



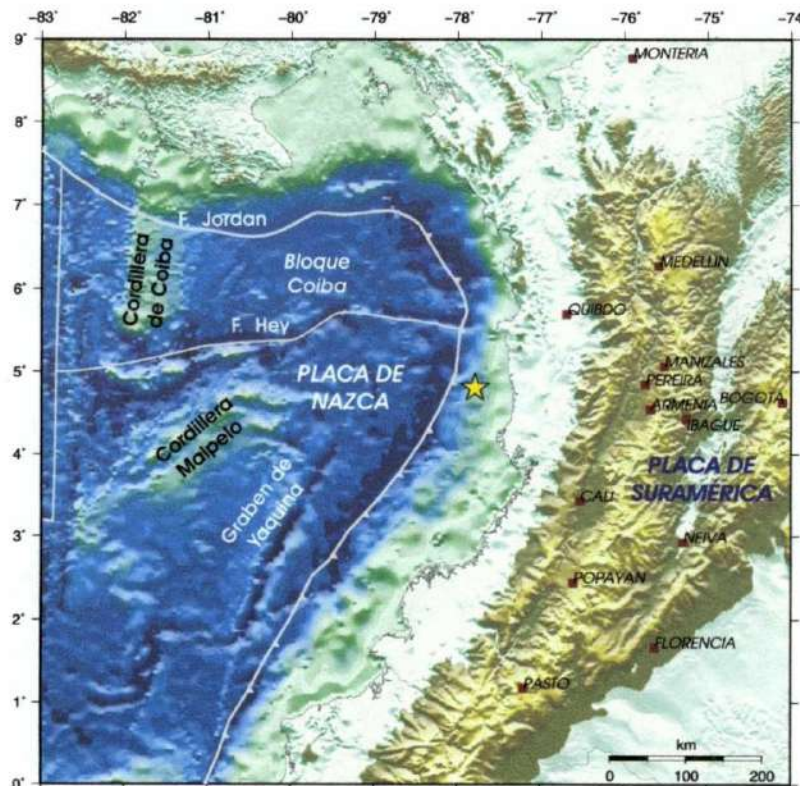
Libertad y Orden

República de Colombia

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS

SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y ENTORNO AMBIENTAL



**EL SISMO DE PIZARRO (BAJO BAUDÓ, CHOCÓ)
DEL 15 DE NOVIEMBRE DE 2004: PARÁMETROS DE LA FUENTE,
MOVIMIENTO FUERTE Y DAÑOS**

Bogotá D. C., diciembre de 2004



Libertad y Orden

República de Colombia

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS

SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y ENTORNO AMBIENTAL

**EL SISMO DE PIZARRO (BAJO BAUDÓ, CHOCÓ)
DEL 15 DE NOVIEMBRE DE 2004: PARÁMETROS DE LA FUENTE,
MOVIMIENTO FUERTE Y DAÑOS**

Por

Servicio Geológico - INGEOMINAS

Participación Técnica

Departamento de Geografía - UNIVALLE

Bogotá D. C., diciembre de 2004



TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCION.....	1
2. ASPECTOS SISMOLÓGICOS.....	2
2.1 CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS DEL OCCIDENTE COLOMBIANO	2
2.1.1 Zona de subducción del Pacífico Colombiano.....	2
2.2. SISMICIDAD RECIENTE.....	5
2.2.1 Sismos destacados en el Pacífico Colombiano	5
2.2.2 El sismo del 15 de noviembre de 2004.....	8
2.3 EFECTOS GEOLÓGICOS INDUCIDOS POR EL SISMO EN LA ZONA EPICENTRAL.....	13
3. INTENSIDAD Y EFECTOS DEL SISMO	16
3.1 INTENSIDAD SÍSMICA EN CALI.....	20
3.2 INVENTARIO DE DAÑOS EN CALI	20
3.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS DE LOS SECTORES DE MAYOR AFECTACIÓN.....	24
3.3.1 Llanura Aluvial del Río Cauca (Sal1)	28
3.3.2. Abanicos Aluviales (Sal2)	28
4. MOVIMIENTO FUERTE EN CALI ASOCIADO AL SISMO DE PIZARRO	35
4.1 REGISTROS ACELEROGRÁFICOS	35
4.2 RESPUESTA SÍSMICA	37
4.3 AMPLIFICACIÓN RESPECTO A LA ROCA.....	40
5. CONCLUSIONES	50
BIBLIOGRAFIA.....	51

LISTA FIGURAS

Figura 2.1. Contexto tectónico para el occidente de Colombia, marcado por la convergencia de las placas Caribe, Nazca y Suramérica, y localización del SISMO del 15 de noviembre de 2004.	3
Figura 2.2. Definición de los tres segmentos propuestos para la fosa Colombia (PMZSCali, 2004). Sismicidad del Catálogo EHB (Engdahl et al., 1998).	4
Figura 2.3. Sección transversal de azimut 95° y 100 kilómetros de ancho, correspondiente al segmento Centro de la Zona de Subducción en el Pacífico Colombiano, donde se muestra la distribución de la sismicidad con la profundidad y se resaltan los sismos de 1991 y 2004. El gráfico superior es un perfil topográfico de la parte central de la sección (PMZSCali, 2004)	6
Figura 2.4. Distribución de la sismicidad ($M_I \geq 3.0$) registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC-INGEOMINAS) desde 1993, en función de la profundidad de los sismos.	7
Figura 2.5. Cada línea horizontal corresponde a una estación de la RSNC (INGEOMINAS), el código que aparece a la izquierda corresponde al nombre de la estación. TOL, Tolima; POP, Popayán; CUM, Cumbal; FLO, Florencia; CHI, Chingaza; RUS, La Rusia; BAR, Barichara; OCA, Ocaña; GUA, Guaviare; KEN, Kennedy; MAL, Málaga y TUM, Tumaco.	9
Figura 2.6. Distribución diaria del número de réplicas del sismo del 15 de noviembre de 2004, 4:06, de acuerdo al registro en la estación más cercana al epicentro (B. Málaga, RSNC). En punteado la curva de mejor ajuste a la ecuación de Omori. El número de más bajo en el primer día se debe al conteo de sólo 15 horas.	11
Figura 2.7. Distribución temporal de magnitudes en la secuencia de réplicas reportadas por la RSNC. Nótese el sismo mayor de la secuencia ($M_I = 4.4$) del 24 de Noviembre. ...	12
Figura 2.8. Distribución de réplicas registradas por las estaciones permanentes de la RSNC (INGEOMINAS) hasta el 29 de Noviembre de 2004.	12
Figura 3.1 Niveles de daño por el Sismo de Pizarro en Cali discriminados por edad de construcción (INGEOMINAS, 2004)	26
Figura 3.2 Niveles de daño por el Sismo de Pizarro en Cali discriminados por número de pisos de las construcciones (INGEOMINAS, 2004).	27
Figura 3.3 Sitios de Daños localizados en el Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de Cali (INGEOMINAS, 2004)	29
Figura 3.4. Columna estratigráfica Puerto Mallarino	31
Figura 3.5. Columna estratigráfica Vivero Municipal	32
Figura 3.6. Mapa Imagen del área de mayor afectación, obsérvese antiguos paleocanales y antiguos sectores de humedales, dirección actual del Río Cañaveralejo y la ubicación de los sitios de afectación por el Sismo de Pizarro. (Foto Aérea No.45, Vuelo R-373, Esc. Aprox. 1:20.000, 1957 suministrada por la CVC).	33
Figura 3.7. Columna estratigráficas Canchas Panamericanas	34
Figura 4. 1. Distribución de las estaciones de acelerógrafos ubicadas en la ciudad de Cali que registraron el sismo de Pizarro. Las estrellas amarillas corresponden a las	

- estaciones de la RAC (Convenio INGEOMINAS-DAGMA) y las estrellas rojas corresponden a las estaciones de la RPAC instalada por el INGEOMINAS36
- Figura 4.2. Isoaceleraciones máximas (PGA) registradas en la ciudad. Las estrellas muestran la ubicación de las estaciones que registraron el evento38
- Figura 4.3. Espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento para las estaciones de la RAC y RPAC (Convenio INGEOMINAS – DAGMA). La abscisa corresponde a Periodo en segundos y la ordenada corresponde a Aceleración Espectral en cm/seg^2 . Los registros están divididos en cuatro (4) grupos de tres (3) estaciones cada uno, cada grupo mantiene una misma escala con el fin de facilitar las comparaciones entre ellos. La línea roja es para la componente Norte-Sur, la línea azul es para la componente Este-Oeste, y la negra para la componente vertical del movimiento.....39
- Figura 4.4 Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($0.1 < T(\text{seg}) < 0.5$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.42
- Figura 4.5 Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($0.5 < T(\text{seg}) < 1.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.43
- Figuras 4.6. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($1.0 < T(\text{seg}) < 1.5$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.44
- Figura 4.7. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($1.5 < T(\text{seg}) < 2.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.45
- Figura 4.8. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($T(\text{seg}) > 2.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.46
- Figura 4.9. Espectros de amplificación para las estaciones de la RAC tomando como referencia la estación de la Planta La Reforma. La abscisa corresponde a Periodo en segundos y la ordenada corresponde a Aceleración Espectral en cm/seg^2 . Las líneas azules son para la componente E-W, la línea roja para la componente N-S, y las líneas negras para la vertical.....47
- Figura 4.10. Funciones de transferencia para la estación de Canchas Panamericanas, considerando la estación de la Planta La Reforma como referencia, en las tres componentes del movimiento. La línea azul es para la fase débil, previa de la fase intensa del sismo, la línea negra corresponde a la fase intensa del sismo, y la línea roja es posterior de la fase intensa del sismo.....48
- Figura 4.11. Mapa de Isoperiodos para Cali por el Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran la ubicación de las estaciones que registraron el evento. Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.....49



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Sismos históricos asociados a la zona de subducción	8
Tabla 3.1 Poblaciones visitadas para evaluación de daños por el sismo de Pizarro (INGEOMINAS, 2004)	20
Tabla 3.2. Construcciones afectadas por el sismo de Pizarro en la Ciudad de Cali (INGEOMINAS, 2004)	25
Tabla 3.3. Número de reportes de Daños en Edificaciones por Unidad Geológica Superficial (UGS según PMZSCali, INGEOMINAS, 2004).....	25
Tabla 4.1. Estaciones que registraron el evento, periodo predominante y aceleración pico del terreno, PGA (Convenio INGEOMINAS – DAGMA).....	37
Tabla 4.2. Aceleraciones espectrales máximas para diferentes rangos de periodos (RAC, RPAC, Convenio INGEOMINAS – DAGMA).	41



1 INTRODUCCION

En la madrugada del 15 de noviembre de 2004 se produjo un sismo de magnitud $M_l = 6.7$ ($M_w=7.1$) en el Pacífico colombiano, 50 km al occidente del municipio de Pizarro (Bajo Baudó, Chocó), según datos suministrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) adscrita al INGEOMINAS. El sismo fue sentido en los departamentos del centro y occidente del país, incluso en Bogotá, causando daños especialmente en el Chocó, el occidente del Valle y en la ciudad de Cali. Desde el momento de ocurrencia del evento el INGEOMINAS proporcionó información inmediata sobre la localización, magnitud y ocurrencia de réplicas, manteniendo contacto permanente con la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (DNPAD) y los medios de comunicación.

La magnitud del evento ameritó que el INGEOMINAS en coordinación con la DNPAD, junto con la participación de entidades, universidades, organismos regionales, departamentales y municipales, iniciara una campaña de reconocimiento y captura directa de información sismológica, geológica, geotécnica y de respuesta sísmica, con el fin de apoyar a la comunidad y a las autoridades competentes en la toma de decisiones y en la gestión de riesgo, prevención y mitigación sísmica, además de acopiar datos precederos sobre la fuente y los efectos directos e indirectos del sismo.

El hecho de que, en relación con su tamaño, el sismo haya causado pocos daños y no haya causado víctimas, ha privilegiado este evento como un laboratorio que permitirá mejorar nuestros conocimientos y poner a prueba nuestros modelos respecto a la caracterización tectónica del occidente colombiano, los efectos del medio y la respuesta de sitio. Cabe resaltar que esta información será una herramienta adicional para las diferentes investigaciones que actualmente se adelantan en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali mediante Convenio INGEOMINAS-DAGMA, la vulnerabilidad de las edificaciones y el comportamiento de la comunidad, entre otros aspectos.

En este informe se presentan los resultados preliminares de la campaña de reconocimiento, compilación y análisis de información relacionados con el denominado Sismo de Pizarro, tanto en los aspectos sismológicos y tectónicos como en sus efectos, haciendo énfasis en la ciudad de Cali y la respuesta de sus suelos al movimiento fuerte.

2. ASPECTOS SISMOLÓGICOS

El 15 de noviembre de 2004, a las 04:06 hora local colombiana (09:04 UT), un sismo de magnitud local 6.7 (Richter), se sintió en gran parte del país. El epicentro se localizó en el Océano Pacífico, frente a las costas del departamento del Chocó, 50 km al suroeste del municipio de Bajo Baudó, en las coordenadas 4.81° N y 77.79° W y tuvo una profundidad superficial, según la RSNC-INGEOMINAS. La magnitud M_w estimada por el Grupo de Sismología de la Universidad de Harvard es 7.1. La diferencia en la magnitud reportada por las instituciones nacionales y las internacionales, se explica en el uso de diversas escalas existentes para expresar este parámetro a partir del uso de diferentes fases y tipos de registro de la señal sísmica.

La localización del sismo y su mecanismo focal permiten asociarlo al segmento central de la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano. El mayor sismo instrumental en esta zona de fosa se registró el 19/11/1991 (M_w 7.2), una decena de kilómetros al sureste del sismo del 15 de Noviembre de 2004.

2.1 CARACTERÍSTICAS SISMOTECTÓNICAS DEL OCCIDENTE COLOMBIANO

El ambiente tectónico de Colombia está marcado por la convergencia de las placas de Caribe, Nazca y Suramérica. Los datos recientes de GPS muestran convergencia rápida Este-Oeste de las placa de Nazca y Suramérica (6 cm/año), convergencia lenta NW-SE de las placas Caribe y Suramérica (1-2 cm/año), y colisión del Bloque de Panamá con los Andes del Norte. El movimiento relativo convergente entre las grandes placas tectónicas se acomoda por la subducción de la Placa de Nazca y la Microplaca de Coiba a lo largo de la fosa Colombo-Ecuatoriana y la fosa Caribe, y por deformación intracontinental (**Figura 2.1**). La actividad sísmica en el pacífico colombiano es debida principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa de Suramérica, con una velocidad relativa de 60 mm/año.

2.1.1 Zona de subducción del Pacífico Colombiano

La zona de subducción del Pacífico Colombiano corresponde al límite activo entre las placas de Nazca y Suramérica, cuyo borde superficial recorre el fondo marino más o menos paralelo a la costa. Esta fuente sísmica generó los dos terremotos más grandes que afectaron el país durante el siglo XX (1906 y 1979), con $M_w = 8.6$ y 8.1 respectivamente.

El análisis integrado de la sismicidad con la morfología de la fosa Colombia, realizado en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali (PMZSCali), permite postular tres segmentos con características diferentes para la zona de subducción en el Occidente de Colombia (**Figura 2.2**):

- El segmento norte, que representaría la subducción del bloque Coiba bajo el extremo noroeste de Colombia, con una longitud en la fosa de 200 km, orientado a 310° de azimut. Al norte termina contra una pequeña elevación en la zona de falla de Jordan, al sur del archipiélago de Las Perlas, que interrumpe la sismicidad asociada a esta estructura oeste-este. Su terminación sur se localiza frente al cabo Corrientes, lugar donde converge la falla Hey, límite sinistral entre la placa de Nazca y el bloque Coiba. La sismicidad más cercana a la fosa es de carácter superficial (< 60 km), con aumento en la profundidad hacia el noreste y concentrada hacia los extremos del segmento. Este segmento ha registrado sismos de magnitud importante, siendo el del 20/01/1904 el máximo reportado (M_w 7.4).

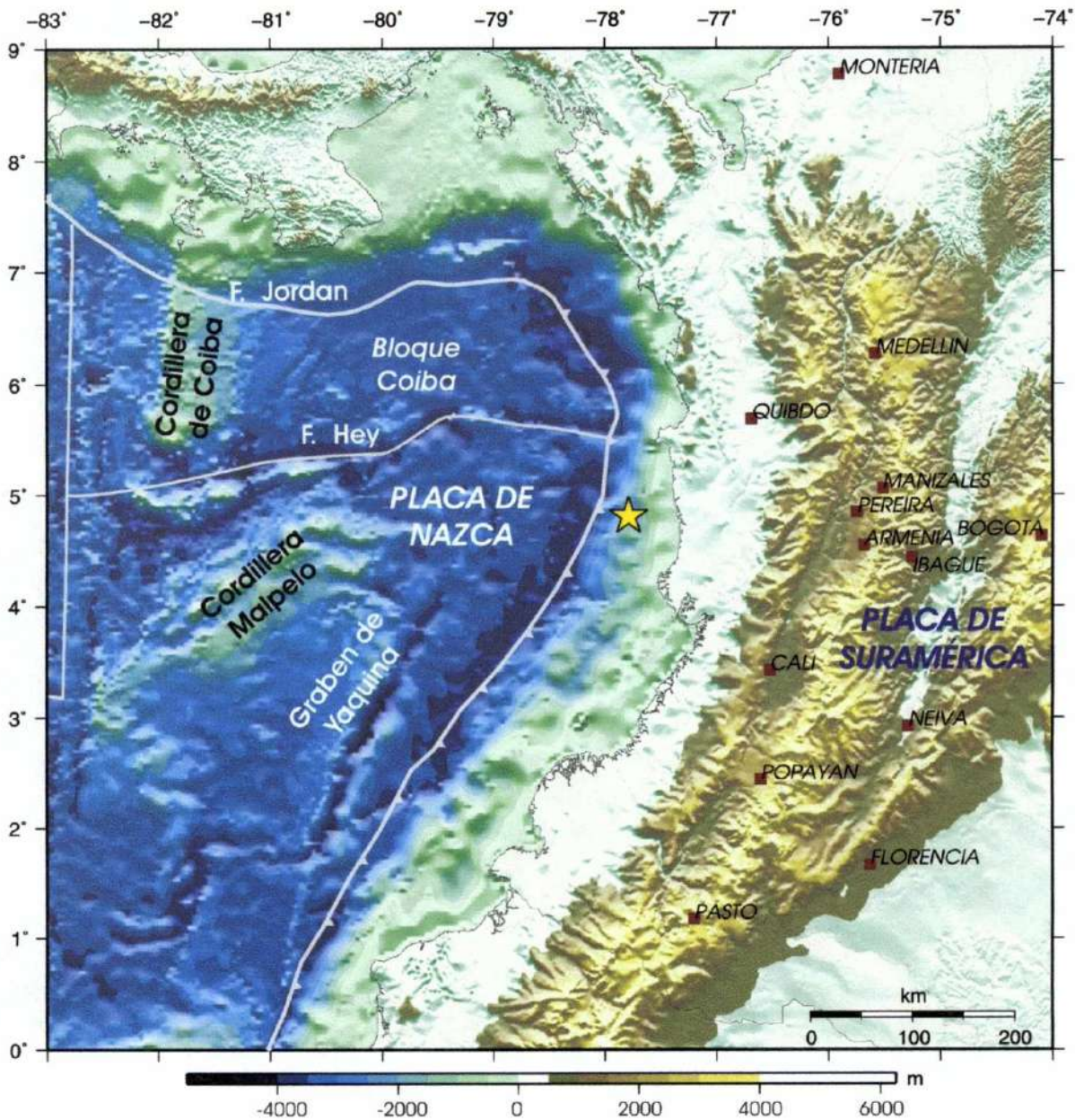


Figura 2.1. Contexto tectónico para el occidente de Colombia, marcado por la convergencia de las placas Caribe, Nazca y Suramérica, y localización del SISMO del 15 de noviembre de 2004.

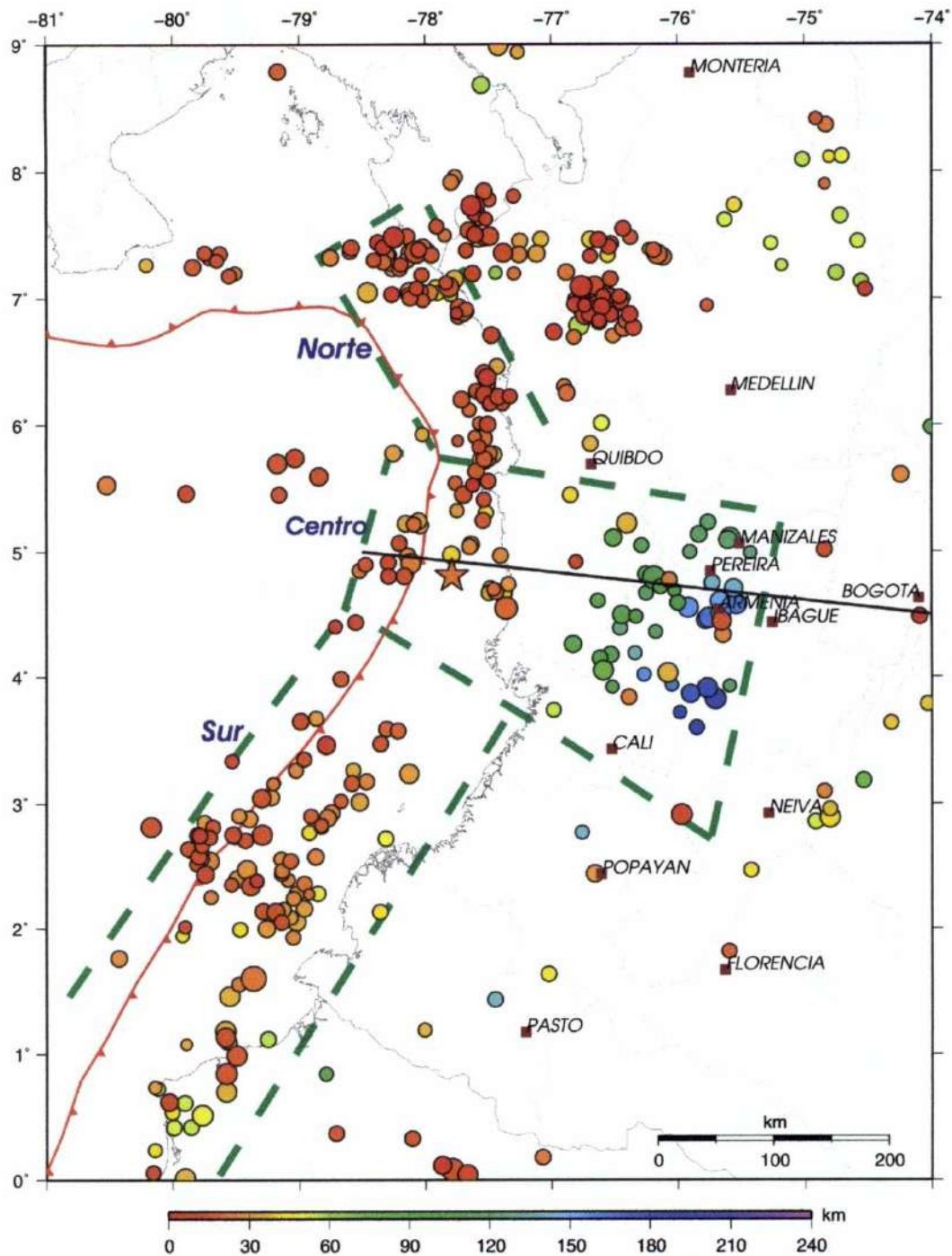


Figura 2.2. Definición de los tres segmentos propuestos para la fosa Colombia (PMZSCali, 2004). Sismicidad del Catálogo EHB (Engdahl et al., 1998).

- El segmento centro, responsable del sismo del 15 de noviembre de 2004, se localiza frente a la costa sur de Chocó, entre 4.0° y 5.5° de latitud, con 20° de azimut en un tramo de 150 km. Su extremo norte es perpendicular a la falla Hey, separado de ésta por una elevación en el piso oceánico. El límite sur lo constituye un cambio de dirección en la fosa, en el centro de expansión fósil de Buenaventura (78°.0W, 4°.0N). La sismicidad superficial (< 60 km) se concentra en la parte norte del segmento, aumentando la profundidad hacia el oriente bajo las cordilleras Occidental y Central, con sismos hasta 200 km de profundidad (**Figura 2.3**). El mayor sismo instrumental en la zona de fosa se registró el 19/11/1991 (MW 7.2), y en la zona de Benioff, el 23/11/1979 (Mw 7.2).
- El segmento sur, frente a las costas de Valle, Cauca, Nariño y norte del Ecuador, en un tramo de fosa orientado a 40° azimut y 550 km de longitud, con un plano de Benioff buzando 30° hacia los 130°. El límite sur de este segmento queda claramente marcado por el extremo nororiental de la Cordillera de Carnegie. Mar adentro y paralelo a la fosa, se localiza el graben de Yaquina. La actividad sísmica en este tramo muestra dos bandas paralelas, la primera de tipo superficial (< 30 km), próxima a la fosa y la segunda, con sismos algo más profundos (40 km), hacia el continente sobre el talud. El mayor sismo instrumental registrado en la zona de fosa fue el terremoto del 31/01/1906 (Mw 8.6).

