyección de materiales con una gran capacidad portante en general. La aceleración máxima es de 0.30g
  - Zona 3. Lacustre A:** Conformada principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades máximas de 240 m. Pueden presentarse depósitos ocasionales de turbas y/o arenas de espesor intermedio a bajo. La aceleración máxima es de 0.25g.
  - Zona 4. Lacustre B:** Tiene las mismas características de la Zona 3, pero los depósitos superficiales son más blandos que los anteriores. Además, la profundidad hasta la roca es mucho mayor (del orden de 200m a 400m o más). La aceleración máxima es de 0.16g



**Zona 5. Terrazas y Conos:** Se presenta predominantemente en la zona sur de la ciudad y está conformada por suelos arcillosos secos y preconsolidados de gran espesor, arenas o limos o combinaciones de ellos. El límite entre las zonas 4 y 5 no está muy bien definido por lo cual se requiere la definición de zonas de transición. La aceleración máxima es e 0.20g. Se ha denominado la **Zona 5A "Terrazas y Conos con potencial de Licuación"** a una subdivisión esta zona, la cual tiene los mismos espectros de diseño que la Zona 5. Sin embargo, las características predominantes de las arenas limpias, finas y superficiales, combinadas con la posibilidad de niveles freáticos altos, redundan en la posibilidad que presenten licuación ante la ocurrencia de un sismo intenso. Debe evaluarse específicamente el potencial de licuación cuando se deseen adelantar construcciones en esta zona.

- De la evaluación de la vulnerabilidad se puede concluir que aún cuando la amenaza sísmica para Santafé de Bogotá no corresponde a valores extremos en el país, el riesgo si lo es debido al alto grado de vulnerabilidad de sus edificaciones, las cuales hasta hace muy pocos años fueron construidas sin tener en cuenta criterios sismoresistentes. Infortunadamente, con anterioridad 1984 no existían requerimientos claros para evaluar sollicitaciones dinámicas y cargas laterales, razón por la cual las edificaciones diseñadas y construidas antes de ese año en su mayoría son altamente vulnerables, como lo han demostrado sismos incluso mucho menores a los de diseño en otras zonas del país. Dentro del estudio se analizaron tres escenarios hipotéticos. ante un sismo lejano originado en la Zona de Subducción con aceleración del orden de 0.038g a nivel del basamento rocoso, ante un sismo moderado proveniente de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental que cause una aceleración del orden de 0.12g a nivel de basamento rocoso y ante un sismo fuerte que se presente en la misma falla que genere aceleraciones del orden de 0.20g, lo cual equivale a un sismo de 475 años de período de retorno. Cada uno de estos escenarios revelan los posibles efectos que puede ocasionarse a la ciudad indicando para cada uno de ellos las zonas de mayor riesgo en términos de potencial de daños y pérdidas en edificaciones, líneas vitales, y el número de heridos y muertos en caso de que ocurra el sismo durante el día o la noche; información que es fundamental para la elaboración de los planes de emergencia y contingencia.

# RECOMENDACIONES

**E**s importante destacar que este estudio ha sido uno de los más completos sobre el tema a nivel internacional. Sin embargo, todavía quedan puntos sobre los cuales se debe continuar trabajando

Con base en los resultados encontrados se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales :

- Resulta importante adelantar estudios de dataciones sobre las fallas que se encontraron como de mayor actividad, para poder corroborar en detalle tasas de movimiento y períodos de retorno para eventos sísmicos.
- Se deben hacer estudios de microsismicidad en algunas fallas ubicadas en el Piedemonte, para establecer con claridad profundidades asociadas a la actividad.
- Los datos disponibles hasta el momento referentes a acelerogramas de eventos sísmicos registrados en estaciones ubicadas en los suelos blandos de Santafé de Bogotá resultan vitales para adelantar los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad pero son aún insuficientes para poder proponer modelos de comportamiento. Se requiere en general mucha más instrumentación especialmente en las zonas de suelos blandos y de piedemonte para lograr captar las señales de sismos que ocurran en el futuro. Esta instrumentación debe hacerse mediante acelerógrafos distribuidos en toda la ciudad, con el fin de calibrar el modelo propuesto por este proyecto. Los datos que se obtengan serán de vital importancia para poder verificar el estado del arte en este tema.
- Para efectos de conocer el comportamiento global del depósito es imperativo tratar de instalar instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.
- Otro aspecto que requiere mayor estudio es la caracterización geotécnica en profundidad de las zonas delimitadas. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse hacia el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. El bajo número de sondeos realizados no permite identificar los límites de las zonas con precisión ni evaluar de manera detallada las variaciones al interior de cada zona. Por este motivo, es conveniente continuar densificando la exploración realizando principalmente ensayos in situ Down Hole o cono sísmico y presiómetro de Menard cíclico.
- Las microtrepidaciones demuestran ser una herramienta versátil para determinar principalmente el período de vibración natural de depósitos de suelo blando no muy profundos cuyo comportamiento se asemeje a un estrato blando uniforme sobre un semiespacio infinito de suelo competente. Para el caso de Bogotá las suposiciones básicas no se cumplen del todo por lo cual se requiere más investigación para depurar la interpretación de sus resultados.
- La información que se puede obtener a partir de la interpretación de los registros de microtrepidaciones es útil de todas maneras para establecer zonas de diferente comportamiento, lo cual es vital para complementar la información geotécnica disponible. De esta manera aún con las limitaciones planteadas, las microtrepidaciones se convierten en una herramienta vital para desarrollar mapas de microzonificación de ciudades. Pueden desarrollarse programas más intensos de mediciones en la ciudad para delimitar de mejor manera las zonas propuestas