2.2. SISMICIDAD RECIENTE

Una observación de la sismicidad registrada en el occidente de Colombia, desde la puesta en operación de la RSNC - INGEOMINAS, permite identificar que claramente comprende eventos de distintos orígenes: subducción en el Pacífico, actividad en el noroccidente, y fallas en la zona andina (**Figura 2.4**).

La sismicidad asociada al proceso de subducción en el occidente de Colombia se identifica, costa afuera, por una doble banda de sismicidad superficial (< 60 km) entre 2° y 6° de latitud paralela a la costa, que marca la zona de subducción. Bajo las cordilleras Occidental y Central se identifica un área de sismicidad intermedia a profunda (60 – 210 km), que marca la zona de Benioff.

2.2.1 Sismos destacados en el Pacífico Colombiano

Los dos terremotos más grandes que afectaron el país durante el siglo XX (1906 y 1979), con Mw = 8.6 y 8.1 respectivamente se generaron en la Zona de subducción del Pacífico Colombiano. Los registros instrumentales muestran siete sismos de magnitud mayor que 6.7 asociados a esta zona y relatos históricos hacen referencias concretas a por lo menos tres terremotos en la costa Pacífica en 1778, 23/01/1835 y 20/03/1869 (**Tabla 2.1**). También se encuentran indicios de que en los años 1840, 1875 y 1882 pudieron haber ocurrido terremotos con efectos importantes en esta zona (**Figura 2.4**).

El sismo del 19 de noviembre de 1991, localizado unas decenas de kilómetros al sureste del registrado el pasado 15 de noviembre, afectó la zona suroeste del departamento del Chocó (mayores intensidades reportadas en Togoromá, municipio de Litoral de San Juan), y con efectos en la ciudad de Cali (pánico, problemas con la energía y los teléfonos en el 55% de la ciudad, y avería en cuatro edificios), tal como está consignado en las fichas del PMZSCali correspondientes a las Investigaciones de Sismicidad Histórica elaboradas mediante Convenio UNIVALLE - INGEOMINAS.

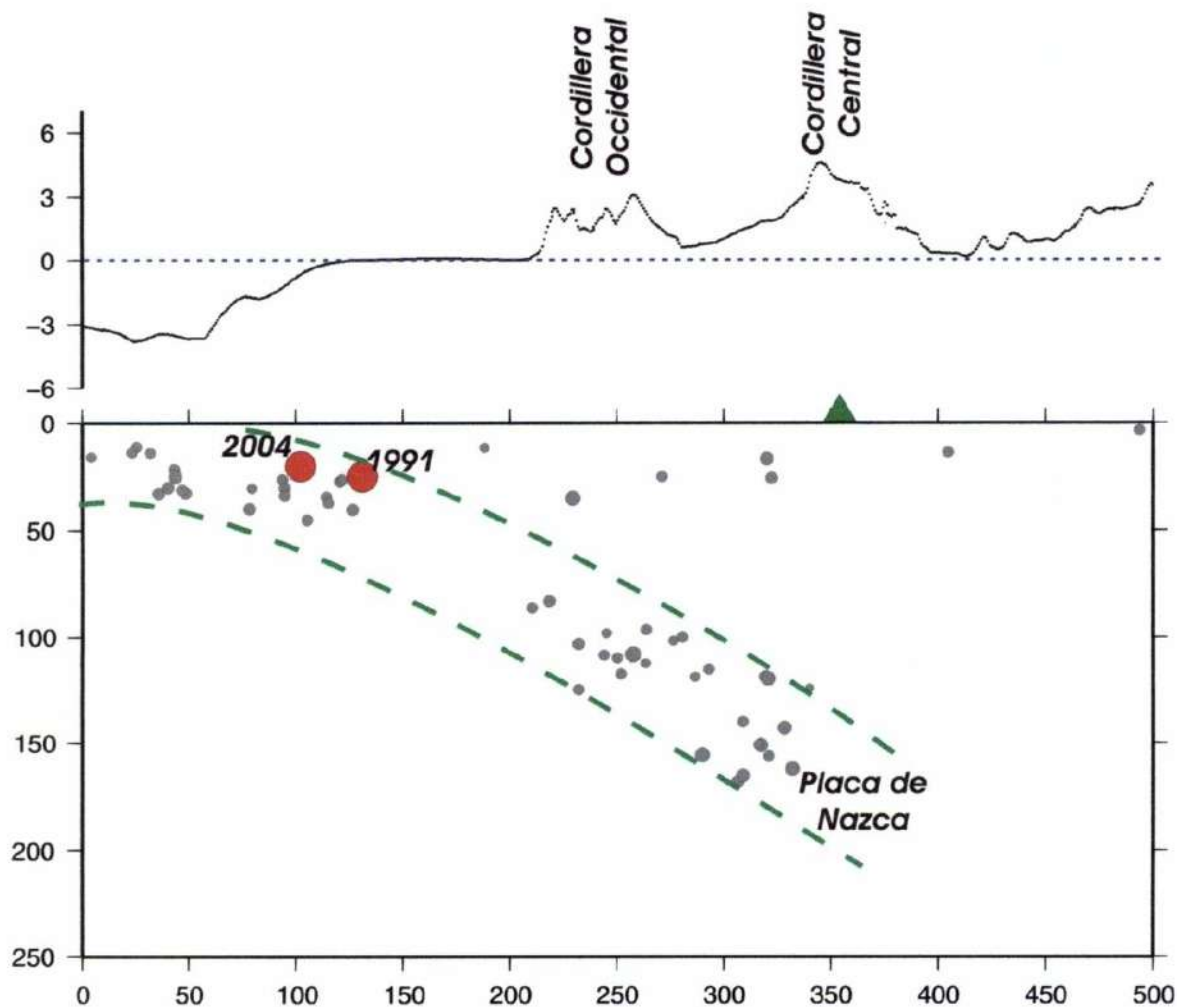


Figura 2.3. Sección transversal de azimuth 95° y 100 kilómetros de ancho, correspondiente al segmento Centro de la Zona de Subducción en el Pacífico Colombiano, donde se muestra la distribución de la sismicidad con la profundidad y se resaltan los sismos de 1991 y 2004. El gráfico superior es un perfil topográfico de la parte central de la sección (PMZSCali, 2004).

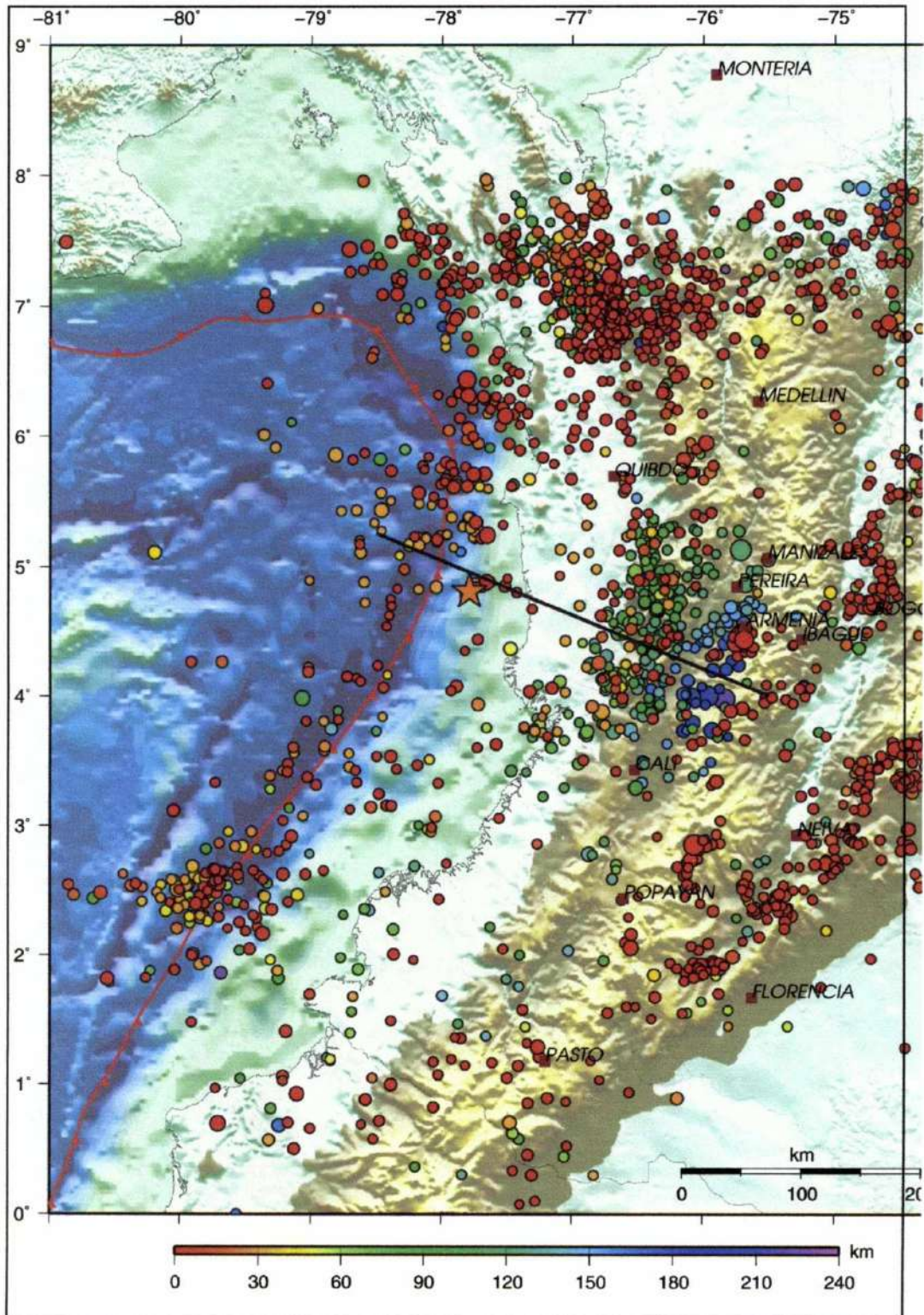


Figura 2.4. Distribución de la sismicidad ($M_l \geq 3.0$) registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC-INGEOMINAS) desde 1993, en función de la profundidad de los sismos.

Fecha aaaa/mm/dd	Tiempo (UT)	Lon	Lat	Prof.	M	Tipo M	Tipo Falla	Catálogo
1904/01/20	14:52:06.0	-79.000	7.000		7.2	Mw		G&R
1906/01/31	15:36:00.0	-81.500	1.000		8.6	Mw	Inversa	G&R
1957/05/24	02:37:50.0	-76.77	3.74	60.0	6.7			EHB
1970/09/26	12:02:31.7	-77.528	6.243	12.2	6.0			EHB
1976/07/11	20:41:51.4	-78.070	7.374	18.0	7.3	Mw	Oblicua	EHB
1979/12/12	07:59:04.7	-79.362	1.603	24.4	8.1	Mw	Inversa	EHB
1991/11/19	22:28:53.3	-77.358	4.549	25.0	7.2	Mw	Inversa	EHB
2004/11/15	18:59:20.9	-80.31	-0.595	25.9	7.2	Mw	Inversa	EHB

Tabla 2.1. Sismos históricos asociados a la zona de subducción

2.2.2 El sismo del 15 de noviembre de 2004

El lunes 15 de noviembre de 2004, a las 04:06 hora local, 12 estaciones de la RSNC registraron un evento sísmico (**Figura 2.5**). El epicentro se localizó en el Océano Pacífico, frente a las costas del departamento del Chocó, 50 km al suroeste del municipio de Bajo Baudó, en las coordenadas 4.81° N y 77.79° W, profundidad superficial y magnitud local 6.7 (magnitud Richter, calculada a partir de la amplitud máxima del registro).

La magnitud de momento (Mw), basada en el momento sísmico escalar obtenido a partir de la geometría de la falla, la profundidad del foco y el desplazamiento máximo, fue estimada en 7.1 por el Grupo de Sismología de la Universidad de Harvard. El momento sísmico es una medida más confiable del tamaño de un sismo.

El mecanismo focal del sismo del 15/11/04, 9:06 UT, calculado por el Grupo de Sismología de la Universidad de Harvard, indica una ruptura de tipo inverso a lo largo de un plano de azimut 22°, buzando 16° hacia el E-SE. Este mecanismo es similar al del sismo 19/11/1991 a las 22:29 UT, y es coherente con la geometría sugerida por la distribución de la sismicidad en este segmento de la zona de subducción, así:

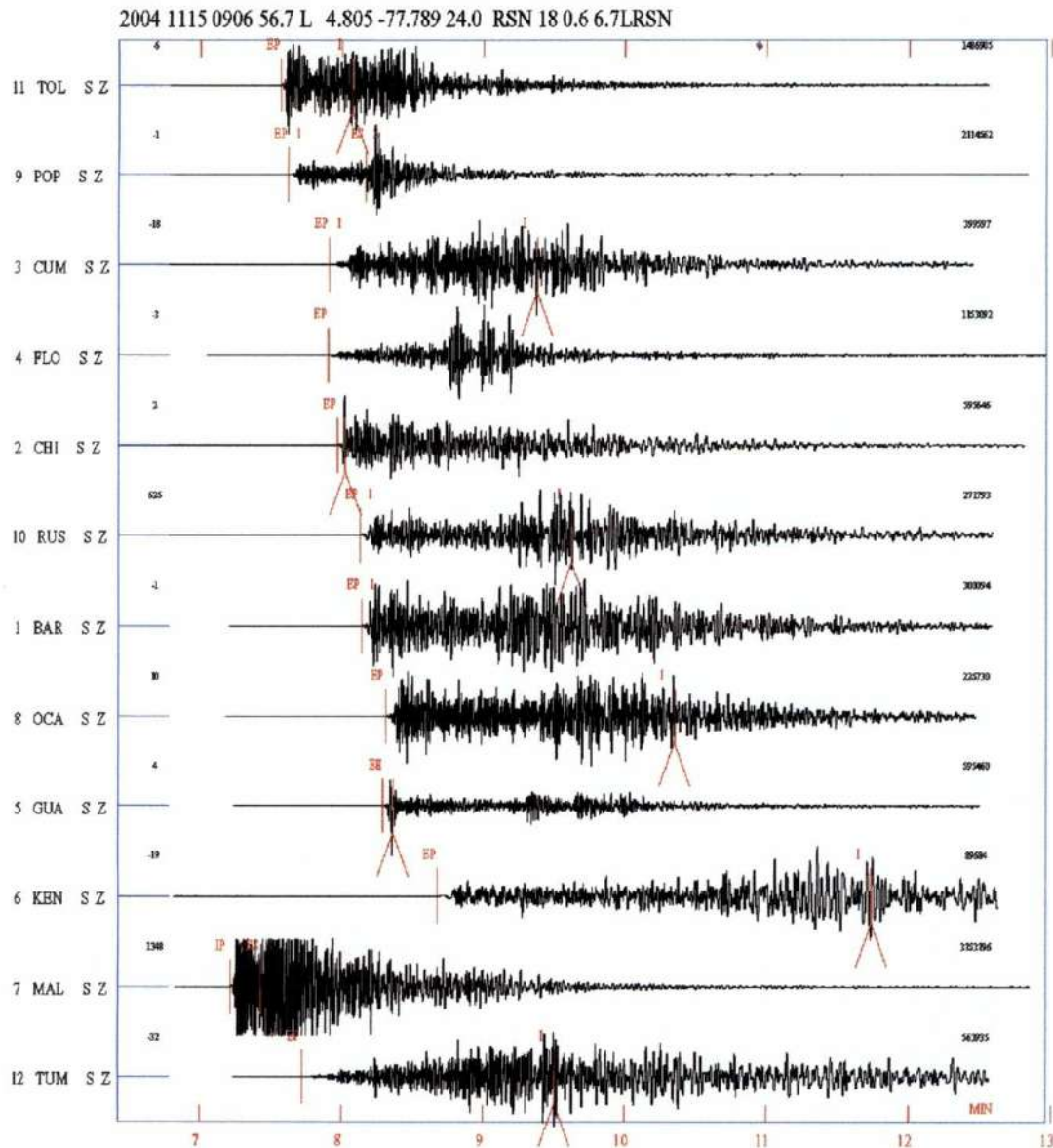
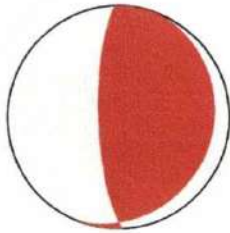


Figura 2.5. Cada línea horizontal corresponde a una estación de la RSNC (INGEOMINAS), el código que aparece a la izquierda corresponde al nombre de la estación. TOL, Tolima; POP, Popayán; CUM, Cumbal; FLO, Florencia; CHI, Chingaza; RUS, La Rusia; BAR, Barichara; OCA, Ocaña; GUA, Guaviare; KEN, Kennedy; MAL, Málaga y TUM, Tumaco.



Tiempo centroide: 9: 7: 3.1 GMT

Duración media= 8.8

Tiempo centroide menos tiempo hipocentro: 8.1

Tensor de Momento: Exp=26 2.970 -0.150 -2.810 0.410 -5.120 -0.530

Mw= 7.1 mb= 7.0 Ms= 7.0 Ml=6.7 (Richter, RSNC)

Momento escalar = 5.92e+26 dyn/cm

Plano falla: strike=22 dip=16 slip=113

Plano falla: strike=178 dip=75 slip=84

Los mecanismo focales calculados por diversos grupos internacionales: National Earthquake Information Center (NEIC) del Servicio Geológico de los Estados Unidos, Grupo de Sismología de la Universidad de Harvard y Earthquake Information Center-ECI de la Universidad de Tokio, indican una ruptura esencialmente de tipo inverso con uno de los planos de ruptura posibles mostrando un buzamiento menor de 30°. La orientación del plano de falla y la componente de rumbo difieren particularmente para la solución del NEIC. Como plano de ruptura se ha seleccionado el plano nodal de menor buzamiento, cuyo rumbo es coherente con la geometría sugerida por la distribución de la sismicidad previa al evento en este segmento de la zona de subducción.

La modelación preliminar de ondas telesísmicas del ECI, muestra una ruptura simple con una duración de 15 segundos, un área de ruptura de aproximadamente 30x30 km, una dislocación máxima de 5.3 m y momento sísmico de 7.9×10^{19} Nm que corresponde a una dislocación promedio de 2.2m.

La localización del sismo y su mecanismo focal indican que se trata de un evento inverso, interplaca, entre la Placa de Nazca que subduce a lo largo de la zona de fosa y el continente Suramericano que la cabalga.

Secuencia de réplicas

La mayoría de sismos superficiales de tamaño significativo se presentan acompañados por una secuencia de eventos de características bien definidas denominadas secuencia de réplicas. La secuencia corresponde a un proceso secundario de relajación de las concentraciones de esfuerzos producidas por la ruptura dinámica del sismo principal, y consiste en una serie de sismos subsecuentes al sismo principal y de magnitud menor. Estos sismos generalmente se localizan en toda el área de la ruptura principal y sus alrededores. La frecuencia de ocurrencia de réplicas en el tiempo decae siguiendo la ley de Omori:

$$n = \frac{c}{(1+t)^p}$$

donde n es la frecuencia de ocurrencia con el tiempo, t, después del sismo principal.

El sismo del 15 de noviembre de 2004 no es la excepción. Una hora después del sismo de las 4:06 se presentó la primera réplica significativa, de $M_l = 3.8$, y la secuencia continúa hasta la fecha.

Como se observa en la **Figura 2.6**, el número de eventos en el tiempo ha venido decayendo de acuerdo con la ecuación de Omori, con un valor de p cercano a 2.

Comparado con $p=1$ generalmente reportado para las secuencias de réplicas, este valor indica una relajación más rápida de esfuerzos durante los 2 días que siguieron al evento. El rango de magnitudes de las réplicas localizadas por la RSNC muestra una tendencia a disminuir con el tiempo (**Figura 2.7**), pero aún se entremezclan sismos de magnitud importante (por ejemplo 4.4 el 24 de noviembre).

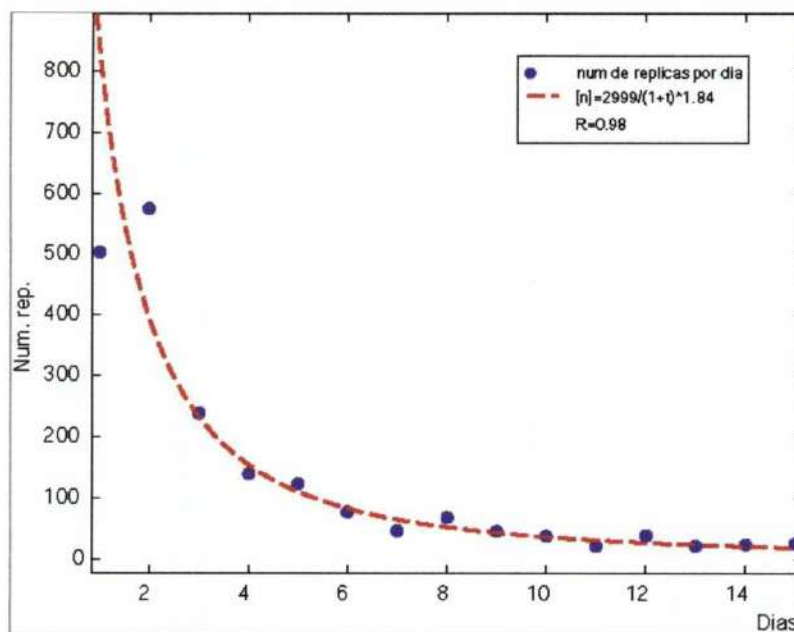


Figura 2.6. Distribución diaria del número de réplicas del sismo del 15 de noviembre de 2004, 4:06, de acuerdo al registro en la estación más cercana al epicentro (B. Málaga, RSNC). En punteado la curva de mejor ajuste a la ecuación de Omori. El número de más bajo en el primer día se debe al conteo de sólo 15 horas.

La mayor concentración de réplicas, que incluye las mayores, se encuentra hacia el oeste del epicentro del sismo principal y llega hasta la fosa oceánica (**Figura 2.8**). Esta se extiende en un área de unos 35 x 30 km. Una agrupación menor de sismos se observa a unos 20 km de la línea de costa. Si bien las localizaciones epicentrales de la red permanente de INGEOMINAS tienen una incertidumbre del orden de 20 km en promedio para sismos en esta región del Pacífico, las localizaciones relativas entre el evento principal y las réplicas tienen menor incertidumbre. Por lo tanto la dimensión de la ruptura de 40 km sugerida por las réplicas, mejor definida en el sentido longitudinal, parece razonable. Esta dimensión está en el mismo rango que la calculada por el ERI (Earthquake Research Institute, Universidad de Tokio) de aproximadamente 30x30 km.

Se espera que la información colectada por la Red Portátil instalada por INGEOMINAS en el Chocó y norte del Valle después del sismo principal contribuya a precisar los parámetros de la ruptura.

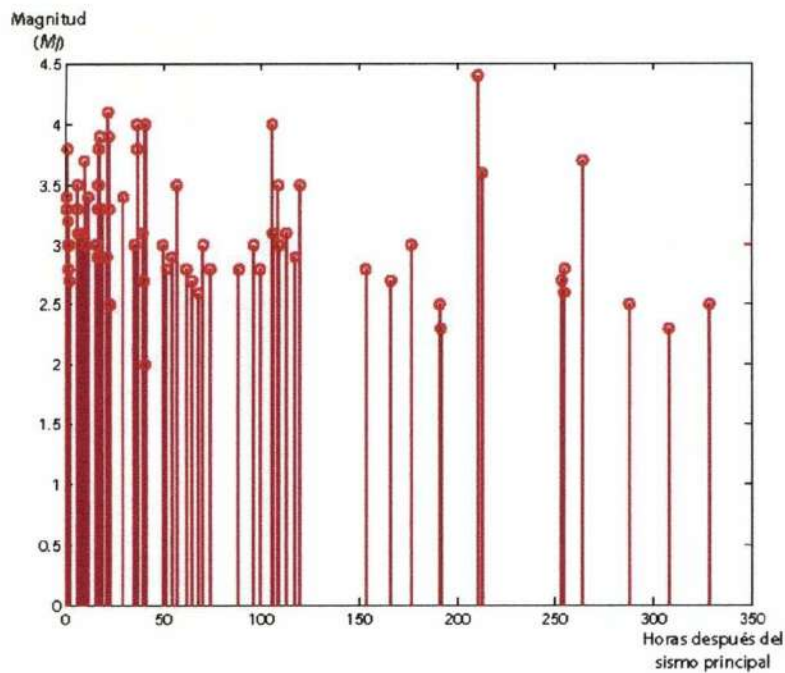


Figura 2.7. Distribución temporal de magnitudes en la secuencia de réplicas reportadas por la RSNC. Nótese el sismo mayor de la secuencia ($Ml = 4.4$) del 24 de Noviembre.

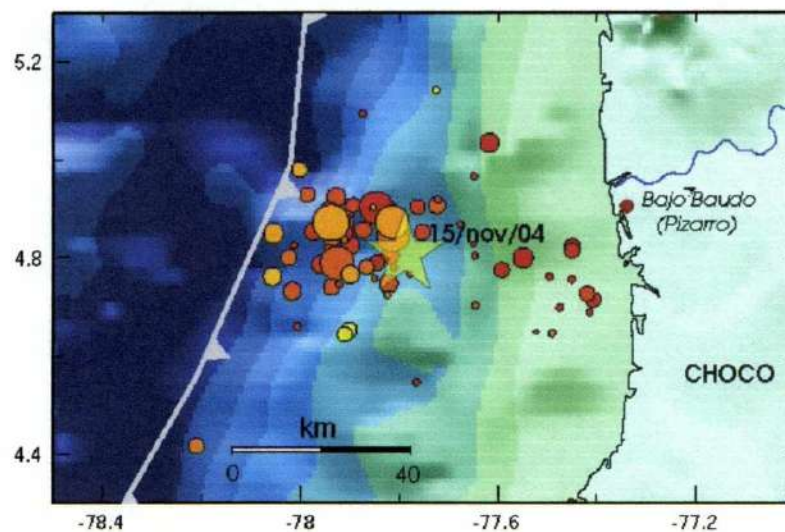


Figura 2.8. Distribución de réplicas registradas por las estaciones permanentes de la RSNC (INGEOMINAS) hasta el 29 de Noviembre de 2004.

2.3 EFECTOS GEOLÓGICOS INDUCIDOS POR EL SISMO EN LA ZONA EPICENTRAL

Los efectos inducidos por un terremoto son de naturaleza diversa, son mayores a mayores magnitudes, y disminuyen con la distancia a la fuente del evento. En sismos como el registrado frente a la costa del Chocó, los principales efectos que se pudieran registrar son del tipo: sacudidas del terreno (**Fotografía 2.1**), licuaciones, agrietamientos, deslizamientos reactivados y tsunamis.

La licuación ocurre cuando sedimentos no consolidados y saturados de agua, pierden su capacidad de carga al ser sacudidos fuertemente por las ondas sísmicas. En la zona litoral del municipio de Bajo Baudó, se reconocen evidencias de licuaciones inducidas por el sismo del 15 de noviembre, tales como agrietamientos laterales (**Fotografía 2.2**), volcanes de arena (**Fotografía 2.3**), elevación súbita del nivel freático registrada como inundaciones temporales (testimonio de los pobladores), y hundimiento e inclinación de las viviendas palafíticas (efecto reportado en Pilizá).



Fotografía 2.1. Efectos por la sacudida del terreno sobre un puente en la localidad de Usaragá

Los tsunamis son grandes olas causadas por el desplazamiento vertical del fondo marino durante un terremoto cuya fuente se encuentra bajo el lecho marino, y a profundidad superficial. En el reconocimiento de la zona litoral del municipio de Bajo Baudó, no se encontraron evidencias de que el terremoto del 15 de noviembre generara tsunami. Si bien el evento presentó magnitud y profundidad propicias, y el Sistema de Alerta de Tsunami emitió un boletín informando la ocurrencia del sismo, quizá el desplazamiento vertical y la geometría del talud continental no favorecieron la generación del mismo.

Los reportes de agua o inundaciones se asocian a fenómenos de licuación. Es importante señalar que al momento de ocurrencia del sismo, la marea se encontraba alta (pleamar a las 05:42, con altura de 4.21 m).



Fotografía 2.2 Cráteres de arena (aproximadamente 30 cm de diámetro), asociados al fenómeno de licuación en la zona de playa de Pizarro.



Fotografía 2.3. Agrietamientos laterales paralelos a la línea de costa en Pizarro.

3. INTENSIDAD Y EFECTOS DEL SISMO

Calificar la "intensidad" de un sismo no es suficiente para explicar los daños que éste causa, estos dependen en buena medida de la capacidad de las construcciones para resistir los movimientos del terreno originados en el sismo, las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno y las características que presente el sismo en particular. Por lo anterior, el levantamiento de información con respecto a los daños se realizó directamente en campo, mediante la realización de encuestas y captura de datos significativos observados, para lo cual se diseñaron dos instrumentos:

- ✓ Formato de Evaluación de Intensidad Sísmica Escala EMS-92/98 elaborado por UNIVALLE e INGEOMINAS.
- ✓ Formato para Inventario Rápido de Daños por Sismo elaborado por el INGEOMINAS.

Para desarrollar estas actividades, durante los días comprendidos entre el 15 y el 28 de noviembre de 2004, el INGEOMINAS programó el desplazamiento a la zona epicentral y a las zonas afectadas de un grupo de más de 30 funcionarios, entre ingenieros, geólogos, sismólogos y operarios, de la sede Central y los Grupos de Trabajo Regionales de Cali, Medellín, Manizales, Popayán, Pasto y Bucaramanga. Para las labores de reconocimiento y evaluación rápida de daños, el INGEOMINAS solicitó el apoyo de universidades y otras instituciones interesadas en el tema entre las que se encuentran: Universidad del Cauca (Popayán), Universidad Javeriana (Cali), Instituto Geofísico (Universidad Javeriana de Bogotá), Universidad Tecnológica del Chocó (Quibdó), Dirección para la Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (DPAE), Universidad del Valle (Cali), Observatorio Sismológico del Quindío (Universidad del Quindío), Universidad Autónoma (Cali), DIMAR, Comisión Colombiana del Océano (CCO), Armada Nacional, CREPAD's y CLE's, entre otras.

Además de las encuestas realizadas por las comisiones desplegadas por el INGEOMINAS a los diferentes municipios afectados y en coordinación con los Comités Regionales de Atención y Prevención de Desastres (CREPAD's), se envió a los Comités Locales de Emergencia (CLE's) el Formato de Evaluación de Intensidad con el fin de realizar otras y así lograr un mayor número de encuestas que permitan un adecuado cubrimiento y confiabilidad en los análisis, considerando la siguiente indicación de muestreo:

<u>No. Habitantes de la cabecera</u>	<u>No. de encuestas mínimas</u>
Menos de 10,000	10
10,000 a 100,000	20
Mayor a 100,000	30

Actualmente se recibe la información recolectada en cada uno de los municipios para su posterior procesamiento y análisis. En la **Tabla 3.1** se relacionan las poblaciones que fueron visitadas discriminadas por departamentos.

La evaluación e inventario de daños en los municipios se concentró principalmente en los lugares reportados por los Comités Locales de Emergencia, Cruz Roja, Bomberos, Defensa Civil y Alcaldía Municipal, entre otros. En particular en la Ciudad de Cali, estas labores se emprendieron inmediatamente ocurrido el evento con personal del INGEOMINAS de la Sede Regional en Cali y del Proyecto de MZSCali que se encontraba realizando labores de campo, inspeccionando inicialmente los sectores con daños apreciables.



REPÚBLICA DE COLOMBIA

FORMULARIO PARA EVALUACIÓN DE INTENSIDAD SÍSMICA (ESCALA EMS - 92/98*)



Las respuestas que aquí se den no representan ninguna obligación institucional ni COMPROMETEN a las autoridades y organismos gubernamentales con la realización de obras, planes y programas de reconstrucción, recuperación o atención. El uso de esta información es estrictamente para fines académicos y científicos. Agradecemos a las personas que colaboran con diligenciar este formulario.

DATOS DEL EVENTO

Fecha: Año Mes Día Hora

LUGAR DONDE SE ENCONTRABA CUANDO OCURRIÓ EL SISMO

Departamento:

Municipio:

Barrio: Dirección:

A. EFECTOS EN PERSONAS

1. ¿Sintió el sismo?: Sí No Muy fuerte Moderado Muy débil

2. Durante el sismo:

a. ¿Dónde se encontraba?

dentro de un inmueble al aire libre en la calle

b. ¿En qué piso se encontraba?

c. ¿Qué actividad realizaba?

3. a. ¿Qué sensaciones tuvo? Responda Sí o No.

Se asustó Tuvo pánico Si dormía se despertó Corrió a la calle

Perdió el equilibrio: Tuvo dificultad para mantenerse en pie Fue lanzado al piso

Sintió sacudimiento o balanceo de: Edificio Habitación Cama

b. Si tiene información, diga cómo reaccionaron las personas de su vecindario

B. EFECTOS SOBRE OBJETOS Y ANIMALES

4. ¿Notó balanceo de algún objeto colgante (materia, lámpara, etc.)	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
5. ¿Notó ruido de puertas, ventanas, espejo o algún otro tipo de objeto?	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
6. ¿Notó que puertas o ventanas se abrieron y cerraban?	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
7. ¿Notó rechinar objetos como porcelana, vasos, frascos, etc.	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
8. ¿Notó caída o volcamiento de algún objeto pequeños y muebles livianos?	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
9. ¿Notó caída o desplazamiento de muebles pesados (televisor, computador, etc.)	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
10. ¿Notó alguna reacción de susto en los animales?	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
11. ¿Notó movimiento, salpicamiento o vertimiento de líquidos?	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
12. ¿Notó ondulaciones en el terreno	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>
13. ¿Notó caída de monumentos	Sí	<input type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>

14. Agregue o aclare sobre algún efecto que haya notado durante el sismo:

*Escala Macrosísmica Europea (EMS-92/98). Adaptación de la MSK del 64



C. EFECTOS EN CONSTRUCCIONES

15. Defina el tipo de estructura donde se encontraba en el momento del sismo

Edad aproximada de la construcción Número de pisos

a. Mampostería (Sin vigas ni columnas)

- Piedra suelta
- Adobe o tapia
- Ladrillo o bloques cementados
- Ladrillo con lozas de hormigón armado
- Ladrillo reforzado (mampostería atada)

b. Tipo de Estructura

- Concreto
- Metálica
- Concreto Reforzado

c. Madera (Incluye estructuras en guadua)

16. ¿Se afectó la construcción donde se encontraba? Si No ¿en que pisos?

Si la respuesta es afirmativa describa los tipos de daños:

- | | | | | |
|---|----|--------------------------|----|--------------------------|
| a. Fisuras en revestimiento | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| b. Caída de pañete | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| c. Caída de algunos elementos sueltos de la construcción | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| d. Caída de tejas, chimeneas | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| e. Fisuras o grietas en muros | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| f. Daños estructurales (columnas, vigas o muros de carga) | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| g. Grietas en columnas y desprendimiento de piezas de concreto; grietas en vigas | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| h. Daños en juntas de la estructura del edificio con la destrucción del concreto y exposición de las varillas de refuerzo | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| i. Desplome de columnas o colapso parcial | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |
| j. Colapso total | Si | <input type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> |

D. EFECTOS EN LA NATURALEZA

17. Observaciones sobre algunos efectos notados en la naturaleza tales como deslizamientos, grietas en el suelo, desviación de caudales, cambio en el nivel de agua en pozos, fenómenos de licuación del suelo:

18. Otras observaciones (duración del sismo, dirección preferencial de movimiento, ruido, otros movimientos sísmicos):

Nombre del encuestado:	Lugar y fecha de la encuesta:

Una vez llenado este formulario entreguelo al encuestador o remítalo a una de las siguientes direcciones:

- 1 **Area de Amenazas Geologicas, INGEOMINAS, Diagonal 53 No. 34 – 53, Bogota.**
- 2 **Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Melendez, Cali.**

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA - INGEOMINAS
FORMATO PARA INVENTARIO RAPIDO DE DAÑOS POR SISMO

NOMBRE DEL ENCUESTADOR: _____ FECHA Día: _____ Mes: _____ Año: _____ INSTITUCION: _____

EVENTO: Sismo de Pizarro (Bajo Baudo, Choco), Noviembre 15 de 2004, ML=6.7 Esc.Richter, Superficial, RSNC

CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN				DAÑOS A LA EDIFICACIÓN																																																					
Ciudad/Dpto. Barrio Dirección: Localización relativa en manzana <table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> Edad <input type="checkbox"/> < 5 años <input type="checkbox"/> 6 a 18 <input type="checkbox"/> 19 a 50 <input type="checkbox"/> >50 años																																																			TIPO <input type="checkbox"/> Casa <input type="checkbox"/> Edificio aptos. <input type="checkbox"/> Edificio oficinas <input type="checkbox"/> Hospital <input type="checkbox"/> Centro comercial <input type="checkbox"/> Centro Educativo <input type="checkbox"/> Bodega <input type="checkbox"/> Estadio <input type="checkbox"/> Otros tipos	GEOMETRIA Altura (m) _____ No. Pisos _____ Forma planta _____	ESTRUCTURA <input type="checkbox"/> Muros <input type="checkbox"/> Pórticos <input type="checkbox"/> Columna corta <input type="checkbox"/> Inconfinada	MATERIALES <input type="checkbox"/> Ladrillo <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Concreto <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Metal	CIMENTACIÓN <input type="checkbox"/> Zapatas <input type="checkbox"/> Cim. Corrido <input type="checkbox"/> Pilotes <input type="checkbox"/> Placa SUELO DE CIMENTACION:	TIPO DE DAÑO <input type="checkbox"/> Falla total <input type="checkbox"/> Agrietamiento muros <input type="checkbox"/> Agrietamiento columnas <input type="checkbox"/> Agrietamiento vigas <input type="checkbox"/> Asentamiento <input type="checkbox"/> Volteo <input type="checkbox"/> Falla columna <input type="checkbox"/> Falla viga	SEVERIDAD <input type="checkbox"/> Leve <input type="checkbox"/> Moderado <input type="checkbox"/> Severo <input type="checkbox"/> Destrucción total
LICUACION DE SUELOS				DAÑOS A OTRA INFRAESTRUCTURA																																																					
LOCALIZACION <input type="checkbox"/> Hundimientos <input type="checkbox"/> Agrietamientos terreno <input type="checkbox"/> Volteo edificaciones <input type="checkbox"/> Flotación tuberías <input type="checkbox"/> Surgimientos agua <input type="checkbox"/> Formación de cráteres	EVIDENCIAS <input type="checkbox"/> Otras evidencias	TIPO INFRAESTRUCTURA 	Leve 	Moderado 	Extensivo 	Destrucción 	NOTA: Si es posible, indicar en las casillas la cantidad. Por ej. 100 metros para vías																																																		
MOVIMIENTOS EN MASA																																																									
LOCALIZACION:																																																									
TIPO DE MOVIMIENTO <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 Caída Volcamiento Deslizamiento rotacional Deslizamiento traslacional Propagación lateral Replacón Colapso Flujo	MATERIAL 1 2 <input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Deltitas <input type="checkbox"/> Tierra <input type="checkbox"/> Suelos <input type="checkbox"/> Bloques <input type="checkbox"/> Cantos <input type="checkbox"/> Grava <input type="checkbox"/> Arena <input type="checkbox"/> Limo <input type="checkbox"/> Arcillas <input type="checkbox"/> M.O.	% 1 %2 	Humedad del suelo 1 2 <input type="checkbox"/> Seco <input type="checkbox"/> Lig. Húmedo <input type="checkbox"/> Húmedo <input type="checkbox"/> Muy húmedo <input type="checkbox"/> En papado Origen del suelo 1 <input type="checkbox"/> Residual <input type="checkbox"/> Sedimentario <input type="checkbox"/> Coluvial <input type="checkbox"/> Volcánico	VELOCIDAD 1 2 <input type="checkbox"/> Extr. Rápido (>5 m/s) <input type="checkbox"/> Muy rápido (>3 m/m/in) <input type="checkbox"/> Rápido (>1.8 m/hr) <input type="checkbox"/> Moderado (> 13 m/m/es) <input type="checkbox"/> Lento (> 1.5 m/año) <input type="checkbox"/> Muy lento (> 16 m/m/año) <input type="checkbox"/> Ext. Lento (< 16 m/m/año)	OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO Y MATERIAL <input type="checkbox"/> Material canalizado <input type="checkbox"/> Material No canalizado <input type="checkbox"/> Licuación <input type="checkbox"/> OtraDescribir _____	MORFOMETRIA Volúmen desplazado (m ³) _____ Área afectada () _____ Longitud de corona a punta de pie () _____ Altura entre corona y punta de pie () _____ Dirección del movimiento: _____																																																			
DAÑOS POR MOVIMIENTOS EN MASA																																																									
Población		Infraestructura				Actividades económicas				Daños ambientales																																															
Número de muertos	Tipo	Unidad	Intensidad y cantidad				Valor	Tipo	Unidad	Intensidad y cantidad				Valor																																											
Número de heridos		Medida	DL	DM	DS	D	U\$		Medida	D	DL	DM	DS	U\$																																											
Número damnificados	Viviendas	Unidad																																																							
Convención para intensidad de daño DL: Daño leve DM: Daño moderado DS: Daño severo D : Destrucción total																																																									



3.1 INTENSIDAD SÍSMICA EN CALI

Se realizaron en total 426 encuestas tanto en la parte urbana como en los barrios localizados en zonas de ladera, cubriendo así la totalidad de la ciudad. Esta labor fue ejecutada por tres grupos de trabajo del INGEOMINAS, contando con el apoyo de personal docente y estudiantil de las Universidades del Valle, Autónoma y Javeriana en Cali, así como de personal técnico del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana de Bogotá. Las labores de evaluación de los datos obtenidos de la mayor parte de las encuestas realizadas, fueron ejecutadas por personal docente y estudiantil del Departamento de Geografía de la Universidad del Valle, éstas se presentan detalladamente en el **Anexo 2**.

3.2 INVENTARIO DE DAÑOS EN CALI

Los grupos de trabajo desplegados por el INGEOMINAS realizaron una evaluación rápida de los daños en la zona urbana y de laderas, priorizando los sectores y/o lugares reportados por la CREPAD y el CLE. El control de campo cubrió la mayor parte del área urbana de la ciudad, identificando las viviendas y/o edificios con daños significativos, levantando datos de características estructurales para cada uno de ellos (localización, edad, uso, geometría, altura, tipo de estructura, materiales y tipo de cimentación si fuese posible), algunos de los cuales fueron dados directamente por los propietarios y/o administradores. Posteriormente se procedió a cualificar el nivel o grado del daño en las edificaciones teniendo en cuenta el tipo de daño, los elementos afectados y la densidad del mismo, así:

DEPARTAMENTO	MUNICIPIOS
ANTIOQUIA	Medellín, Sopetran, Sta. Fe de Antioquia, Cañasgordas, Uramita, Dabeiba, Murindo, Envigado, Itagui, Amagá, Bolombolo, Ciudad Bolívar, Cisneros, La Ceja, Sonson, Guarne, Marinilla, Guatapé
CHOCO (Sector Litoral)	Pizarro, Togoromá, Bahía Solano, Pto. Abadía, Nuquí, Docordó
CHOCO (Sector Cordillera)	Quibdó, Istmina, Tadó, Chocó, Novita, Bagadó, El Carmen, Condoto, Sipi
CALDAS	Manizales, Chinchina, Aguadas, Pacora, Marmato, Filadelfia, Aranzazu, Manizales, Marulanda, Pensilvania, Manzanares, Marquetalia, Victoria, Samaná, La Dorada, Marsella, Anserma
CAUCA	Popayán, Pto. Tejada, Santander de Quilichao, Piendamó, Rosas, Patía, Balboa, Argelia, El Tambo, Timbio
NARIÑO	Pasto, Chachagüi, La Unión, Túquerres, Yacuanquer, Tangua, Ricaurte, Tumaco, Cumbal
RISARALDA	Virginia, Belalcazar, Pereira, Santa Rosa, Marsella, Balboa, Santuario, Pueblo Rico
TOLIMA	Alvarado, Venadillo, Lérica, Mariquita
QUINDIO	Armenia, Montenegro, La Tebaida, Circasia, Salento, Calarca, Córdoba, Quimbaya, Filandia, Alcalá, Ulloa, Pijao
VALLE	Cali, Buenaventura, Córdoba, Triana, Cisneros, Loboguerrero, Calima, Dagua, Yotocó, Florida, Pradera, Candelaria, Palmira, El Cerrito, Ginebra, Buga, Vigés, Ansermanueva, Cartago, Argelia, Versalles, La victoria, El Dovio, Roldanillo, Bolívar, Sevilla, Riofrío, Tulúa, Yumbo, Jamundi, Pance

Tabla 3.1 Poblaciones visitadas para evaluación de daños por el sismo de Pizarro (INGEOMINAS, 2004)

Daño Leve: Fisuras esporádicas en elementos no estructurales; pequeños desprendimientos en pañete localizados en muros, techos y fachadas (**Fotografía 3.1**).

Daño Moderado: Algunas fisuras y/o agrietamientos localizados en elementos no estructurales; caídas esporádicas de muros, techos y fachadas; ocurrencia de pequeños asentamientos y desplazamientos (**Fotografía 3.2**).

Daño Severo: Gran cantidad de agrietamientos con aberturas apreciables localizados en elementos no estructurales; caídas de muros, techos y fachadas con alguna regularidad; agrietamientos en elementos estructurales; colapso parcial de viviendas; ocurrencia de asentamientos y desplazamientos considerables (**Fotografía 3.3**).



Fotografía 3.1. Daño leve donde se observa pequeños desprendimientos y fisuras esporádicas en la fachada del edificio.

Como resultado de las labores ejecutadas se identificaron en total **45 sitios** de daños por el sismo (**Tabla 3.1**), los cuales se presentan en la **Figura 3.3** localizados sobre el Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) de Cali (Versión Preliminar, Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali, Convenio INGEOMINAS-DAGMA), observándose que la mayor parte de ellos se concentran hacia la parte media del abanico aluvial del río Cañaveralejo y la parte media del abanico del río Cali, así como daños aislados observados en la llanura aluvial del río Cauca, hacia la parte media y norte de la ciudad. En la **Tabla 3.3** se presenta la cantidad de daños observados en los sectores anteriormente mencionados.



Fotografía 3.2_Daño Moderado presentando fisuras y agrietamientos con alguna regularidad con desprendimiento de material en muros de la edificación.



Fotografía 3.3 Daño Severo en la edificación con agrietamientos de aberturas apreciables, caídas de muros y fachadas.

En las **Figuras 3.1 y 3.2** se localizan los sitios relacionados en la **Tabla 3.2** discriminados por el nivel de daño para diferentes rangos de edad de construcción y número de pisos respectivamente.

De manera general, la tipología de los daños observados en las edificaciones afectadas poseen las siguientes características:

- Construcciones hasta de dos pisos con muros de bloques de cemento y/o ladrillos sufrieron agrietamientos y fisuras sin implicar caídas ni colapsos de muros que no afectaron su estabilidad. Es importante resaltar que aunque no se ubicaron en la cartografía, algunas de estas viviendas sufrieron daños considerables como en los sectores comprendidos en la llanura de inundación del Río Cauca, en donde el tipo y materiales de construcción poseen bajas especificaciones técnicas.
- Construcciones con estructura tipo pórtico de más de 10 pisos, sufrieron daños básicamente en muros sin afectar los elementos estructurales ni la estabilidad del edificio, observándose fisuras
- y agrietamientos en muros, así como caída de pañete en fachadas y muros. La mayoría de estos edificios comprenden áreas residenciales posiblemente construidas con un nivel más alto de supervisión en el diseño y la construcción.

En la evaluación de daños también se tuvo en cuenta el Inventario de Procesos Morfodinámicos (Versión Preliminar, Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali, Convenio INGEOMINAS-DAGMA), mediante un recorrido realizado sobre las zonas de ladera de la ciudad. De acuerdo con lo observado no hubo reactivación de deslizamientos como tampoco se generaron nuevos movimientos en masa. Ello era de esperarse por cuanto estos movimientos del terreno por lo general ocurren en sectores cercanos a la zona epicentral.

De igual manera, no se observaron evidencias o indicios de licuación de arenas sobre la llanura aluvial del Río Cauca y en el Sector de Navarro. Este fenómeno de licuación es de gran importancia en las zonas aledañas al río Cauca, ya que podría generar el desplazamiento de los jarillones con los consecuentes problemas de inundación, aspecto que se analiza detalladamente en el marco del Proyecto de MZSCali (corrimiento lateral). Afortunadamente, durante la inspección de campo, no se detectaron problemas de agrietamientos en la corona y espaldón de los jarillones.

3.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS DE LOS SECTORES DE MAYOR AFECTACIÓN

Con base en información preliminar correspondiente a las investigaciones que actualmente se desarrollan en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali (Convenio INGEOMINAS-DAGMA), a continuación se presentan algunos de los aspectos geológicos y geotécnicos relevantes que inciden en la respuesta sísmica local del subsuelo, los cuales son caracterizados y analizados detalladamente dentro de las actividades que se ejecutan.