- 
- Los aspectos de modelación bidimensional y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo. Es necesario adaptar programas de computador avanzados en máquinas mucho más potentes que los computadores personales. Se requiere en este campo la participación de grupos internacionales de apoyo.
  - Los problemas de estabilidad en los cerros deben estudiarse con más detalle. Se sugiere la realización de estudios detallados caso por caso, considerando las áreas críticas definidas. Esto requiere la instrumentación de algunos taludes y su seguimiento respectivo.
  - Con respecto al comportamiento dinámico de las arcillas es importante continuar estudiando la influencia de la velocidad de deformación, la frecuencia de la carga cíclica y el número de ciclos de carga. Este es un tema sobre el cual no existen muchas referencias y se ha podido comprobar que esta variable es de importancia en el suelo de Bogotá.
  - De acuerdo con el comportamiento de las arenas de la zona sur, es necesario continuar con los estudios de licuación utilizando equipos que permitan obtener muestras inalteradas.
  - Mediante un acto administrativo se debe llevar a cabo, la reglamentación urbana y la normativa sísmo resistente que se debe aplicar en cada una de las zonas definidas por la microzonificación sísmica.
  - Es urgente que se formulen medidas de mitigación del riesgo sísmico en la ciudad, particularmente interviniendo la vulnerabilidad de las edificaciones esenciales (tales como hospitales y centrales telefónicas, entre otras) y de las redes de servicios, para lo cual es necesario llevar a cabo estudios específicos de vulnerabilidad sísmica y de rehabilitación que mejoren el comportamiento de los sistemas de líneas vitales y de las estructuras de las principales edificaciones de la ciudad en caso de un movimiento sísmico moderado o intenso.
  - Teniendo en cuenta las estimaciones de daños, pérdidas y en general de las consecuencias de un sismo moderado o fuerte en la ciudad, deben elaborarse planes de emergencia y contingencia para la atención de la población. Igualmente, se debe prever la manera como se atenderán los requerimientos de los servicios públicos interrumpidos y la forma como se llevará a cabo su rehabilitación y recuperación.
  - Es necesario iniciar un intenso programa de información pública y educativa a través de medios de comunicación, colegios y mediante capacitación a nivel comunitario que sin alarmar socialice la información y la forma de actuar en caso de terremoto. Este programa debe ser sostenible y continuo para que sea efectivo.

## DIRECTIVAS DEL CONVENIO

ADOLFO ALARCÓN GUZMÁN  
Director General del INGEOMINAS

BERNARDO GRAU ARIAS (1993 - 1995)  
JOSÉ FIDEL TORRES (1995 - 1996)  
DORA PATRICIA HOYOS RAMÍREZ (1996 - 1997)  
Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias - UPES

OMAR DARIO CARDONA ARBOLEDA (1993 - 1995)  
LUIS FERNANDO VELASCO CHÁVES (1995)  
ANUAR YAVER CORTÉS (1995 - 1997)  
Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres - DNPAD

## EJECUTORES DEL PROYECTO

### INGEOMINAS

JUAN MANUEL MARTÍNEZ ROGRÍGUEZ (1993 -1994)  
EDGAR EDUARDO ROGRÍGUEZ GRANADOS (1995 -1997)  
Subdirector Area de Ingeniería Geoambiental

DIANA MARCELA RUBIANO VARGAS  
Jefe de Proyecto

JACOBO OJEDA MONCAYO  
Coordinador de Zonificación Geotécnica y de Riesgos  
Geológicos

ALVARO JAIME GONZÁLEZ GARCÍA  
Asesor Técnico

### UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

ALBERTO SARRIA MOLINA  
Ex-Decano de la Facultad de Ingeniería

LUIS YAMIN LACOUTURE  
Director Departamento de Ingeniería Civil

BERNARDO CAICEDO HORMAZA  
Director del Laboratorio de Suelos de  
Ingeniería Civil

OMAR DARIO CARDONA ARBOLEDA  
Profesor de Cátedra del Departamento de  
Ingeniería Civil

ALFREDO TABOADA HOYOS  
Profesor Asistente Departamento Ingeniería Civil

Arturo Bermúdez Gómez  
Pablo Caro Peña  
Eduardo Castro Marín  
Cristina Dimaté Castellanos  
Julian Escallón Silva  
Armando Espinosa Baquero  
Rodrigo Esquivel Ramírez  
Alberto García Blanco  
Sandra Garzón Cabrera  
Hugo Gravini Escorcía  
Anibal Ojeda Carriazo  
Justo Padilla Acosta  
Gabriel Paris Quevedo  
Rosalbina Pérez Cerón  
Nelson Pulido Hernández  
Alfredo Rivera Ortega  
Jaime Romero León

Rafael Silva Pedroza  
Luis Fernando Urrego Lara  
Germán Vargas Cuervo  
Luis Vásquez Avila  
Heyley Vergara Sánchez

Carlos Eduardo Bernal Latorre  
Augusto Espinosa Silva  
Luis Enrique García Reyes  
Luis Alberto Rivera Giraldo  
Joaquín Olarte Barrera

Carlos Arboleda Audrito  
Javier Camacho Tauta  
Leonardo Cano Saldaña  
Carlos Cortes Zamora  
Jaime Andrés Estrada Galindo  
María José Garcés Rodríguez  
Fernando López Caballero  
Carlos Martínez Gómez  
Shirly María Merlano Rivera  
Javier Morales Londoño  
Claudia Patricia Mutis Duque  
Oscar Javier Reyes Ortiz  
Ana María Rodríguez Carrasco  
Leonardo Ruiz Cendales  
Hugo Salamanca Hernandez  
Alvaro Antonio Torres Laguna  
Vladimir Torres Torres