Teniendo en cuenta las características geológicas y morfológicas de Cali y sus alrededores, el sector se dividió en dos grandes áreas: La primera, corresponde a la zona montañosa localizada al occidente de Cali, donde predominan rocas volcánicas Cretácicas (Formación Volcánica), suprayacidas por rocas sedimentarias Terciarias (Formación Guachinte), depósitos Plio-Pleistocénicos (Formación Jamundi y depósitos Fluvio-Volcánicos de Terrón Colorado) y depósitos

No.	NOMBRE	DIRECCIÓN	NIVEL DE DAÑO	No. PISOS	EDAD
1	Bloques de Apartamentos Bueno Madrid	Cra 5 N Calle 38	L	3	A
2	Conjunto Residencial	Calle 34 AN # 2B	M	16	R
3	Edificio	Cra 2C # 40-49	L	5	R
4	Edificio Fiscalla	Calle 25N # 6A-11	L	10	R
5	Fundación la 14	Calle 30N # 6Bis-29	L	8	V
6	Edificio Matecaña	Calle 72 C # 5N - 45	L	5	R
7	Edificio Los Guadales	Calle 70 A # 4CN -103	L	13	R
8	Edificio Prados del Norte	Calle 38AN # 2EN-125	M	17	V
9	La 14 Calima	Cra 1 Calle 70 N	M	10	R
10	Edificio Torre de Galeón	Cra 50 # 7A-50	M	18	R
11	Clinica Materno Infantil	Cra 50 con Autopista	M	16	R
12	Vivienda	Cra 24E # 85-38	S	1	N
13	Planta Puerto Mallarino		L	3	R
14	Edificio los Conquistadores	Cra 38 #5B-28	M	15	R
15	Planta de Tratamiento Río Cali (San Antonio)	Av. Circunvalar Cra. 3a	L	1	R
16	Torres de la Plazuela	Cra 40 # 6-50	L	17	R
17	Edificio Géminis	Cra 41 # 6-35	M	15	R
18	Edificio Farallones de Cali	Calle 9 # 42-55	M	12	R
19	Clinica Santillana	Cra 46 # 9C-85	L	14	R
20	Comfandi El Prado	Cra 23 # 26B -46	L	14	R
21	Vivienda	Cra 26 B1 # 78-39	M	1	R
22	Vivienda	Cra 26 #123 i 64	M	1	R
23	Edificio Plaza Real	Cra 56 # 5-91	M	13	R
24	Edificio Marañon	Cra 42 # 6 -29	M	17	V
25	Torres Tequendama	Cra 46 # 8B-95	S	11	R
26	Unidad Residencial Colseguros II	Calle 12 C # 29B-15	M	14	R
27	Conjunto Residencial Siete Maravillas	Cra 80A # 13A-29	L	13	R
28	Carcel Distrital Judicial Villahermosa	Transv. 25 # 31-116	M	4	A
29	Edificio Gemelos de Guadalupe	Cra 64A # 13C-65	M	13	R
30	Edificio Vientos de Guadalupe	Calle 14 # 54-15	M	10	R
31	Torres de la Cincuenta	Cra 50 con Calle 9D	S	16	R
32	Edificio Torres de Alicante	Calle 9 con Cra 45	S	13	R
33	Edificio Atalanta	Cra 57 # 4-49	L	13	V
34	Clinica Rafael Uribe Uribe	Av 2BN con Cra 24	L	11	V
35	Edificio Natania	Av 2AN # 28N-73	M	11	R
36	Edificio Alto de Los Pinares	Cra 68 # 13B-61	L	12	R
37	Unidad Residencial Republica Vecina de Venezuela	Calle 37A # 6-18	L	14	V
38	Edificio del Norte	Calle 24 N # 5Nn24	M	14	V
39	Centro Profesional Sexta Avenida	Calle 23 N # 6AN-17	L	13	V
40	Edificio Santa Mónica	Av 6A # 20N -20	M	22	V
41	Edificio Las Fuentes	Av 6A # 18N -42	L	19	V
42	Edificio La Fontana	Calle 21 N #4N-05	L	11	V
43	Torre Aristi	Calle 9 # 9-46	L	25	V
44	Supermercado Mercar	Cra 15 Calle 23	L	4	R
45	Rincón de La Plaza	Cra 54 A # 5A-21	L	13	N

CONVENCIONES NIVEL DE DAÑO :
L Daño Leve
M Daño Moderado
S Daño Severo

CONVENCIONES EDAD DE CONSTRUCCION :
N Hasta de 5 años (nueva)
R De 6 a 18 años (reciente)
V De 19 a 50 años (vieja)
A Más de 50 años (antigua)

Tabla 3.2. Construcciones afectadas por el sismo de Pizarro en la Ciudad de Cali (INGEOMINAS, 2004)

Unidad Geológica Superficial (UGS)	Zona	Número de Daños
Sal2	Abanico Río Cali	17
	Abanico Río Cañaveralejo	19
Sal1	Llanura Aluvial	7
Sft	Flujo Terrón Colorado	2

Tabla 3.3. Número de reportes de Daños en Edificaciones por Unidad Geológica Superficial (UGS según PMZSCali, INGEOMINAS, 2004)

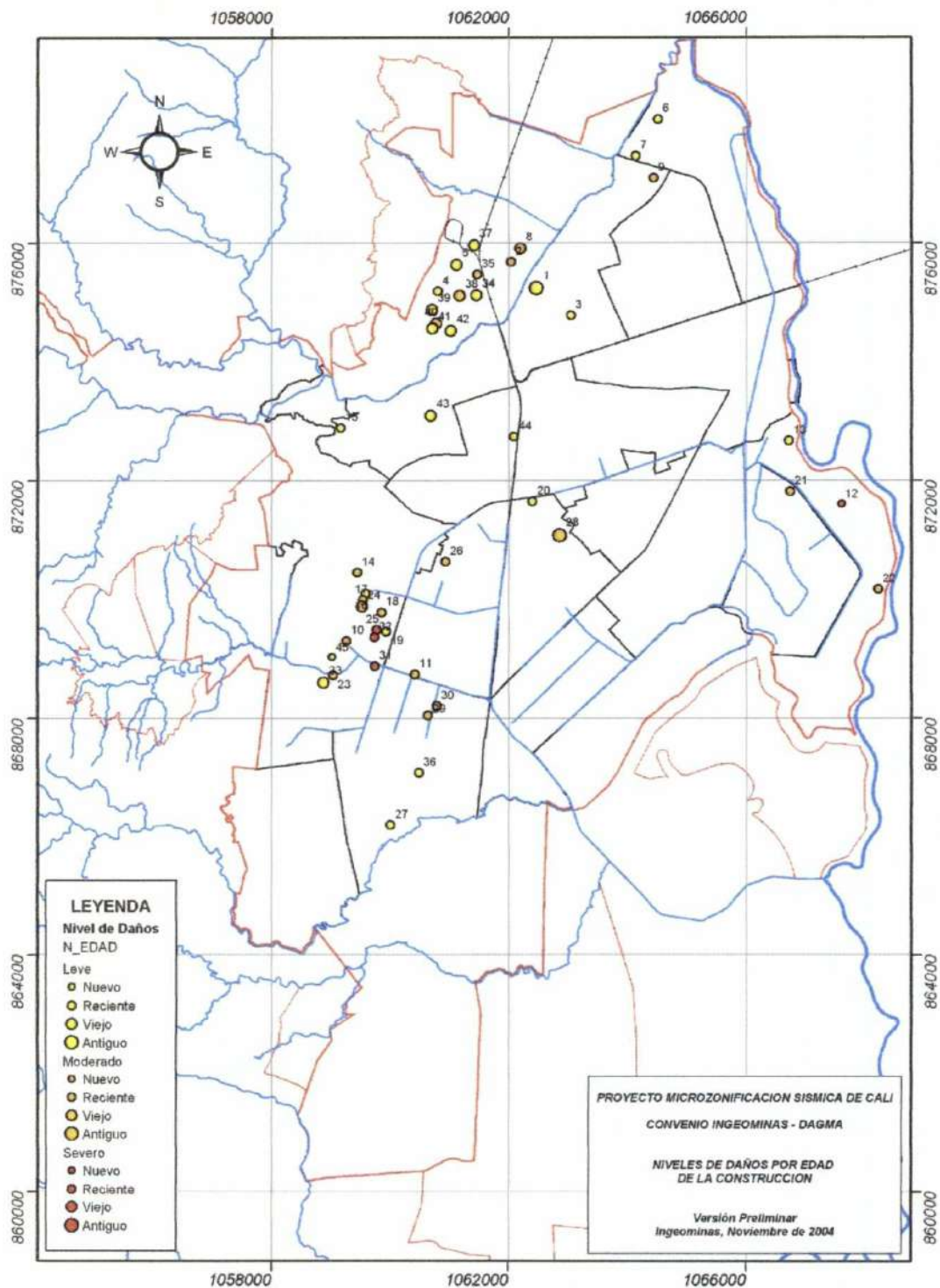


Figura 3.1 Niveles de daño por el Sismo de Pizarro en Cali discriminados por edad de construcción (INGEOMINAS, 2004)

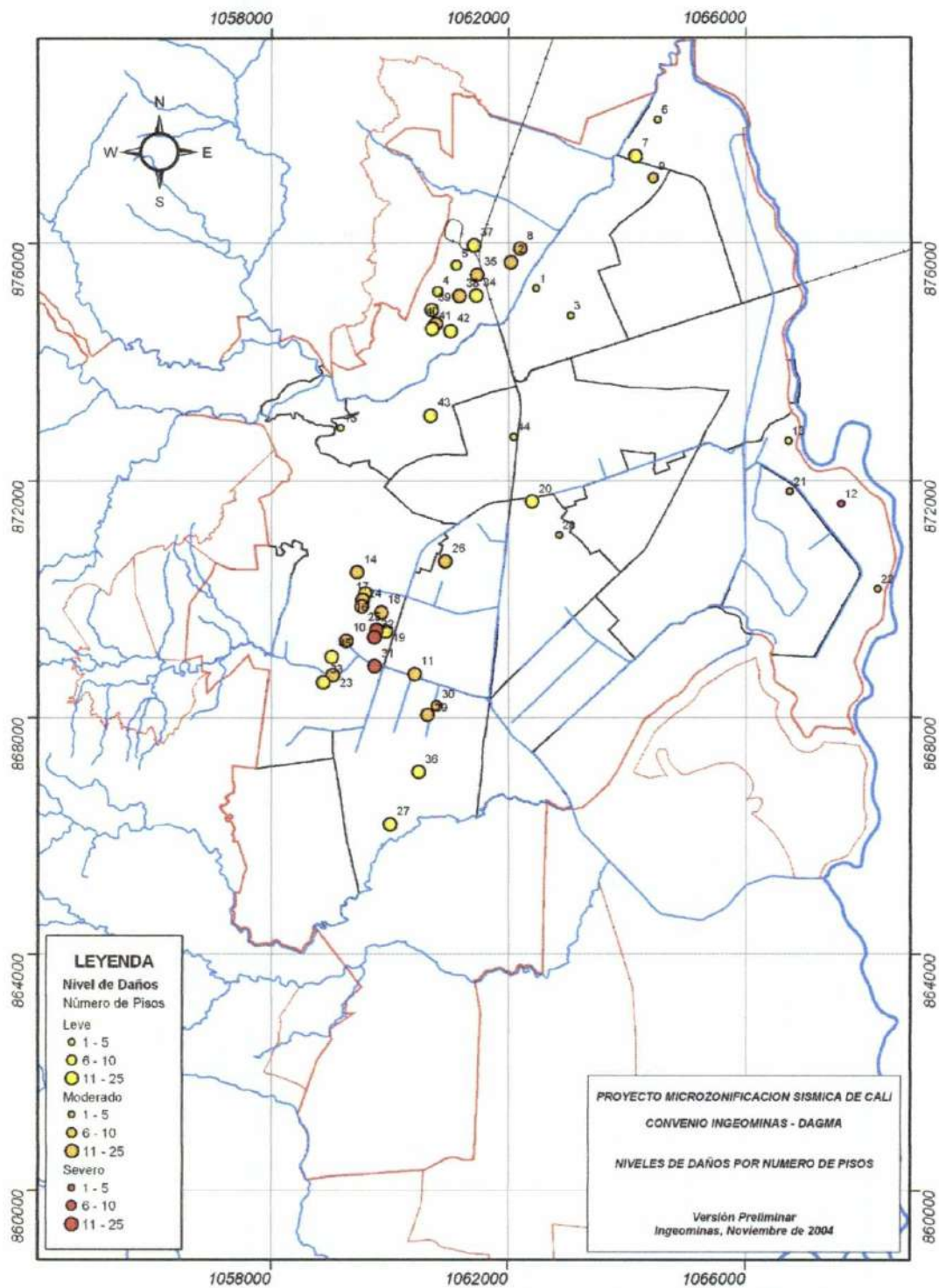


Figura 3.2 Niveles de daño por el Sismo de Pizarro en Cali discriminados por número de pisos de las construcciones (INGEOMINAS, 2004).

Cuaternarios recientes (coluviones y aluviones). La segunda zona, corresponde al Valle aluvial del río Cauca, compuesta por depósitos Cuaternarios recientes, que conforman una zona plana, la cual se extiende hacia el extremo oriental del área de estudio. Esta zona esta cubierta parcialmente por abanicos aluviales sobre los cuales se ubica la mayor parte de la ciudad de Santiago de Cali

Dentro del análisis geológico adelantado en el proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali, se elaboró el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS), las cuales se consideran como formaciones correlativas de los procesos morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre (**Figura 3.3**). En este mapa se clasifican los materiales geológicos como Roca (R), Material Intermedio (I) y Suelos Residual y Transportado (S). En general, los suelos (S) sobre los cuales se emplaza la mayor parte de la ciudad de Cali, se caracterizan por ser finos, de varios metros de espesor en su parte superior (Limos, arcillas y turbas), disminuyendo en cercanías al río Cauca. Subyaciéndolos se encuentran intercalaciones de arenas y gravas que en algunos casos son susceptibles a sufrir licuación.

Como se presenta en la **Figura 3.3**, se observa que los sectores que sufrieron mayores daños se ubican en la unidad de Suelos Transportados (S), correspondiendo a la Llanura Aluvial del Río Cauca (Sal1) y Abanicos Aluviales (Sal2).

3.3.1 Llanura Aluvial del Río Cauca (Sal1)

Esta unidad se localiza al extremo oriental de la zona estudiada y está conformada por depósitos antiguos del río Cauca, dejados a lo largo de la evolución y divagación del cauce, conformando una zona plana dentro de la cual se localiza, entre otros, gran parte del distrito de Agua Blanca y el sector de Navarro.

Sobre el terreno es muy difícil diferenciar la variación entre estos materiales, por ser la zona plana y no observarse afloramientos, ni evidencias de cambios geomorfológicos que permitan hacer una distinción clara.

Con base en los registros estratigráficos de las perforaciones geotécnicas realizadas en este sector para el Proyecto de MZSCali, el depósito está conformado por material limo arcilloso cuyo espesor fluctúa entre 5 y 10 m, suprayaciendo arenas finas de consistencia suelta, que en profundidad aumentan el tamaño de grano hasta gravas finas de compacidad media. En algunas perforaciones, hacia los 50 m de profundidad, se llegó a encontrar estratos de limo verdoso de consistencia muy dura intercalados con material orgánico.

Una descripción más detallada de estos depósitos se presenta en la **Figura 3.4**, que corresponde a la columna estratigráfica levantada en la perforación localizada en la Planta del Acueducto de Puerto Mallarino, la cual alcanzó los 50.6 metros.

3.3.2. Abanicos Aluviales (Sal2)

Se trata de todos los materiales asociados a flujos torrenciales dejados por los principales afluentes del río Cauca al llegar a la planicie aluvial de éste, debido a una pérdida repentina en la capacidad de arrastre de las corrientes, al encontrar una disminución en la pendiente. Estas unidades tienen forma de abanico, cuya parte más distal está conformada por materiales finos y mejor seleccionados que los ubicados hacia el ápice, donde son más gruesos y mal calibrados. Estos depósitos son

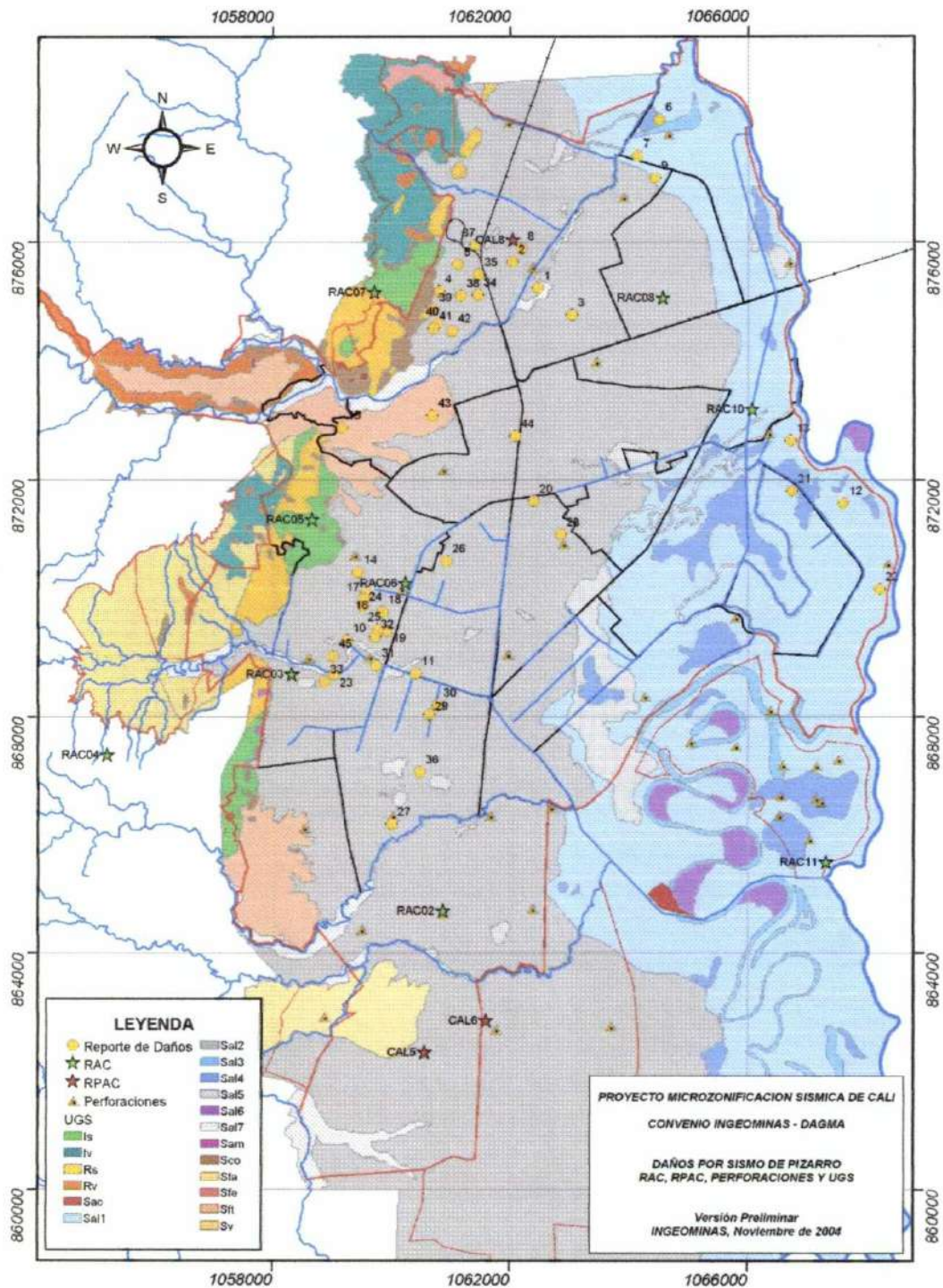


Figura 3.3 Sitios de Daños localizados en el Mapa de Unidades Geológicas Superficiales de Cali (INGEOMINAS, 2004)



medianamente compactos, matriz soportados, se componen principalmente de cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas con presencia esporádica de rocas sedimentarias, de formas angulares a subredondeadas, en matriz areno-arcillosa.

Los abanicos son de tipo coalescente, es decir, presentan contactos laterales interdigitados por su crecimiento conjunto, por lo cual se cartografiaron como una sola unidad con límites aproximados entre ellos, así como el contacto con la llanura aluvial del río Cauca. Los abanicos más importantes observados en la zona de estudio son el de Pance, Cañas Gordas, Meléndez, El Bosque, Menga, Cañaveralejo y Cali; en estos dos últimos se presentaron los mayores daños durante el sismo, por lo cual a continuación se hace una breve descripción general de éstos.

Abanico del Río Cali

Las perforaciones realizadas para el Proyecto de MZSCali muestran la presencia de una capa superficial de arcillas limosas, que en cercanía del río Cali no superan los 5 m de espesor; sin embargo a medida que se aleja del cauce actual, y hacia la parte distal, pueden llegar a tener entre 10 y 15 m. Este estrato suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos de varios metros de espesor, compuesto por grandes cantos y bloques en su mayoría subredondeados, intercalados con capas de arcillas que alcanzan espesores hasta de 10 m en promedio. En algunos sectores, a partir de los 35 m aproximadamente, se encuentran materiales finos que pueden corresponder a depósitos de llanura aluvial.

Un ejemplo de esta secuencia se observa en la **Figura 3.5** que corresponde a una columna estratigráfica levantada en la perforación ubicada en el Vivero Municipal.

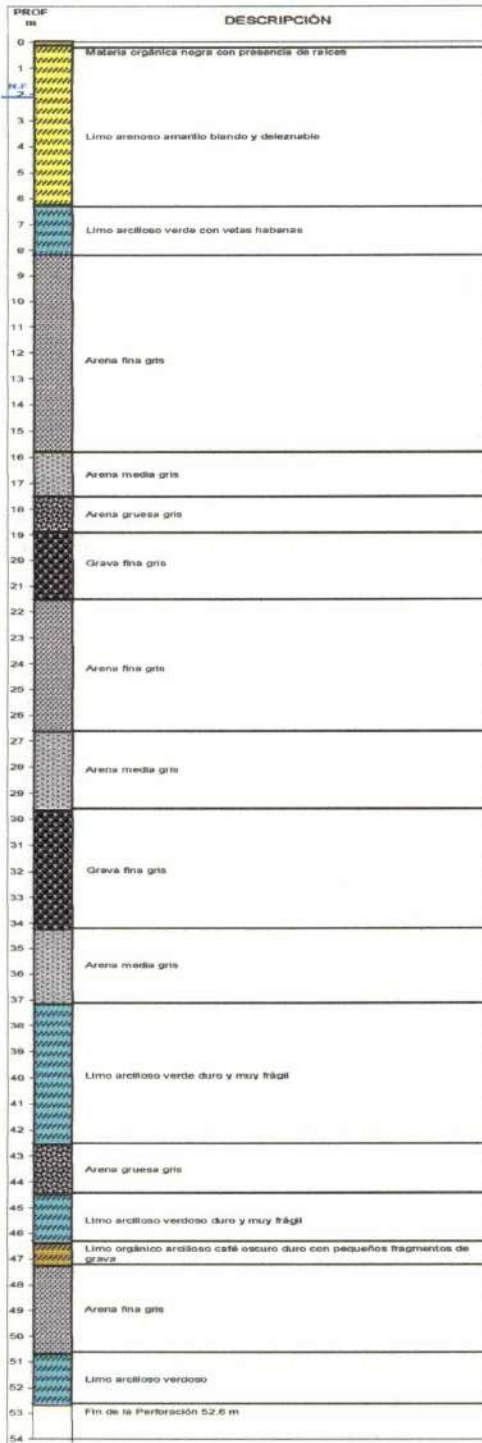
Abanico del Río Cañaveralejo

En este sector se realizó un análisis multitemporal de fotografías aéreas en las que se identificaron paleodrenajes y antiguos sectores de lagunas o humedales actualmente intervenidos debido al desarrollo urbano de la ciudad. (**Figura 3.6**)

Las perforaciones ejecutadas para el Proyecto de MZS Cali en este sector, muestran la presencia predominante de materiales arcillosos y limosos, de varios metros de espesor, con intercalaciones de capas de material orgánico hasta de un metro. Esporádicamente se encuentran lentes de arena fina y algunas gravas, pero en general, el perfil hasta los cien metros de profundidad se caracteriza por la secuencia de varios eventos de sedimentación de materiales finos de consistencia media a blanda, condición que amplifica la señal sísmica tal y como se observó durante la ocurrencia del sismo de acuerdo con la evaluación de los daños y los registros capturados por la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC), los cuales se presentarán más adelante.

Una descripción más detallada de estos depósitos se observa en la **Figura 3.7** que corresponde a la columna estratigráfica levantada en la perforación localizada en las Canchas Panamericanas.

POZO: PLANTA PUERTO MALLARINO



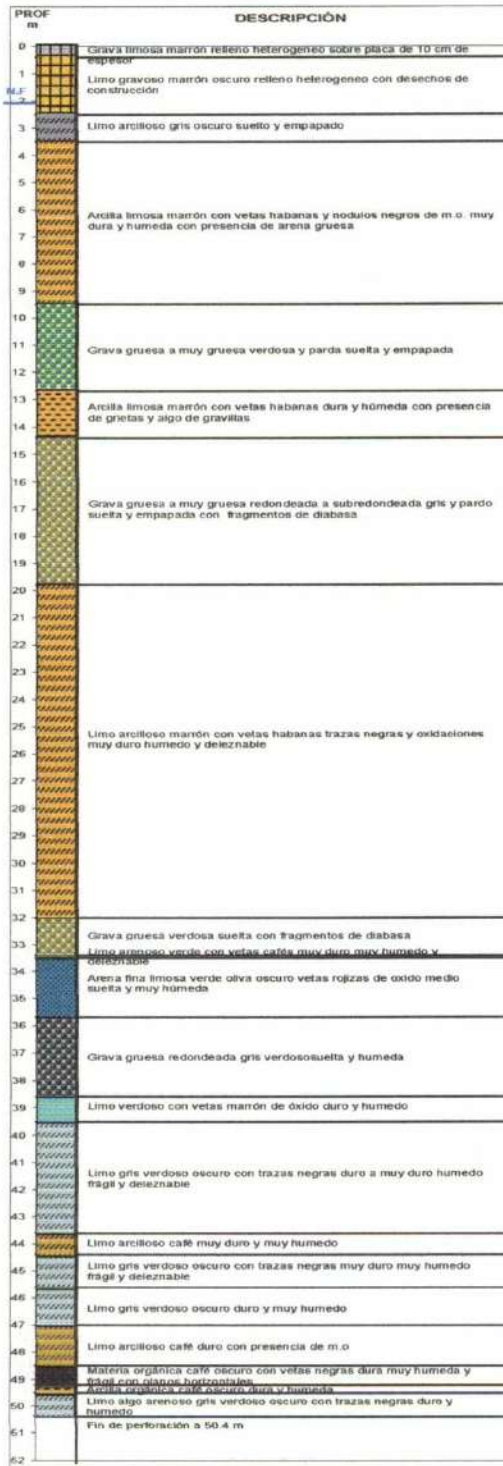
PROYECTO MICROZONIFICACIÓN
SÍSMICA DE CALI

CONVENIO INGEOMINAS - DAGMA

PERFIL ESTRATIGRÁFICO DE LA
PERFORACIÓN
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO
DE PUERTO MALLARINO

Figura 3.4. Columna estratigráfica Puerto Mallarino

POZO: VIVERO MUNICIPAL



PROYECTO MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
DE CALI

CONVENIO INGEOMINAS - DAGMA

PERFIL ESTRATIGRÁFICO DE LA
PERFORACIÓN
EN EL VIVERO MUNICIPAL DE CALI

Figura 3.5. Columna estratigráfica Vivero Municipal

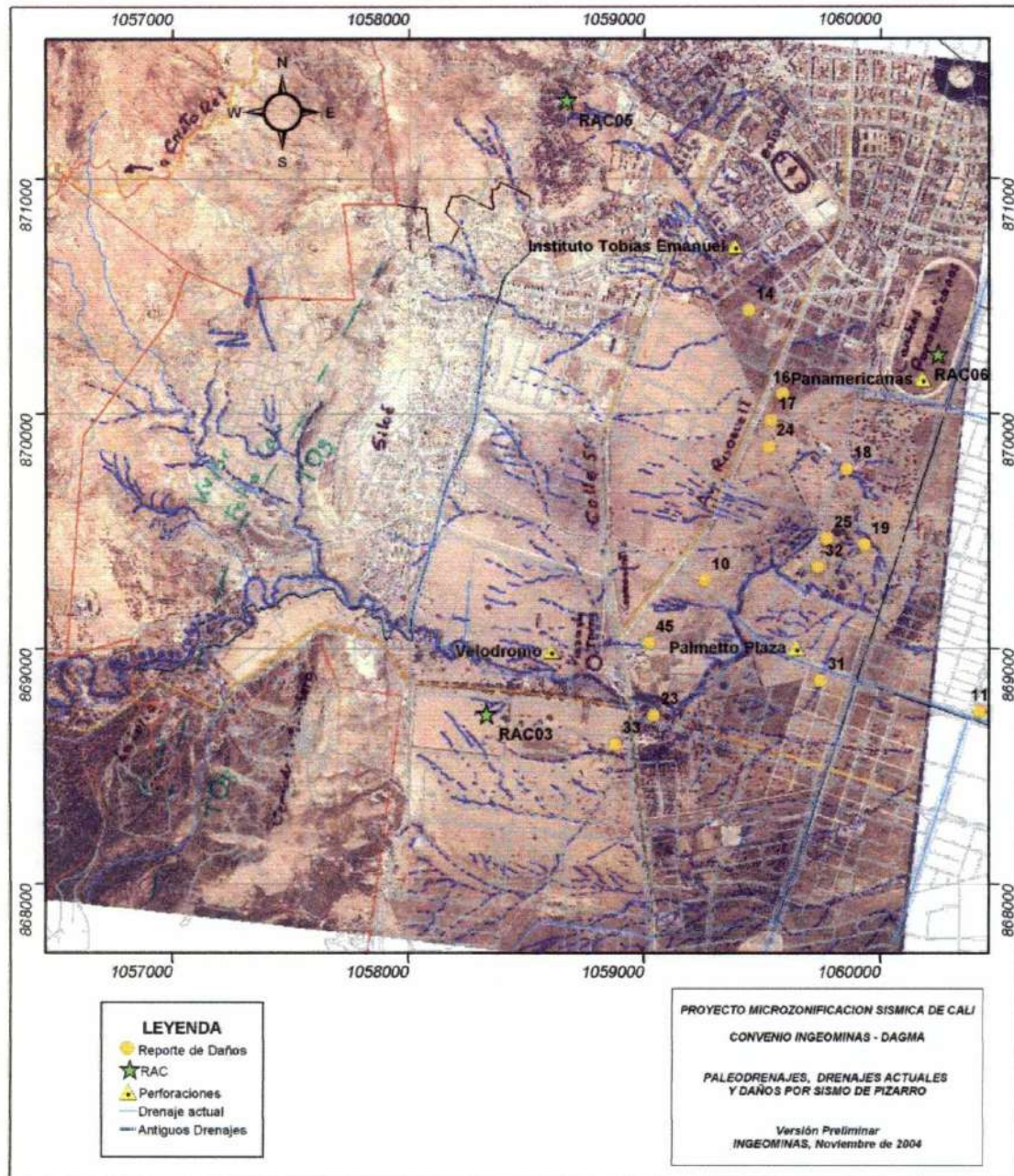


Figura 3.6. Mapa Imagen del área de mayor afectación, obsérvese antiguos paleocanales y antiguos sectores de humedales, dirección actual del Río Cañavalejo y la ubicación de los sitios de afectación por el Sismo de Pizarro. (Foto Aérea No.45, Vuelo R-373, Esc. Aprox. 1:20.000, 1957 suministrada por la CVC).



Figura 3.7. Columna estratigráficas Canchas Panamericanas

4. MOVIMIENTO FUERTE EN CALI ASOCIADO AL SISMO DE PIZARRO

A continuación se hace una presentación y análisis preliminar de los datos acelerográficos registrados en la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC, Convenio INGEOMINAS – DAGMA) y la Red Portátil de Acelerógrafos de Cali (RPAC, instalada temporalmente en el PMZSCali), para el sismo de Pizarro ocurrido el pasado 15 de noviembre. Además se presentan los espectros de respuesta con 5% de amortiguamiento; finalmente se aborda de manera preliminar el problema de la respuesta sísmica de los suelos de Cali.

La RAC esta conformada por 12 estaciones digitales con equipos ETNA de Kinometrics, equipados con sensores (EPISENSOR) de balance de fuerzas (FBA) que permiten registrar aceleraciones en el terreno de hasta dos (2) veces la aceleración de la gravedad (G) en las tres (3) componentes del movimiento. Información detallada de los acelerógrafos se puede encontrar en la página web: www.kinometrics.com. La RPAC cuenta con tres (3) instrumentos Kinometrics modelo ETNA de características similares.

En la actualidad la RAC está distribuida en el área urbana de Cali sobre los distintos tipos de suelos, sin embargo las proyecciones de la RAC son de 25 estaciones para la ciudad. En la actualidad se cuenta con 12 instrumentos y se espera en un futuro próximo instalar las 13 estaciones restantes que se prevén para la RAC. El sismo de Pizarro fue registrado en 9 de las 12 estaciones, las 3 estaciones restantes no registraron el evento por problemas en el suministro eléctrico. INGEOMINAS como parte del PMZSCali desde mediados del 2003 había instalado una red portátil de tres (3) acelerógrafos en la ciudad. Estos equipos lograron registrar el evento, y esta información complementa la registrada por la RAC, así, en total se cuenta con 12 registros para el área urbana de la ciudad de Cali (Figura 4.1).

4.1 REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

La información registrada por los acelerógrafos debe ser procesada antes de ser utilizada en cualquier tipo de análisis. El procesamiento consiste en corregirlos por línea base y respuesta instrumental, con el fin de obtener la aceleración del terreno. La Tabla 1 describe las características más importantes de los registros obtenidos luego del procesamiento, para cada una de las estaciones acelerográficas. Es de anotar que las aceleraciones más altas se registraron en la estación de Canchas Panamericanas con 108.5 cm/seg^2 , y las estaciones de Puerto Mallarino, Navarro y Seminario Teológico con aceleraciones superiores a los 60 cm/seg^2 . Las estaciones Canchas Panamericanas y Seminario Teológico están ubicadas sobre el abanico aluvial de Cañaveralejo, donde se identificaron estratos de arcillas saturadas con espesores que superan los 20 m (ver numeral 3.2). Las estaciones de Puerto Mallarino y Navarro, están localizadas sobre los depósitos aluviales del río Cauca (ver numeral 3.2).

Las formas de ondas de todos los registros obtenidos en Cali se encuentran en la página web de INGEOMINAS (www.ingeominas.gov.co) y pueden ser descargados directamente.

La Figura 4.2, presenta la distribución de isoaceleraciones para la ciudad, observándose claramente que las zonas de las laderas occidentales y el sur de la ciudad experimentaron aceleraciones inferiores a los 40 cm/seg^2 , y las aceleraciones más elevadas coinciden con las zonas del abanico de Cañaveralejo y los depósitos aluviales del río Cauca en su parte central. Es importante mencionar que para la estimación de la distribución de las aceleraciones, además de los datos registrados en las

estaciones de acelerógrafos, se tuvieron en cuenta la información geológica y geotécnica obtenida a la fecha por el PMZSCali.

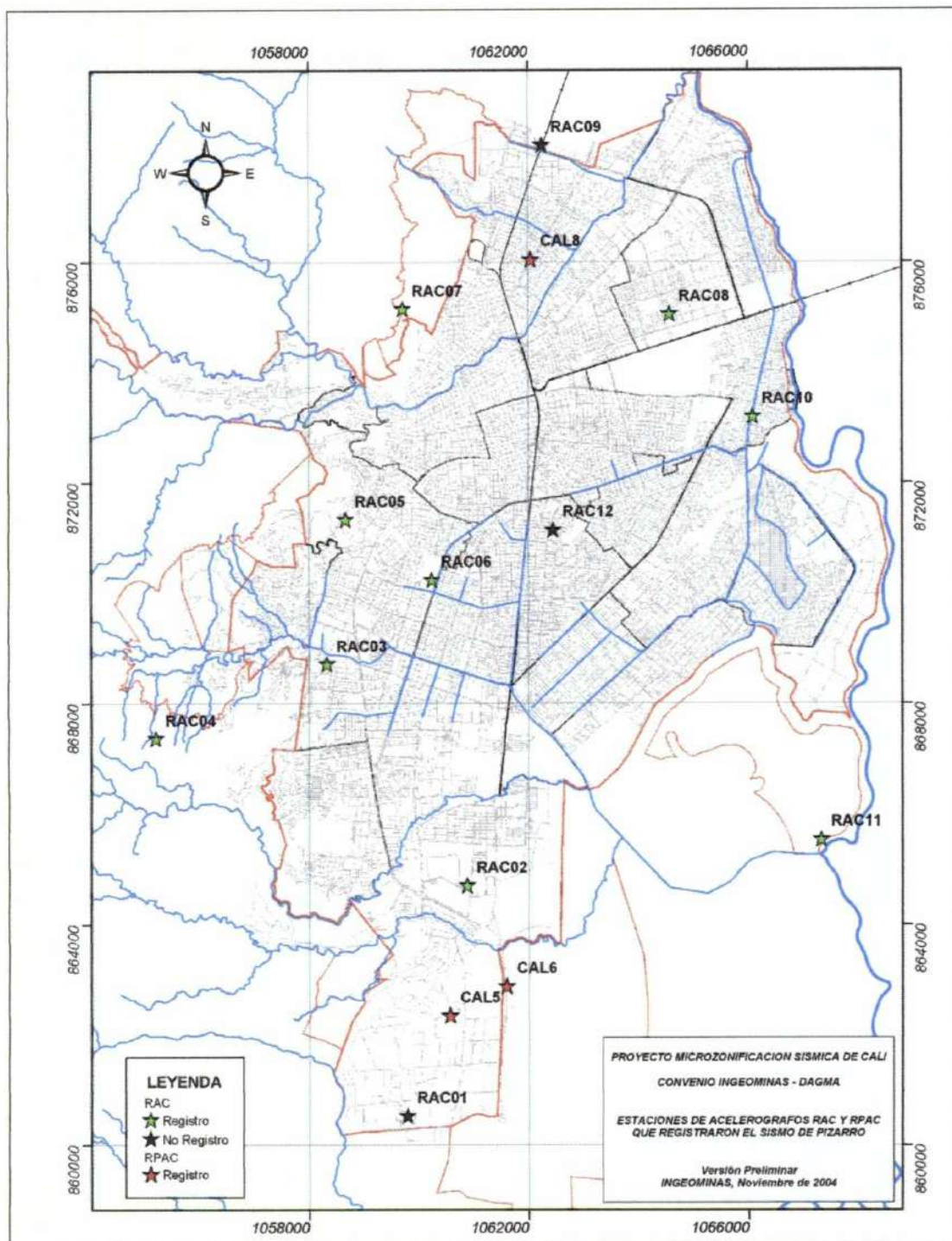


Figura 4. 1. Distribución de las estaciones de acelerógrafos ubicadas en la ciudad de Cali que registraron el sismo de Pizarro. Las estrellas amarillas corresponden a las estaciones de la RAC (Convenio INGEOMINAS-DAGMA) y las estrellas rojas corresponden a las estaciones de la RPAC instalada por el INGEOMINAS.

Estación	Código de la estación	Longitud	Latitud	Periodo predominante (seg)	PGA (cm/s ²)
Planta La Reforma	RAC04	-76,5806	3,3967	0,3	24,7
Universidad Autónoma	CAL7	-76,5233	3,3561	0,8	19,3
Universidad Javeriana	CAL8	-76,5326	3,3512	0,5	17,9
Vivero del Norte DAGMA	CAL5	-76,5192	3,4751	1,7	54,6
INGEOMINAS - Cali	RAC02	-76,5298	3,3727	1,0	50,5
Seminario Teológico Bautista	RAC03	-76,5527	3,4089	1,2	61,5
Hospital Universitario	RAC05	-76,5496	3,4325	1,0	38,3
Cachas Panamericanas	RAC06	-76,5355	3,4227	1,5	108,5
Ecoparque Bataclán	RAC07	-76,5402	3,4671	0,3	39,5
Tránsito Salomía	RAC08	-76,4965	3,4662	2,0	46,5
Planta Puerto Mallarino	RAC10	-76,4830	3,4493	2,0	67,5
Navarro	RAC11	-76,4719	3,3802	2,0	63,4

Tabla 4.1. Estaciones que registraron el evento, periodo predominante y aceleración pico del terreno, PGA (Convenio INGEOMINAS – DAGMA).

4.2 RESPUESTA SÍSMICA

Con el objeto de analizar la respuesta sísmica de los suelos de Cali durante el evento sísmico de Pizarro, se calcularon los espectros de respuesta de los acelerogramas corregidos para un amortiguamiento del 5%, (**Figura 4.3**). En ésta figura se nota que las estaciones instaladas sobre las laderas occidentales de la ciudad, tales como: Ecoparque Bataclán, Hospital Universitario y Planta La Reforma, muestran la mayor parte de la energía en periodos cortos (inferiores a 1.0 seg.), y esta misma situación se presenta para las estaciones al sur cercanas al sector de Pance, tales como: Universidad Javeriana y Universidad Autónoma, donde es conocida la presencia de suelos rígidos. Por otra parte, las estaciones de Canchas Panamericanas, Puerto Mallarino, Navarro y Seminario Teológico, son las que muestran mayores amplitudes. Los picos de aceleración para periodos largos (mayores a 1.0 seg.) se observan para las estaciones de Canchas Panamericanas y Seminario Teológico, que están en la zona del abanico de Cañaveralejo, y la presencia de periodos cortos en las estaciones de Puerto Mallarino y Navarro, localizadas en los depósitos aluviales del río Cauca. Las estaciones Vivero del Norte y Salomía, presentan una situación intermedia con respecto a las otras estaciones en cuanto a las amplitudes pico, y a la presencia de periodos largos y cortos.

La **Tabla 4.2** presenta las aceleraciones espectrales máximas para cinco diferentes rangos de periodos. El primer rango corresponde a periodos de 0.1 a 0.5 seg, el cual es importante para analizar la respuesta sísmica de edificaciones entre 2 y 4 pisos, aproximadamente. El segundo rango es de periodos entre 0.5 y 1.0 seg, este es importante para analizar la respuesta sísmica de edificaciones de 5 a 9 pisos de altura. El tercer rango es para periodos entre 1.0 y 1.5 seg, este rango es para edificaciones entre 10 y 14 pisos, aproximadamente. El cuarto rango es para periodos entre 1.5 y 2.0 seg, el cual incluye edificaciones entre 15 y 19 pisos. El quinto rango es para periodos mayores a 2.0 seg., incluyendo edificaciones con más de 20 pisos de altura.

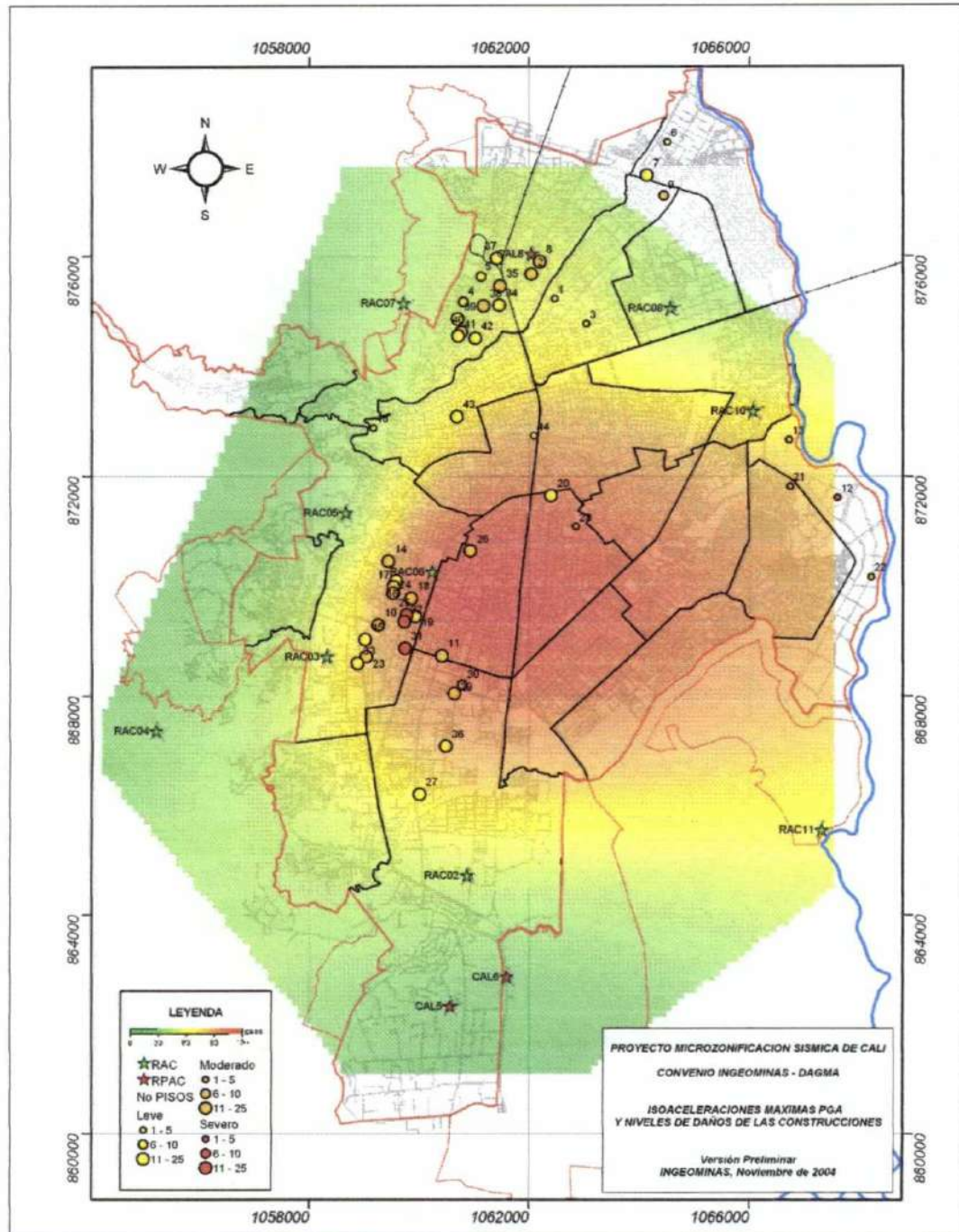


Figura 4.2. Isoaceleraciones máximas (PGA) registradas en la ciudad. Las estrellas muestran la ubicación de las estaciones que registraron el evento.

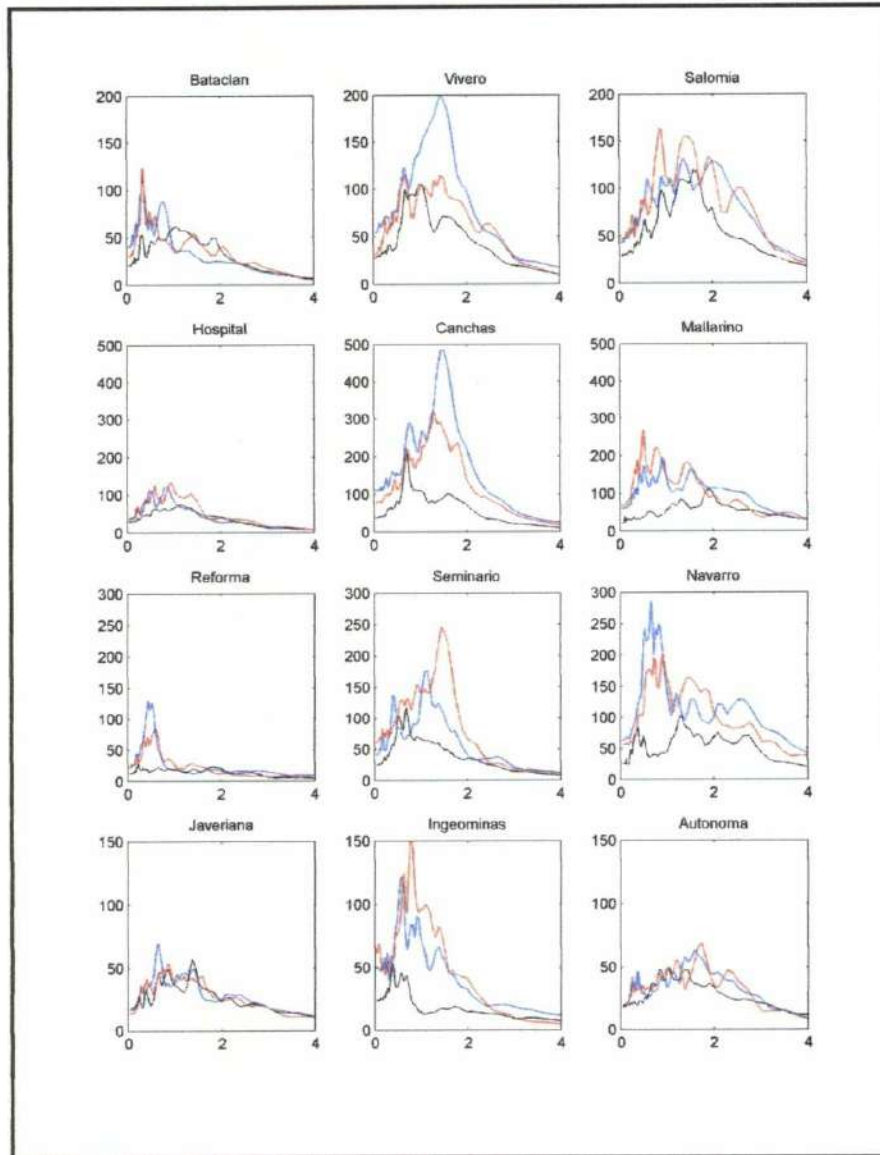


Figura 4.3. Espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento para las estaciones de la RAC y RPAC (Convenio INGEOMINAS – DAGMA). La abscisa corresponde a Periodo en segundos y la ordenada corresponde a Aceleración Espectral en cm/seg^2 . Los registros están divididos en cuatro (4) grupos de tres (3) estaciones cada uno, cada grupo mantiene una misma escala con el fin de facilitar las comparaciones entre ellos. La línea roja es para la componente Norte-Sur, la línea azul es para la componente Este-Oeste, y la negra para la componente vertical del movimiento.

Los resultados presentados en la **Tabla 4.2** son más fáciles de visualizar en las Figuras 4 a 8, donde se presentan las aceleraciones espectrales para los diferentes rangos de periodos, respectivamente. Entre estas figuras se destaca el mapa de la **Figura 4.4** (periodos propios de edificaciones pequeñas con menos de 4 pisos) donde los niveles más altos de aceleración se presentaron en la zona aledaña al río Cauca. La **Figura 4.5** (periodos propios de edificaciones con alturas intermedias entre 5 y 9 pisos) muestra que las intensidades del sismo fueron mayores en las zonas de Cañaveralejo y el río Cauca. Las **Figuras 4.6, 4.7 y 4.8** (periodos propios de edificaciones con más de 10 pisos) muestran que el sector de Cañaveralejo es el más crítico, abarcando también sectores aledaños al río Cali. Con el fin de comparar los anteriores resultados con los reportes de daños e intensidades que se realizaron en la ciudad, en todas las figuras mencionadas anteriormente se ubican las edificaciones y viviendas afectadas (**Tabla 3.1**) de acuerdo al nivel de daño y número de pisos, observándose que las zonas de las laderas occidentales y el extremo sur de la ciudad son las menos afectadas por el sismo. Además, los daños de niveles severos a moderados se presentaron en el sector de Cañaveralejo en edificaciones con más de 10 pisos; lo mismo para sectores del abanico del río Cali, pero con niveles de daño moderados a leves.

4.3 AMPLIFICACIÓN RESPECTO A LA ROCA

La Figura 9 presenta los espectros de amplificación de las estaciones de la RAC tomando como referencia la estación de La Reforma. En estudios anteriores se había considerado la estación Ecoparque Bataclán como estación de referencia por encontrarse en roca, pero para este sismo en particular las aceleraciones registradas en la estación La Reforma fueron inferiores, a pesar de encontrarse en suelo firme. Es probable que esto se deba a efectos locales en la estación Bataclán, inducidos por algún estrato de suelo sobre la roca. En la **Figura 4.9** se muestra que la mayor parte de las estaciones tienen amplificaciones que superan ampliamente un factor promedio de 5, solo las estaciones ubicadas sobre las laderas, en la parte más sur de la ciudad y hacia el sector de Pance, las amplificaciones son menores alcanzando niveles promedios de hasta 3 veces.

Con el objeto de tener una idea más clara sobre la respuesta lineal o no-lineal de los suelos durante el sismo, se calcularon las funciones de transferencia para los momentos antes, durante y después de la fase intensa del evento en la estación de Canchas Panamericanas, los resultados se presentan en la **Figura 4.10**, y muestran que el comportamiento de los suelos fue lineal, ya que las funciones de transferencia son muy parecidas entre sí, y que el suelo respondió de igual manera para el caso de bajas deformaciones (antes y después de la fase intensa) y en el caso de más altas deformaciones (durante la fase intensa). Teniendo como referencia que los suelos se comportaron linealmente durante el evento y usando los espectros de amplificación presentados en la **Figura 4.9**, se determinaron los periodos predominantes de vibración para cada una de las estaciones. Estos periodos se presentan en la **Tabla 4.1**, y la **Figura 4.11**. Los resultados muestran que los suelos de la parte occidental de la ciudad tienden a amplificar los periodos cortos (< 1.0 seg.), mientras que los suelos de la parte central y oriental de la ciudad los periodos de vibración largos (> 1.0 seg.). Esto es de especial importancia teniendo en consideración que la norma sismorresistente vigente para la ciudad de Cali es la NSR98, la cual es una norma general de construcción para todo el país, y bien es conocido que dicha norma incluye espectros de diseño que alcanzan como máximo periodos dominantes de suelos de hasta 1.0 seg. (tipo S4), y los resultados presentados aquí, los cuales están basados en registros reales, muestran que la respuesta sísmica está dominada por periodos precisamente más largos de 1.0 seg.

Estación	Acc max 0.1<T<0.5 (cm/s ²)	Acc max 0.5<T<1.0 (cm/s ²)	Acc max 1.0<T<1.5 (cm/s ²)	Acc max 1.5<T<2.0 (cm/s ²)	Acc max 2.0<T<2.5 (cm/s ²)
Planta La Reforma	129.7	125.9	28.7	23.8	17.0
Universidad Autónoma	46.9	49.7	58.2	69.2	47.4
Universidad Javeriana	41.4	69.6	57.2	44.0	29.1
Vivero del Norte DAGMA	77.9	138.6	200.7	185.9	72.4
Ingeominas Cali	92.8	152.5	100.3	47.9	30.6
Seminario Teológico Bautista	137.9	154.9	246.1	220.7	59.1
Hospital Universitario	114.1	133.0	104.2	64.0	37.4
Canchas Panamericanas	161.8	290.6	485.9	450.6	155.7
Ecoparque Bataclán	123.6	87.8	61.4	50.0	33.8
Tránsito Salomía	87.3	164.1	155.6	149.5	122.3
Planta Puerto Mallarino	269.6	262.2	182.0	160.8	112.4
Navarro	221.4	285.4	164.5	157.8	128.4

Tabla 4.2. Aceleraciones espectrales máximas para diferentes rangos de periodos (RAC, RPAC, Convenio INGEOMINAS – DAGMA).

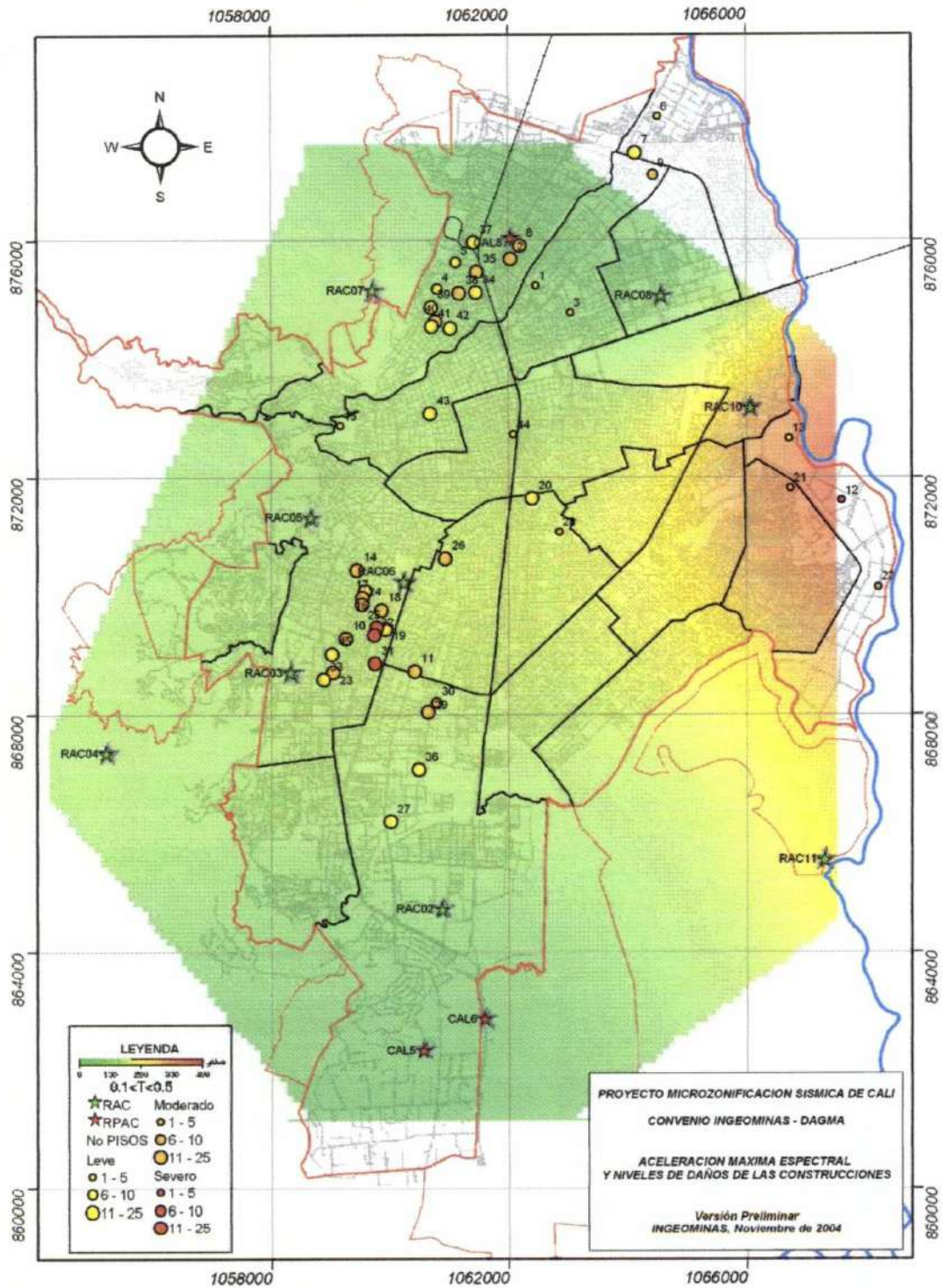


Figura 4.4 Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($0.1 < T(\text{seg}) < 0.5$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.

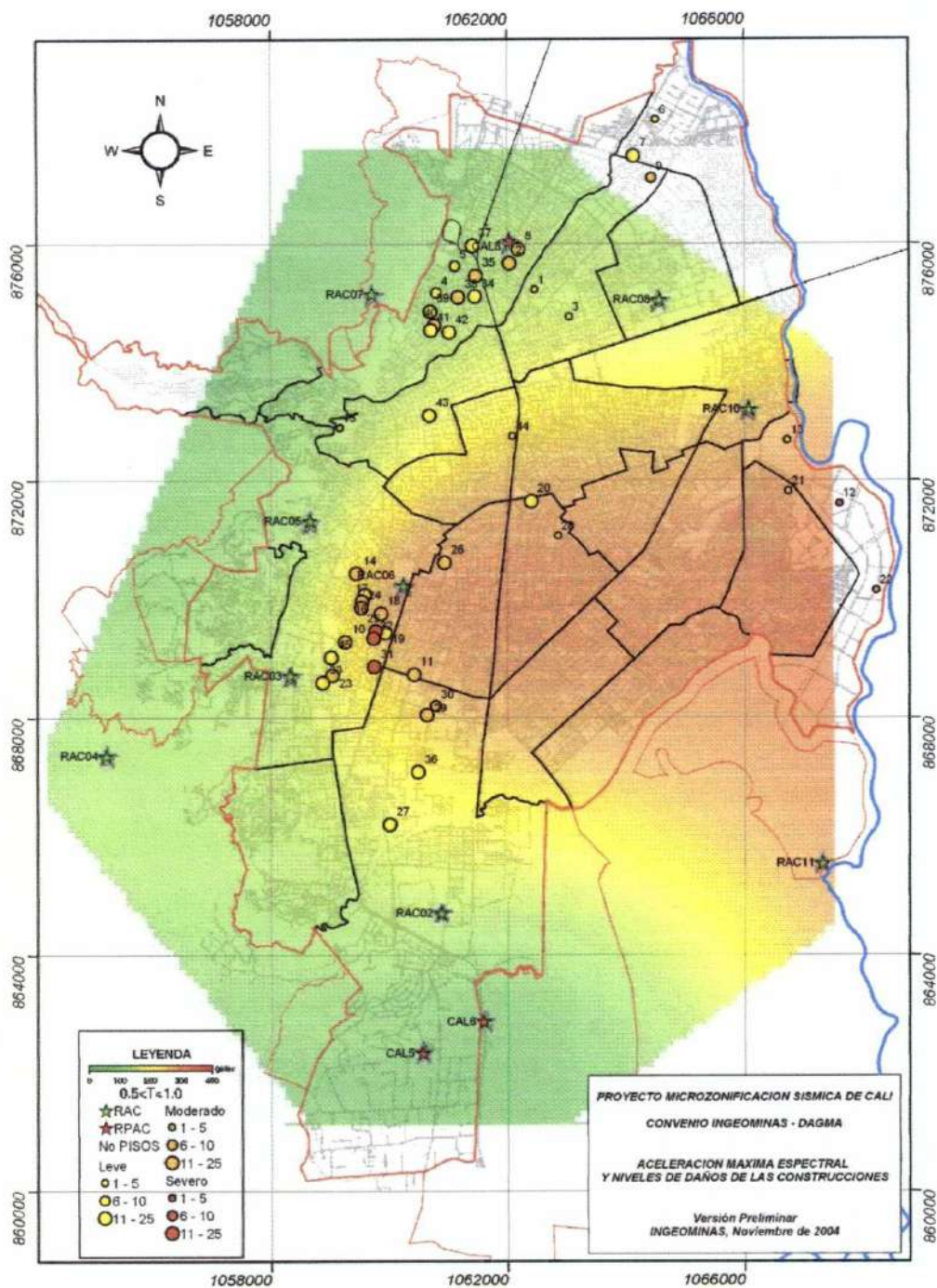
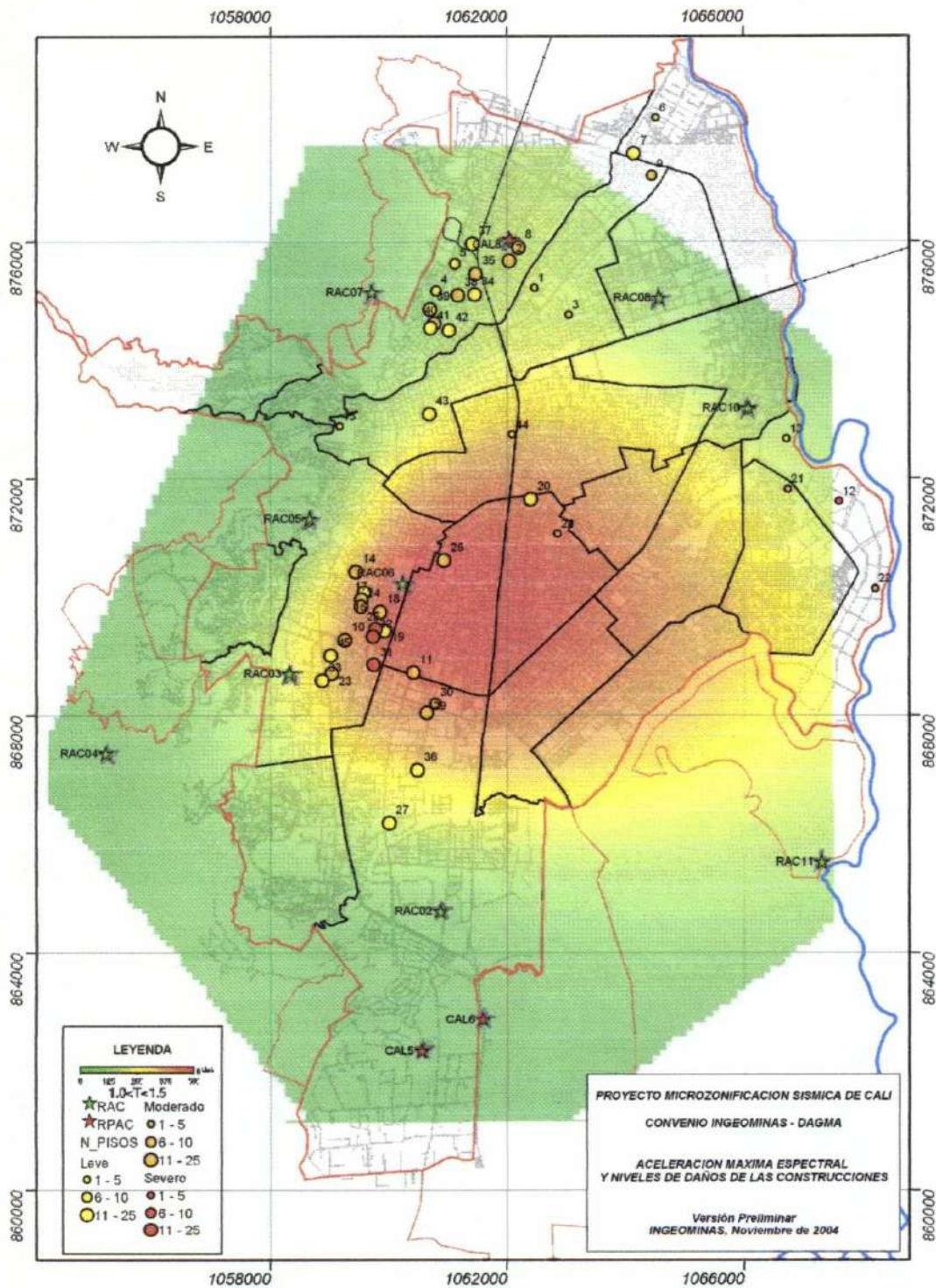


Figura 4.5 Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($0.5 < T(\text{seg}) < 1.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.



Figuras 4.6. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($1.0 < T(\text{seg}) < 1.5$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.

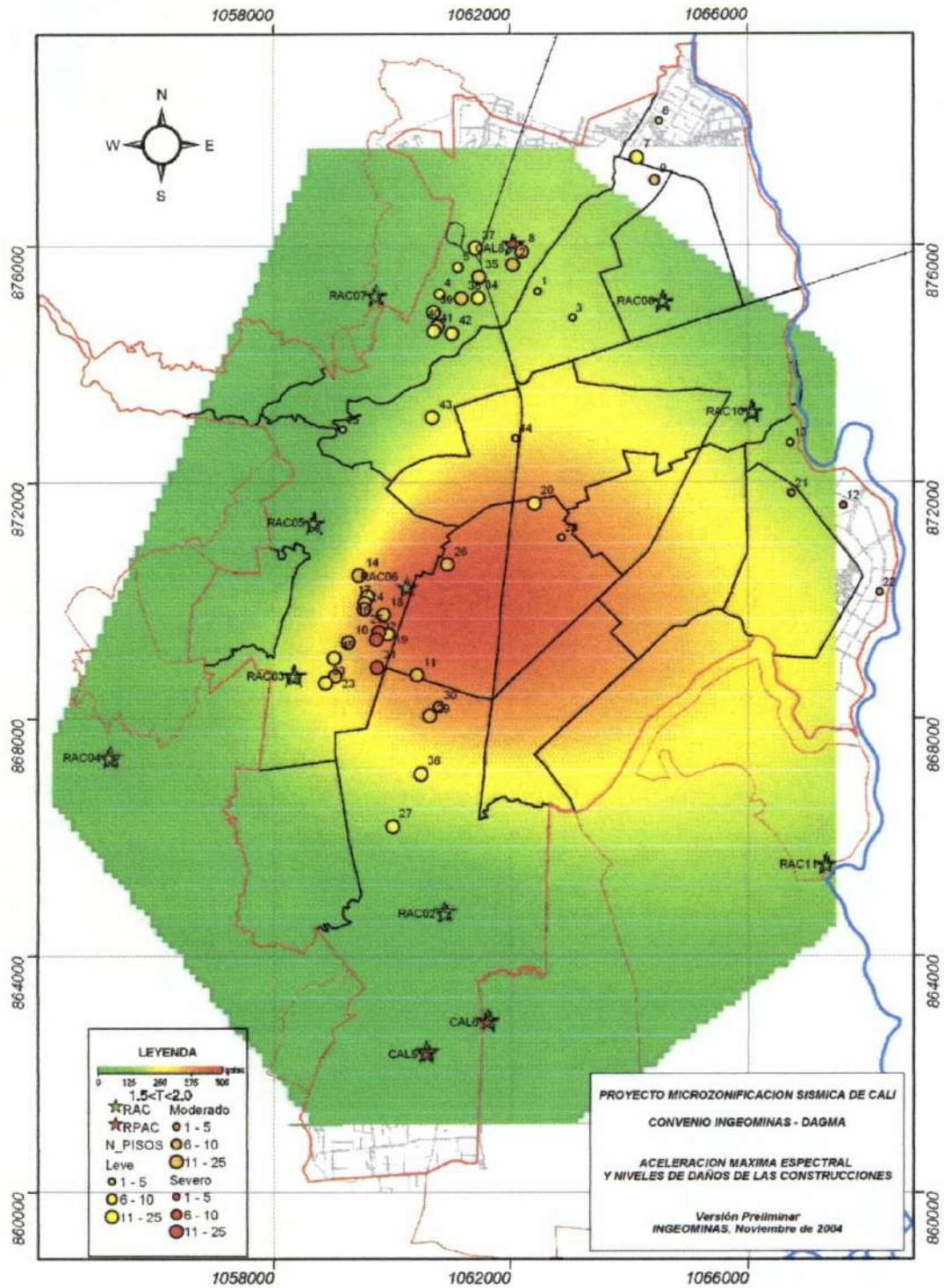


Figura 4.7. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($1.5 < T(\text{seg}) < 2.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.

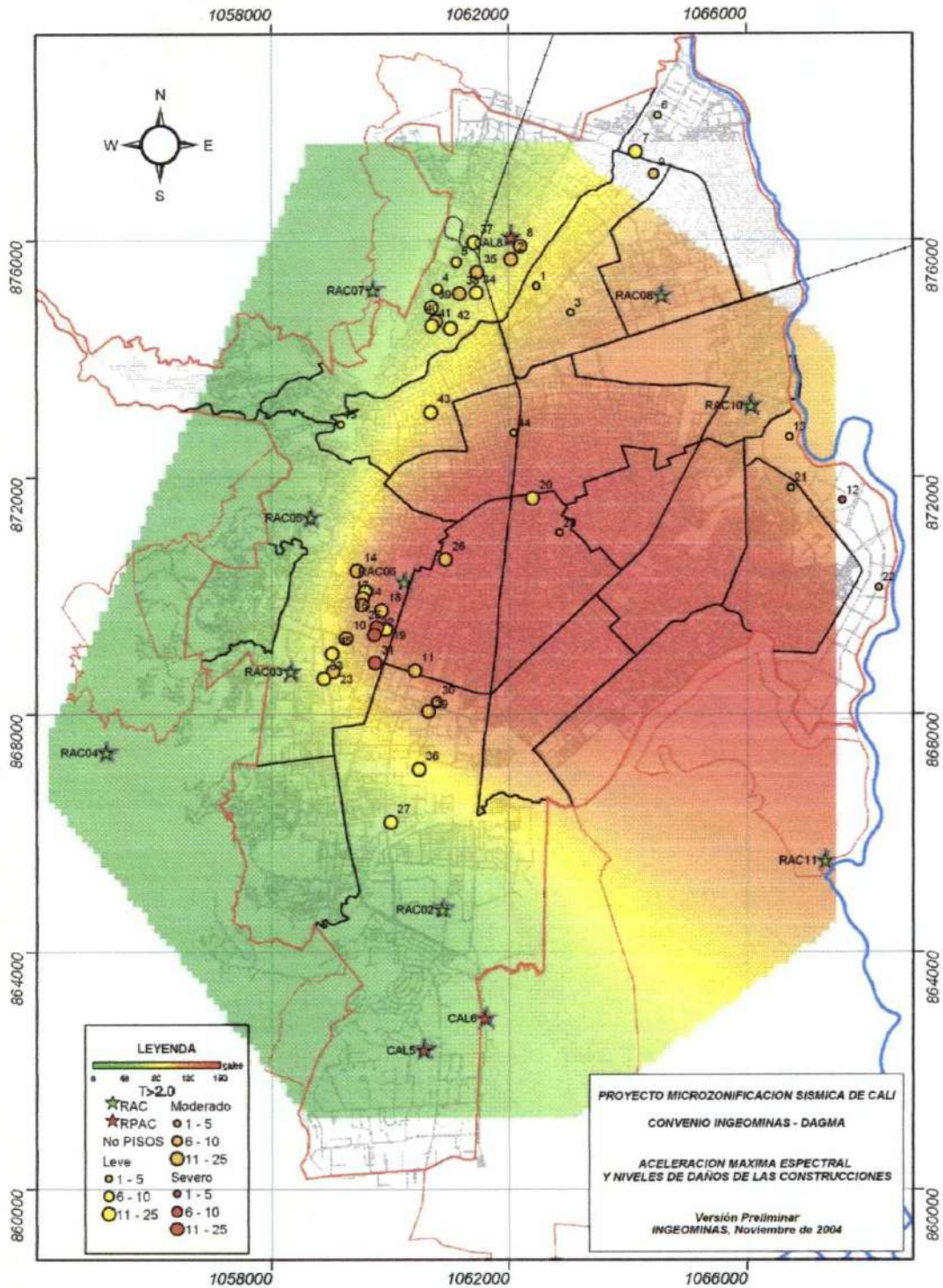


Figura 4.8. Mapa de aceleraciones espectrales máximas ($T(\text{seg}) > 2.0$) del Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran las estaciones que registraron el evento (INGEOMINAS, 2004). Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.

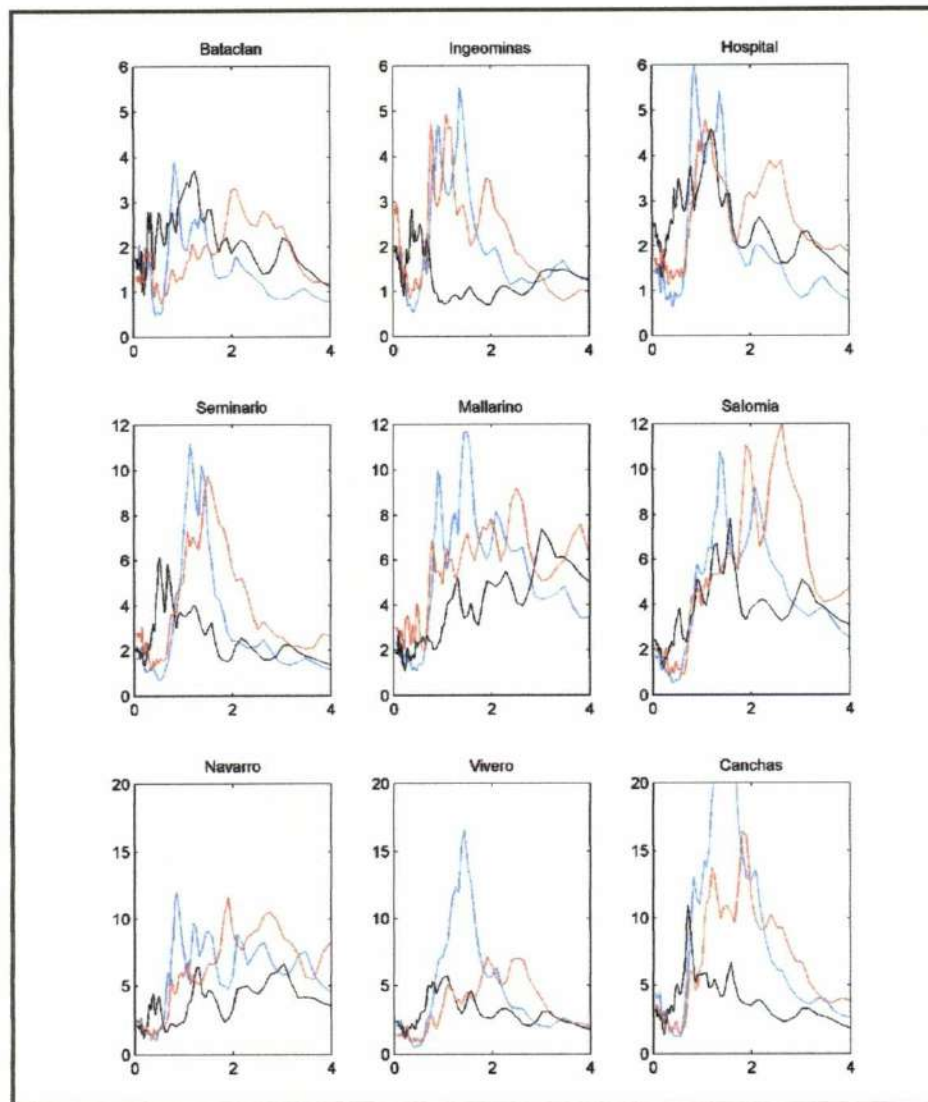


Figura 4.9. Espectros de amplificación para las estaciones de la RAC tomando como referencia la estación de la Planta La Reforma. La abscisa corresponde a Periodo en segundos y la ordenada corresponde a Aceleración Espectral en cm/seg^2 . Las líneas azules son para la componente E-W, la línea roja para la componente N-S, y las líneas negras para la vertical.

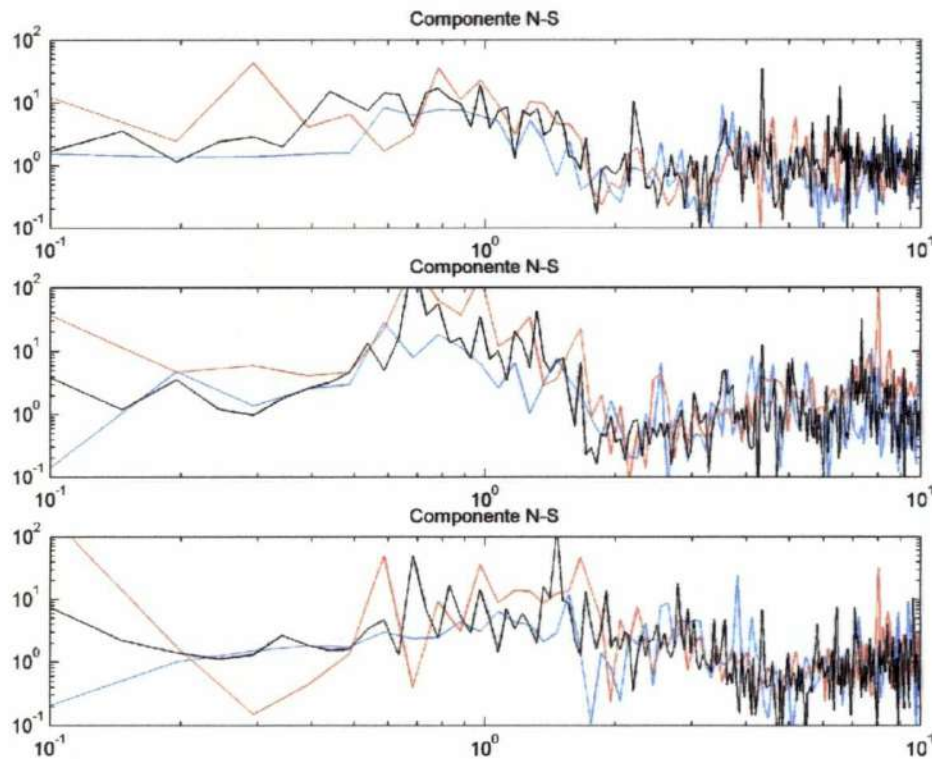


Figura 4.10. Funciones de transferencia para la estación de Canchas Panamericanas, considerando la estación de la Planta La Reforma como referencia, en las tres componentes del movimiento. La línea azul es para la fase débil, previa de la fase intensa del sismo, la línea negra corresponde a la fase intensa del sismo, y la línea roja es posterior de la fase intensa del sismo.

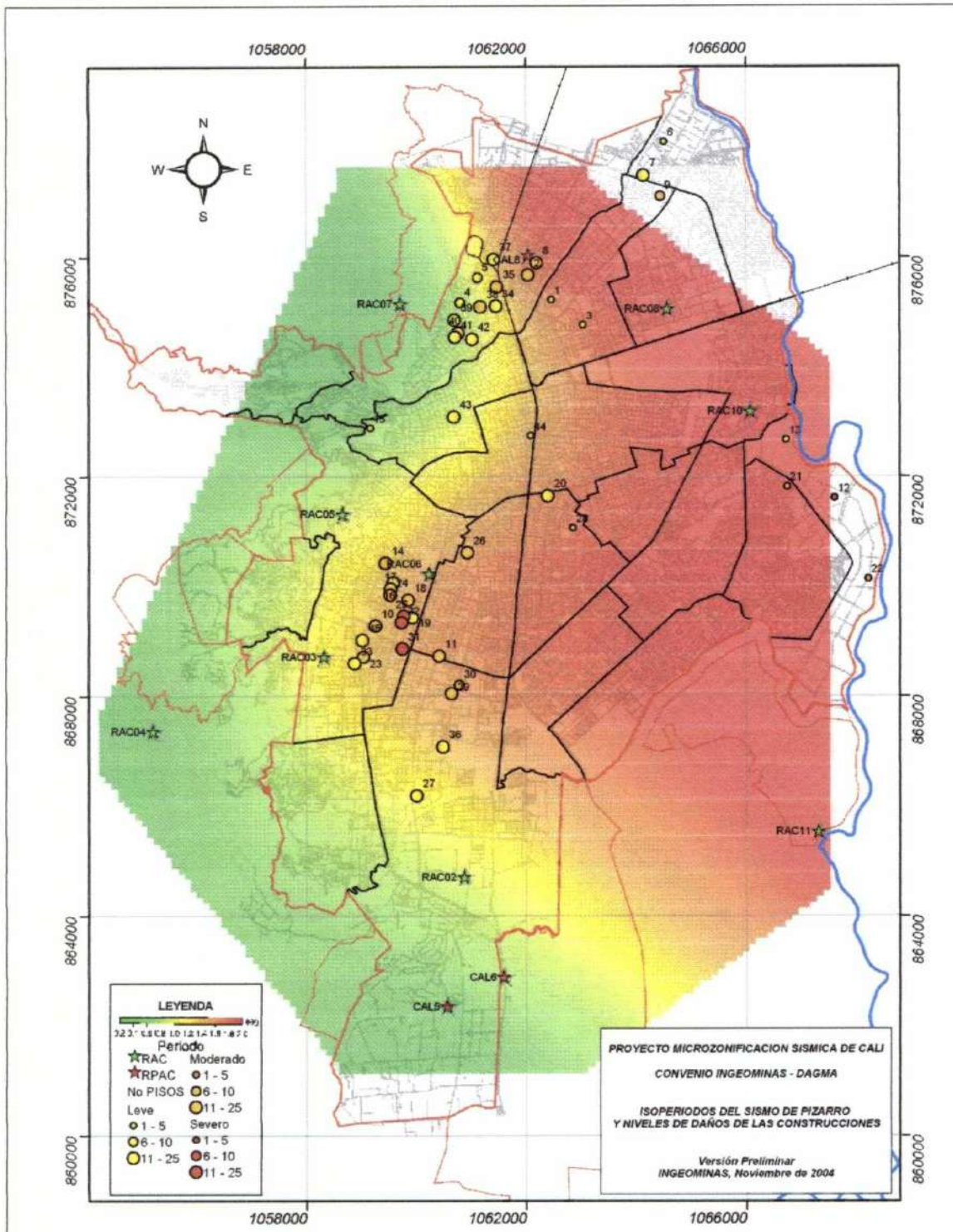


Figura 4.11. Mapa de Isoperiodos para Cali por el Sismo de Pizarro. Las estrellas muestran la ubicación de las estaciones que registraron el evento. Obsérvese la ubicación de los daños en edificaciones y viviendas según su número de pisos.

5. CONCLUSIONES

- El lunes 15 de noviembre de 2004, a las 04:06 hora local, 12 estaciones de la RSNC registraron un evento sísmico. El epicentro se localizó en el Océano Pacífico, frente a las costas del departamento del Chocó, 50 km al suroeste del municipio de Bajo Baudó, en las coordenadas 4.81° N y 77.79° W, profundidad superficial y magnitud local 6.7 (magnitud Richter, calculada a partir de la amplitud máxima del registro).
- La información presentada en este informe se considera una herramienta adicional para las diferentes investigaciones que actualmente se adelantan en el marco del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali (Convenio INGEOMINAS-DAGMA), la vulnerabilidad de las edificaciones y el comportamiento de la comunidad, entre otros aspectos.
- La diferencia en la magnitud reportada por las instituciones nacionales (6.7) y las internacionales (7.1), se explica en el uso de diversas escalas existentes para expresar este parámetro a partir del uso de diferentes fases y tipos de registro de la señal sísmica.
- La sismicidad asociada al proceso de subducción en el occidente de Colombia se identifica, costa afuera, por una doble banda de sismicidad superficial (< 60 km) entre 2° y 6° de latitud paralela a la costa, que marca la zona de subducción. Bajo las cordilleras Occidental y Central se identifica un área de sismicidad intermedia a profunda (60 – 210 km), que marca la zona de Benioff, a la cual se asoció la ocurrencia del sismo de Pizarro (PMZSCali, 2004).
- Los principales efectos del sismo registrados en la zona litoral del municipio de Bajo Baudó son: evidencias de licuaciones, agrietamientos laterales, volcanes de arena, elevación súbita del nivel freático (inundaciones temporales) y hundimiento e inclinación de las viviendas palafíticas.
- La mayor parte de los sitios identificados con daños por el sismo se observaron hacia la parte media del abanico aluvial del río Cañaveralejo y la parte media del abanico del río Cali. Daños aislados se localizaron en la llanura aluvial del río Cauca, hacia la parte media y norte de la ciudad.
- La tipología de daño más frecuente se observó en construcciones con estructura tipo pórtico de más de 10 pisos, sufriendo daños básicamente en muros sin afectar los elementos estructurales ni la estabilidad del edificio, observándose fisuras y agrietamientos en muros, así como caída de pañete en fachadas y muros.
- El sismo de Pizarro fue registrado en 9 de las 12 estaciones de la RAC y en 3 estaciones de la RPAC. Las aceleraciones más altas se registraron en la estación de las Canchas Panamericanas con 108.5 cm/seg², y las estaciones de Puerto Mallarino, Navarro y Seminario Teológico con aceleraciones superiores a los 60 cm/seg². Las estaciones Canchas Panamericanas y Seminario Teológico están ubicadas sobre el abanico aluvial de Cañaveralejo, donde se identificaron estratos de arcillas saturadas con espesores que superan los 20 m, además de identificarse paleodrenajes y antiguos sectores de lagunas o humedales actualmente intervenidos debido al desarrollo urbano de la ciudad.
- Los análisis de los registros de aceleración capturados en las diferentes estaciones muestran que los suelos de la parte occidental de la ciudad tienden a amplificar los periodos cortos (< 1.0 seg.), mientras que los suelos de la parte central y oriental de la ciudad los periodos de vibración largos (> 1.0 seg.).

BIBLIOGRAFIA

AIS, INGEOMINAS, UNIANDES. *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia.* Publicación especial de INGEOMINAS. Bogotá. 1996.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghiona, V., Jamiolkowski, M., & Pasqualini, E. (1981). Cone resistance of a dry medium sand. 50th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 2, 427 - 432.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghiona, V., Jamiolkowski, M., & Pasqualini, E. (1986). Interpretation of CPTs and CPTUs; 2nd part: Drained penetration of sands. Proceedings of the Fourth International Geotechnical Seminar, 145 - 156.

Battaglio, M., Bruzzi, D., Jamiolkowski, D., & Lancellote, R. (1986). Interpretation of CPPTs and CPTUs. Proceeding of the 4th International Geotechnical Seminar, (pp. 129—143).

Forero, C., Caro, P., Rubiano, D., Alvarado, C., Bermúdez, M., Martínez, S. Microzonificación Sísmica de Ciudades caso Santa Fe de Bogotá. Taller Internacional FUNVISIS, Agosto de 2000. Serie No.1-2001.

García, J. (2003). Modelación Numérica de Licuación de Arenas en Términos de Esfuerzos Efectivos. PhD thesis, Universidad Politénica de Cataluña.

Havskov, J. and G. Alguacil (2002). Version Preliminary. Instrumentation in Earthquake Seismology.

Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas. J. Phys. Earth. 33, 59-96.

Hough, S.E., L. Seeber, A. Rovelli, L. Malagnini, A. DeCesare, G. Selveggi and A. Lerner-Lam (1992). Ambient noise and weak-motion excitation of sediment resonances: results from the Tiber valley, Italy. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 1186-1205.

INGEOMINAS. (2004). Proyecto de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. En ejecución. Bogotá.

INGEOMINAS. (2000). *Atlas de Amenaza Sísmica de Colombia.* Proyecto Evaluación de la Amenaza Sísmica y Microzonificación Sísmica de Ciudades.

RSNC, INGEOMINAS. (2004). Boletines y Reportes relacionados con el Sismo de Pizarro. Bogotá.

ANEXO 1

*Replicas registradas por la Red Sismológica Nacional de
INGEOMINAS, hasta el 30 de noviembre de 2004*

Anexo 1. Replicas registradas por la Red Sismológica Nacional de INGEOMINAS, hasta el 30 de noviembre de 2004

No.	Año	Mes	Dia	UT			Latitud	Longitud	Profundidad	Estaciones	Magnitud
				hh	mm	ss					
1	2004	11	15	9	6	56.7	4.805	-77.789	24.0	27	6.7
2	2004	11	15	9	34	40	4.893	-77.907	12.3	8	3.4
3	2004	11	15	9	42	19	4.807	-77.910	14.5	9	3.3
4	2004	11	15	10	10	34.1	4.923	-77.927	14.3	10	3.8
5	2004	11	15	10	19	3.9	4.774	-77.592	0.0	8	3.0
6	2004	11	15	10	26	33.1	4.839	-77.936	23.0	7	3.2
7	2004	11	15	10	28	46.4	4.820	-77.943	10.9	5	2.8
8	2004	11	15	10	52	23.1	4.899	-77.942	8.0	4	3.0
9	2004	11	15	11	1	22.6	4.779	-77.810	15.4	6	2.7
10	2004	11	15	15	2	50	4.786	-77.923	11.4	7	3.3
11	2004	11	15	15	16	26.5	4.804	-77.818	14.0	8	3.5
12	2004	11	15	15	35	11.9	4.821	-77.450	0.0	7	3.1
13	2004	11	15	16	56	47	4.788	-77.845	1.0	5	3.1
14	2004	11	15	17	53	50.8	4.851	-77.753	10.6	5	3.1
15	2004	11	15	18	42	10.6	4.823	-77.899	7.0	9	3.7
16	2004	11	15	19	26	33.7	4.779	-77.866	21.9	4	3.0
17	2004	11	15	20	44	14.4	4.907	-77.723	20.0	7	3.4
18	2004	11	16	0	42	58.7	4.907	-77.893	13.0	5	3.0
19	2004	11	16	1	20	26.3	4.903	-77.762	11.0	5	3.0
20	2004	11	16	1	26	37.9	4.919	-77.722	12.7	4	2.9
21	2004	11	16	1	41	56.3	4.785	-77.958	7.9	10	3.5
22	2004	11	16	1	43	10.1	4.871	-77.908	19.3	4	3.3
23	2004	11	16	1	57	51.8	4.851	-77.913	0.0	10	3.8
24	2004	11	16	2	29	53.3	4.798	-77.549	0.0	10	3.9
25	2004	11	16	3	13	1.8	5.094	-77.874	0.0	6	2.9
26	2004	11	16	3	43	25	4.899	-77.823	9.1	7	3.3
27	2004	11	16	6	5	45.9	5.142	-77.725	39.7	4	2.9
28	2004	11	16	6	44	44.3	4.788	-77.925	18.7	10	4.1
29	2004	11	16	7	18	55.8	4.849	-78.054	32.0	10	3.9
30	2004	11	16	7	26	20.1	4.740	-77.936	17.8	6	3.3
31	2004	11	16	7	43	49.4	4.875	-77.791	10.2	3	2.5
32	2004	11	16	14	29	12.5	4.856	-77.873	12.9	5	3.4
33	2004	11	16	20	14	35.8	4.714	-77.408	0.0	5	3.0
34	2004	11	16	21	30	14.7	4.902	-77.847	0.9	9	4.0
35	2004	11	16	21	32	30.8	5.034	-77.617	0.0	5	3.8
36	2004	11	17	0	28	33	4.799	-78.023	22.0	4	3.1
37	2004	11	17	0	49	11	4.702	-77.646	18.7	4	2.7
38	2004	11	17	1	8	45	4.699	-77.475	0.2	4	2.7
39	2004	11	17	1	36	21	4.650	-77.522	17.2	4	2.0
40	2004	11	17	1	54	29	4.846	-77.812	22.0	9	4.0
41	2004	11	17	10	47	2	4.813	-77.450	0.0	4	3.0
42	2004	11	17	12	32	37	4.548	-77.765	0.0	4	2.8
43	2004	11	17	17	53	59	4.731	-78.016	16.8	9	3.5
44	2004	11	17	22	51	37	4.761	-77.495	0.0	4	2.8
45	2004	11	18	1	20	41	4.824	-78.012	10.0	4	2.7

46	2004	11	18	4	44	31	4.902	-77.852	32.0	5	2.6
47	2004	11	18	7	10	52	4.654	-77.900	50.0	5	3.0
48	2004	11	18	10	50	28	4.745	-77.922	9.6	5	2.8
49	2004	11	18	11	57	43.6	4.699	-77.888	32.1	4	3.2
50	2004	11	18	13	28	31.3	4.671	-77.365	0.0	6	2.8
51	2004	11	19	1	25	10	4.648	-77.490	25.0	8	2.8
52	2004	11	19	9	1	35	4.645	-77.910	52.0	6	3.0
53	2004	11	19	12	14	58	4.661	-78.006	8.0	8	2.8
54	2004	11	19	18	26	9	4.872	-77.814	31.0	9	4.0
55	2004	11	19	18	31	51.4	5.007	-77.911	0.0		3.1
56	2004	11	19	18	53	49	4.416	-78.210	25.0	4	3.1
57	2004	11	19	21	34	45	4.852	-77.973	6.0	10	3.5
58	2004	11	19	21	57	10	4.726	-77.420	11.0	7	3.0
59	2004	11	20	0	5	18	4.871	-77.129	0.0	5	2.8
60	2004	11	20	1	32	18	4.980	-78.002	34.0	6	3.1
61	2004	11	20	6	11	17	4.835	-77.910	24.0	5	2.9
62	2004	11	20	8	47	16	4.765	-77.899	32.0	10	3.5
63	2004	11	22	6	56	77	4.755	-77.451	0.0	8	2.7
64	2004	11	22	17	38	17	4.929	-77.986	18.0	4	3.0
65	2004	11	23	8	7	16	4.757	-77.850	16.0	7	2.5
66	2004	11	23	8	32	49	4.765	-77.778	13.4	4	2.3
67	2004	11	24	3	42	9	4.871	-77.938	32.1	13	4.4
68	2004	11	24	5	46	50	4.747	-77.821	16.0	12	3.6
69	2004	11	25	22	9	9	4.724	-77.824	26.9	5	2.7
70	2004	11	25	23	35	33	4.803	-77.647	10.3	5	2.6
71	2004	11	25	23	43	43	4.966	-77.649	3.9	6	2.8
72	2004	11	26	2	31	40.7	4.467	-77.450	68.0	5	2.3
73	2004	11	26	7	26	15.6	4.730	-77.683	32.3	6	2.9
74	2004	11	27	5	44	11.5	4.595	-77.340	20.0	5	2.2
75	2004	11	26	8	54	18	4.761	-78.056	36.0	5	3.7
76	2004	11	26	14	52	11.8	4.759	-77.625	4.0	4	2.8
77	2004	11	27	8	49	55	4.689	-77.415	0.0	9	2.5
78	2004	11	27	17	27	7	4.552	-77.342	84.0	6	2.8
79	2004	11	28	5	2	45	4.827	-77.650	4.0	4	2.3
80	2004	11	29	1	25	0	4.867	-77.676	7.5	7	2.5
81	2004	11	30	17	14	29.5	4.820	-77.993	11.2	7	3.0

ANEXO 2
Evaluación de Intensidad Sísmica en Cali

EVALUACIÓN DE INTENSIDADES EN LA CIUDAD DE CALI POR EL SISMO DE PIZARRO (BAJO BAUDÓ, CHOCÓ) DEL 15 DE NOVIEMBRE DE 2004

Introducción

La *intensidad sísmica* o *intensidad del terremoto* es la medida macrosísmica universal que da cuenta de los efectos y daños dejados por un terremoto en un punto de la superficie de la Tierra, es representada como *I*. esta medida debe entenderse como la severidad o las manifestaciones de las vibraciones sísmicas en la superficie terrestre; aunque en algunos casos es designada en grados, es una medida adimensional; se especifica con un número romano previamente determinado por una escala específica, cuyos valores o niveles se asignan, generalmente, de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) Lo sentido por las personas.
- b) Efectos en objetos, percibidos por las personas en el momento del terremoto o que representen efectos permanente visibles.
- c) Efectos y daños producidos en edificios según diversos tipos de vulnerabilidad.
- d) Cambios notados en el paisaje (naturaleza).

Por ejemplo, para la percepción humana se tienen en cuenta efectos como el pánico, correr desde los edificios hacia la calle; algunos cambios sobre el paisaje (naturaleza), pueden ser el cambio del cauce de un río, deslizamientos, desprendimientos de grandes masas de tierra, aparición de fisuras en la tierra, etc.

La mayoría de las escalas actualmente usadas estiman doce grados del 1 al 12, en los cuales 1 corresponde a vibraciones débiles que sólo son notadas por los instrumentos, sin que sean sentidas por las personas; 12 hace referencia a daños graves o destrucción total, en este grado difícilmente alguna construcción se sostiene en pie, hay grandes cambios en el relieve, muchas víctimas; desde el grado 2 hasta 11, se consideran como efectos intermedios. De esta manera, el grado de intensidad, que depende de una apreciación subjetiva, no-instrumental, de los efectos producidos en un sitio dado, es una medida de la fuerza del terremoto.

En el sentido físico, un grado de intensidad es la combinación de una serie de elementos del proceso de vibración: amplitud del desplazamiento de las partículas del suelo, velocidad de desplazamiento, aceleración, período de vibración, duración del proceso. En condiciones naturales son posibles diferentes combinaciones de los parámetros señalados, que conllevan a dificultades en la valoración de la intensidad *I*.

Hasta ahora son muchos los intentos, que sin éxitos, se han realizado por encontrar una relación entre la aceleración y la intensidad de los terremotos. Sin embargo, en una región donde sean conocidas las condiciones del régimen sísmico y que no se tengan bruscas variaciones en el valor de los elementos del movimiento vibratorio, es posible que la aceleración sirva de criterio para comparaciones de los terremotos.

A pesar de que en Colombia hay evidencias del alto nivel de actividad sísmica histórica y reciente, la práctica de estudios macrosísmico no era una tarea que se realizaba de manera sistemática y mucho menos con fines de que sus resultados fueran incorporados directamente en el análisis y evaluación de la amenaza sísmica regional o local. Con la iniciación de los estudios de microzonificación

sísmica en el país (primero Popayán), esta situación ha venido cambiando radicalmente, ejemplo de ello es la reacción que diferentes instituciones nacionales han tenido ante la ocurrencia de sismos como el de Murindó en 1992, Paez en 1994, Calima-Darién en 1995, Tauramena en 1995, y el de Pizarro, ocurrido muy recientemente.

Sin embargo, los estudios macrosísmicos históricos y los de terremotos recientemente muestran que en el país no ha habido un criterio homogéneo en el uso de las escalas de intensidad, de tal manera que los catálogos macrosísmicos locales o regionales presentan diferentes valores de intensidad; esto es atribuible exclusivamente al hecho de que en cada estudio se usa una escala de macrosísmica diferente.

Pensando en subsanar este problema, sin pretender introducir una nueva escala de medición, Salcedo y Franco (2001), presentaron algunos criterios para la escogencia de una escala de intensidad para evaluar los terremotos que ocurren en el territorio nacional. Estos criterios se basan en la comparación de las tres escalas más usadas en Colombia, Mercalli Modificada, MSK y EMS; llegando a la conclusión de que la escala EMS tiene mejores condiciones y bondades en la definición de sus niveles de intensidad que la hacen más apropiada para nuestro uso.

Bajo esta premisa y consideraciones, se usa esta escala, en su versión más actualizada de 1998, para evaluar las intensidades del terremoto de Pizarro (bajo Baudó, Chocó), ocurrido el 15 de Noviembre de 2004. Esta tarea es emprendida entre INGEOMINAS y el Departamento de Geografía de la Universidad del Valle, que en asocio con otras instituciones regionales y locales, en referencia a los sitios más afectados por el sismo, desplegaron campañas para el levantamiento de la información macrosísmica para evaluar los efectos y daños causados en diferentes lugares donde el sismo pudo haber causado mayores estragos. Una de estas campañas fue la realización de encuestas a partir de un formulario macrosísmico que responde a la escala EMS, diseñado por estas dos instituciones.

La evaluación fue hecha por un docente y estudiantes del programa de Geografía de la Universidad del Valle.

Proceso de asignación de Intensidades en la ciudad de Cali

Para la evaluación de las intensidades en la ciudad de Cali, hasta ahora, se han evaluado 309 formularios distribuidos aleatoriamente en todo el perímetro urbano de la ciudad, de las cuales se descartaron 21 que por incongruencias en la información suministrada en algunas de las respuestas se consideraron podían generar algún trauma en el proceso de asignación de la intensidad; de tal manera que para el análisis sólo se han considerado 288 formularios, que para su identificación, al azar, se les asignó un número de orden. Cada formulario, físicamente, representa un punto dentro de la ciudad, ubicado en una base cartográfica digitalizada por Ingeominas dentro del proyecto de Microzonificación sísmica de la ciudad.

Siguiendo criterios físicos urbanos, como cruce de avenidas y calles principales, presencia de ríos, caños, etc., y para propósitos del estudio, la ciudad de Cali se dividió en 20 subzonas (Tabla 1) que cubren todo su perímetro, con una apropiada distribución del número de formularios, evitando tener que realizar procesos de interpolación o extrapolación de los valores de intensidad. Esta división no responde a criterios geomorfológicos o de particularidades del suelo ya que esto podría influir en un posible condicionamiento en la asignación de la intensidad en el sentido de caer en sobrevaloraciones o subestimaciones de los niveles de intensidad en algunas zonas.

Tabla 1. Distribución de los formularios por zonas y barrios en la ciudad de Cali

Subdivisiones	Barrios Considerados	No. de orden	No. de Formularios	Total Formularios
Zona 1	El Caney	44	2	9
	Ciudadela Comfandi	46	3	
	Ciudad 2000	59	3	
	Ciudad Real	75	1	
Zona 2	República de Israel	28	1	11
	Nuevo Horizonte	33	4	
	Vallado	35	3	
	Ciudad Córdoba	37	3	
Zona 3	Manuela Beltrán	18	1	10
	Calipso	23	1	
	Comuneros II	24	1	
	Alfonso Bonilla Aragón	25	1	
	La Paz	27	1	
	Marroquín	30	2	
	Villa del Lago	31	2	
	Ulpiano Lloreda	130	1	
Zona 4	Agua Blanca	3	2	10
	Los Sauces	6	1	
	El Prado	8	2	
	El Jardín	9	1	
	Asturias	15	1	
	Nueva Floresta	26	1	
	Villa del Sur	38	2	
Zona 5	Saavedra Galindo	2	1	9
	Santa Mónica Popular	5	1	
	El Troncal	13	1	
	Villa Colombia	14	1	
	Multifamiliares La Nva. Base	16	1	
	Los Pinos	19	1	
	Santafe	20	1	
	El Rodeo	21	1	
Chapinero	125	1		

Tabla 1. Continuación

Subdivisiones	Barrios Considerados	No. de orden	No. de Formularios	Total Formularios
Zona 6	Industrial	90	1	10
	Santander	98	1	
	Porvenir	99	1	
	Las Delicias	100	1	
	Manzanares	104	1	
	Esmeralda	111	2	
	Salomia	113	2	
Zona 7	Ignacio Rengifo	128	1	4
	Torres de Comfandi	92	1	
	Metropolitano	93	1	
	La Rivera	101	1	
Zona 8	Los Andes	102	1	8
	Petecuy	22	1	
	Alfonso López	29	2	
	Petar	34	2	
	Chiminango I	95	1	
	Gaitán	122	1	
Zona 9	Los Alcazares	124	1	24
	Oasis de Comfandi	89	1	
	Calmio Norte	91	1	
	---	94	1	
	U. Puente del Comercio	96	1	
	La Isla	97	1	
	Calima	105	1	
	Bueno Madrid	112	3	
	Floralia	114	4	
	Portal de los Guaduales	115	5	
Lares de Comfenalco	116	3		
Zona 10	Comfenalco	117	3	14
	Vipasa	118	2	
	La Merced	119	3	
	Prados del Norte	120	5	
Zona 11	Brisas de los Alamos	121	4	16
	La Flora	106	2	
	Menga	107	4	
	El Bosque	108	2	
	Santa Mónica	109	5	
Granada	110	3		

Tabla 1. Continuación

Subdivisiones	Barrios Considerados	No. de orden	No. de Formularios	Total Formularios
Zona 12	El Morichal	4	2	31
	Villa Catalina	79	1	
	---	80	1	
	Nacional	81	2	
	Altos de Normandía	82	2	
	Brisas de Cristales	84	3	
	Siloé	85	5	
	Terrón Colorado	86	8	
	La Sirena	87	3	
	Bella Vista	88	3	
	Miraflores	132	2	
Zona 13	Cascadas	39	2	19
	Nápoles	43	5	
	Santa Isabel	44	4	
	Altos del Refugio	56	3	
	San Fernando	74	1	
	El Lido	76	1	
	Seminario	78	1	
	Sector Los Chorros	83	2	
Zona 14	Centro I	11	1	2
	Centro II	131	1	
Zona 15	Tequendama	41	4	13
	Templete	52	5	
	La Carolina	55	2	
	Riveras del Río	78	1	
	San Fernando Nuevo	129	1	
Zona 16	Santa Helena	1	3	14
	Las Acacias	7	2	
	Santo Domingo	60	3	
	Colseguros Andes	63	4	
	Guabal	77	1	
	Jorge Zawadsky	123	1	

Tabla 1. Continuación

Subdivisiones	Barrios Considerados	No. de orden	No. de Formularios	Total Formularios
Zona 17	Limonar	45	11	49
	Sta. María de Guadalupe	48	3	
	Primero de Mayo	49	19	
	Samanes	51	4	
	Pampalinda	53	2	
	Gratamira	61	2	
	Santa Anita	62	6	
	Villas de Guadalupe	66	2	
Zona 18	Ciudadela del Río	17	1	22
	Las Vegas	40	3	
	Ciudad Jardín	54	4	
	Capri	57	2	
	Pasoancho	58	2	
	El Ingenio	64	4	
	Quintas de Don Simón	65	3	
	Multicentro	67	3	
Zona 19	Pance	42	2	10
	La Riverita	50	2	
	Corr. El Hormiguero	69	1	
	Riveras del Río	70	1	
	Jordán	71	1	
	La Buitrera Sec. Potrerito	72	1	
	Meléndez	73	1	
	Parcelación la Riverita	135	1	
Zona 20	Talanga	12	1	3
	Decepaz	32	2	

La información de los formularios fue discriminada de acuerdo con los tres principales efectos sentidos, observados y reportados por la comunidad, bajo la siguiente clasificación y codificación:

1. Efectos en Personas:

- A – sintió el sismo muy fuerte
- B – sintió el sismo moderadamente
- C – sintió el sismo muy débil
- D – se asustó
- E – tuvo pánico
- F – si dormía se despertó
- G – corrió a la calle
- H – perdió el equilibrio
- J – fue lanzado al piso
- K – sintió balanceo del edificio
- L – sintió balanceo de la habitación
- M – sintió balanceo de la cama

2. Efectos en Objetos y animales

- A – notó balanceo de algún objeto colgante (matera, lámpara, etc.)
- B – notó ruido de puertas, ventanas, espejo o algún otro tipo de objeto
- C – notó que puertas y ventanas se abrían y cerraban
- D – notó rechinar objetos como porcelana, vasos, frascos, etc.
- E – notó caída o volcamiento de algún objeto pequeño y muebles livianos
- F – notó caída o desplazamiento de muebles pesados (televisor, computador, etc.)
- G – notó alguna reacción de susto de los animales
- H – notó movimiento, salpicamiento o vertimiento de líquidos
- I – notó ondulaciones en el terreno
- J – notó caída de monumentos

3. Efectos en construcciones

3.1. *Mampostería sin viga ni columnas*

- A – piedra suelta
- B – adobe o tapia
- C – ladrillo o bloque cementado
- D – ladrillo con bloques de hormigón armado
- E – ladrillo reforzado (mampostería atada)

3.2. *Tipo de estructura*

- F – concreto
- G – metálica
- H – concreto reforzado
- I – madera (incluye estructuras en guadua)

3.3. *Efectos*

- J – fisuras en revestimiento
- K – caída de pañete
- L – caída de algunos elementos sueltos de la construcción
- M – caída de tejas
- N – fisura o grietas en muros
- O – daños estructurales (columnas, vigas o muros de carga)
- P – grietas en columnas y desprendimiento de piezas de concreto; grietas en viga
- Q – daños en juntas de la estructura del edificio con la destrucción del concreto y exposición de las varillas de refuerzo
- R – desplome de columnas o colapso parcial
- S – colapso total

Dado que toda la información se toma a partir de encuestas, es preciso resaltar que el número de éstas no se eligió siguieron técnicas de muestreo en la recopilación de los datos sino que respondió a la voluntad que tuvo la población en contestar las preguntas y a la disposición del número de profesionales que participaron de esta labor, por lo cual no se puede garantizar que los porcentajes calculados sean indicadores confiables de la población total. Sin embargo, se puede decir que por el tamaño de las subzonas elegidas y las características del evento sísmico, el número de formularios en cada subzona es considerado como un universo que representa los efectos allí sentidos.



Este criterio solamente es válido para los efectos en personas y objetos. Para el caso de los efectos en las construcciones el estimativo se logra por el conteo aproximado del número de manzanas incluidas en cada subzona. El análisis de la información arroja para cada una de las subzonas los datos que se muestran en las Tabla 2a, 2b y 2c:

Tabla 2a. Número y porcentajes de efectos en personas:

Subdivisiones	No. total de Formularios	A	%	B	%	C	%	D	%	E	%	F	%	G	%	H	%	I	%	J	%	K	%	L	%	M	%
Zona 1	9	9	100	0	0	0	0	7	78	3	33	8	89	3	33	2	22	1	11	0	0	4	44	7	78	7	78
Zona 2	11	10	91	1	9	0	0	5	45	1	9	8	73	4	36	3	27	2	18	0	0	2	18	6	55	8	73
Zona 3	10	9	90	1	10	0	0	8	80	3	30	8	80	0	0	3	30	5	50	0	0	4	40	7	70	8	80
Zona 4	10	10	100	0	0	0	0	6	60	4	40	7	70	1	10	2	20	2	20	0	0	5	50	6	60	9	90
Zona 5	9	8	89	1	11	0	0	7	78	2	22	9	100	2	22	7	78	4	44	1	11	3	33	5	56	4	44
Zona 6	10	7	70	2	20	1	10	5	50	2	20	7	70	3	30	2	20	2	20	0	0	2	20	8	80	8	80
Zona 7	4	3	75	1	25	0	0	1	25	0	0	4	100	0	0	0	0	0	0	0	0	2	50	1	25	3	75
Zona 8	8	5	63	2	25	0	0	6	75	2	25	5	63	2	25	2	25	1	13	0	0	5	63	6	75	6	75
Zona 9	24	23	96	1	4	0	0	16	67	9	38	12	50	10	42	8	33	9	38	0	0	14	58	18	75	16	67
Zona 10	14	8	57	0	0	0	0	9	64	2	14	4	29	0	0	5	36	8	57	0	0	7	50	6	43	6	43
Zona 11	16	14	88	2	13	0	0	12	75	3	19	9	56	3	19	0	0	3	19	1	6	8	50	5	31	7	44
Zona 12	31	15	48	8	26	1	3	17	55	8	26	22	71	2	6	4	13	3	10	0	0	15	48	11	35	11	35
Zona 13	19	12	63	6	32	0	0	12	63	6	32	15	79	2	11	3	16	4	21	0	0	12	63	10	53	11	58
Zona 14	2	2	100	0	0	0	0	1	50	2	100	0	0	0	0	0	0	1	50	0	0	2	100	1	50	1	50
Zona 15	13	12	92	1	8	0	0	9	69	4	31	8	62	2	15	5	38	2	15	0	0	10	77	9	69	7	54
Zona 16	14	14	100	0	0	0	0	9	64	1	7	12	86	0	0	4	29	3	21	0	0	11	79	11	79	11	79
Zona 17	49	44	90	4	8	0	0	33	67	12	27	32	65	8	16	17	35	15	31	0	0	28	57	26	53	26	53
Zona 18	22	16	73	4	18	0	0	12	55	2	9	16	73	5	23	2	9	1	5	0	0	7	32	11	50	15	68
Zona 19	10	7	70	2	20	0	0	6	60	3	30	8	80	2	20	0	0	0	0	0	0	3	30	5	50	7	70
Zona 20	3	2	67	1	33	0	0	2	67	0	0	2	67	1	33	0	0	2	67	0	0	1	33	1	33	1	33
TOTALES	288																										

Tabla 2b. Número y porcentajes de efectos en objetos y animales

Subdivisiones	No. total de Formularios	A	%	B	%	C	%	D	%	E	%	F	%	G	%	H	%	I	%	J	%
Zona 1	9	4	44	5	55	0	0	0	0	3	33	0	0	2	22	0	0	0	2	0	0
Zona 2	11	6	55	9	82	1	9	3	27	2	18	1	9	6	55	0	0	1	9	0	0
Zona 3	10	7	70	7	70	1	10	2	20	5	50	0	0	2	20	0	0	0	0	0	0
Zona 4	10	5	50	6	60	2	20	4	40	0	0	2	20	5	50	2	20	1	10	0	0
Zona 5	9	7	78	6	67	2	22	5	56	1	11	0	0	1	11	0	0	0	0	0	0
Zona 6	10	7	70	8	80	2	20	4	40	0	0	0	0	4	40	0	0	1	10	0	0
Zona 7	4	3	75	2	50	3	75	2	50	0	0	1	25	2	50	0	0	0	0	0	0
Zona 8	8	5	63	6	75	3	38	1	13	1	13	0	0	4	50	2	25	3	38	0	0
Zona 9	24	18	75	17	71	5	21	17	71	7	29	2	8	6	25	1	4	3	13	0	0
Zona 10	14	12	86	10	71	4	29	4	29	3	21	0	0	5	36	1	7	2	14	0	0
Zona 11	16	9	56	9	56	2	13	3	19	1	6	0	0	3	19	0	0	3	19	0	0
Zona 12	31	8	26	10	32	2	6	7	23	2	6	0	0	10	32	1	3	3	10	0	0
Zona 13	19	9	47	8	42	2	11	7	37	2	11	0	0	5	26	1	5	1	5	0	0
Zona 14	2	1	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	50	0	0	0	0	0	0
Zona 15	13	10	77	8	62	2	15	5	38	10	77	3	23	7	54	2	15	2	15	1	8
Zona 16	14	12	86	13	93	6	43	7	50	8	57	1	7	5	36	2	14	1	7	0	0
Zona 17	49	33	67	29	59	15	31	24	39	16	33	3	6	13	27	8	16	2	4	1	2
Zona 18	22	16	73	13	59	4	18	5	23	3	14	1	5	7	32	3	14	2	9	0	0
Zona 19	10	5	50	8	80	2	20	1	10	1	10	0	0	4	40	1	10	0	0	0	0
Zona 20	3	2	67	3	100	0	0	1	33	0	0	0	0	1	33	0	0	2	67	0	0
TOTALES	288																				

Tabla 2c. Número y porcentajes de efectos en construcciones:

Subdivisiones	No. total de Formularios	J	%	K	%	L	%	M	%	N	%	O	%	P	%	Q	%	R	%	S	%
Zona 1	9	1	11	0	0	0	0	0	0	2	22	0	0	1	11	0	0	0	0	0	0
Zona 2	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 3	10	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 4	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 6	10	2	20	0	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 9	24	7	29	2	8	1	4	1	4	6	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 10	14	6	43	5	36	2	14	1	7	2	14	0	0	1	7	0	0	0	0	0	0
Zona 11	16	2	12	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 12	31	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 13	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 15	13	3	23	1	8	1	8	0	0	3	23	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0
Zona 16	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 17	49	3	6	2	4	1	2	1	2	3	6	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
Zona 18	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 19	10	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zona 20	3	1	33	0	0	0	0	1	33	1	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALES	288																				

Intensidades asignadas

Como ha sido mencionado arriba, para la asignación de la intensidad solamente se ha tenido en cuenta la información deducida de los 288 formularios considerados, analizando conjuntamente los efectos en personas, objetos y construcciones de acuerdo con las consideraciones señaladas arriba y con las recomendaciones indicadas por la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (Gruntal, 1998).

Además, se asumió que en la ciudad de Cali, puede tenerse diversos tipos de vulnerabilidad de las edificaciones, de tal manera que para las zonas de estratos medio y bajo y las construcciones más antiguas tienen vulnerabilidad de tipo A y B; mientras que para estratos superiores y construcciones más recientes, la vulnerabilidad puede ser hasta de tipo C y D.

Para completar estos criterios, también se adoptó una medida cualitativa de la calidad (factor de Calidad Q) de la cantidad de información, más no de la calidad puesto que toda proviene de los formularios. Para este factor se escogió el criterio adoptado por Salcedo (1999, 2002) y en el estudio de Sismicidad Histórica para el proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cali, donde se consideran tres niveles así: A - significa que el sismo fue sentido o dejó efectos y que la información existente de su reporte es suficiente y clara para tener buena seguridad de la asignación de la intensidad; B - indica que el sismo fue sentido o dejó efectos, pero no existe información suficiente para asignar el valor de intensidad; C - señala que la información recolectada es poca, insuficiente o dudosa para dar una buena asignación de la intensidad. La distribución de las de acuerdo con división establecida, se muestra en la Tabla 3 y Figura 1.

Tabla 3. Intensidades en la ciudad de Cali por efectos del sismo de Pizarro del 15 de Noviembre de 2004.

Subdivisiones	Intensidad Escala EMS-98	Calidad Q
Zona 1	V	C
Zona 2	IV	B
Zona 3	V	C
Zona 4	IV - V	C
Zona 5	IV	B
Zona 6	V	C
Zona 7	IV	C
Zona 8	IV	C
Zona 9	VI	B
Zona 10	VI	B
Zona 11	V - VI	B
Zona 12	IV - V	B
Zona 13	IV	B
Zona 14	IV	C
Zona 15	VI - VII	B
Zona 16	IV	B
Zona 17	VII	B
Zona 18	IV	B
Zona 19	IV - V	C
Zona 20	V	C

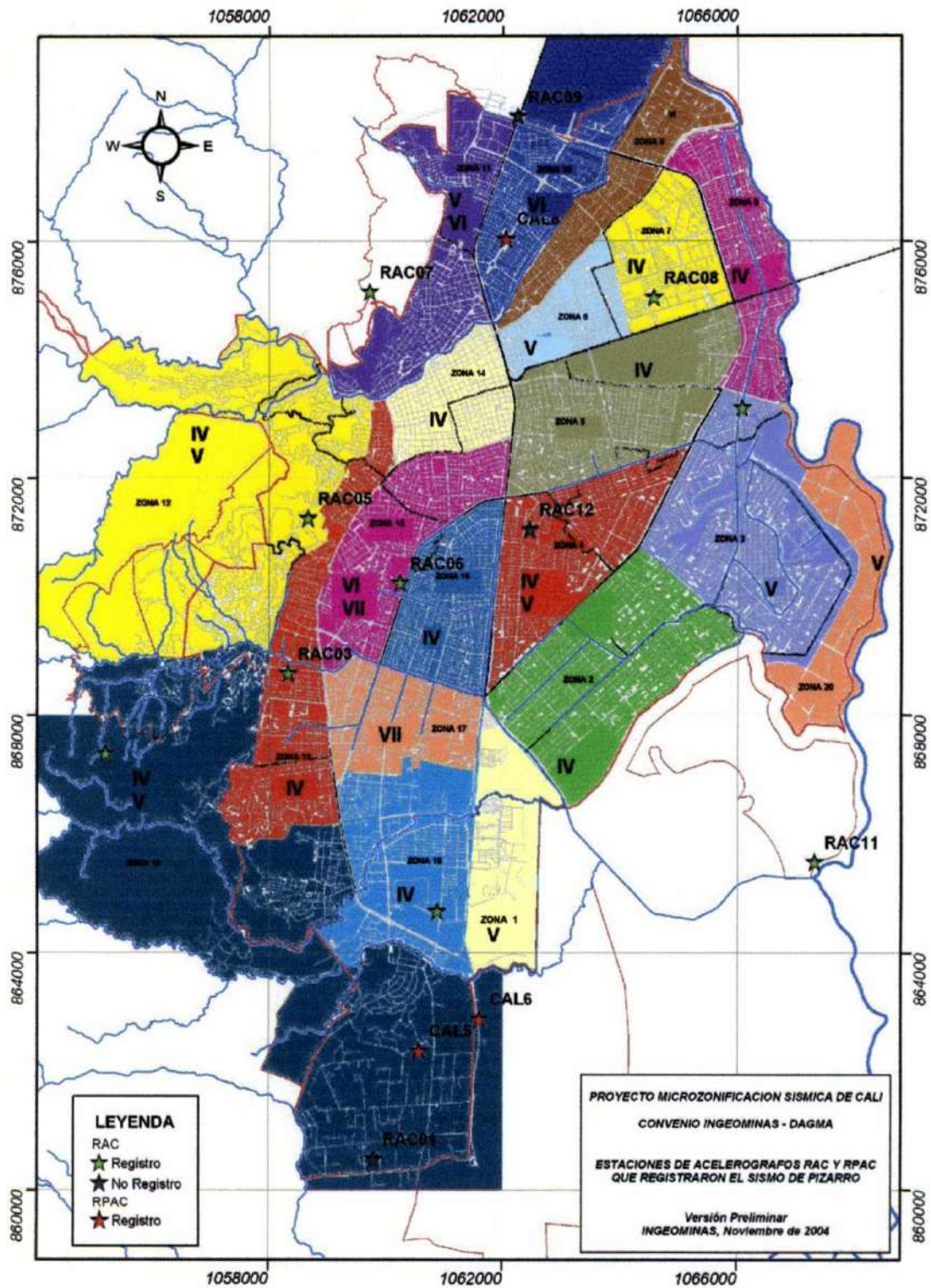


Figura 1. Mapa de intensidades sísmicas sentidas en la ciudad de Cali a partir del sismo de Pizarro (Bajo Baudó, Chocó) del 15 de Noviembre de 2004



Referencias

- Grünthal G. (Edit.), (1998). *European Macroseismic Scale 1998, EMS-98*. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15. Luxembourg. 99p.
- Salcedo Hurtado, E. y Franco, L. E. (2001). Una Escala de Intensidad para Colombia. Rev. Horizontes Naturales de la facultad de Ciencias Exactas y Naturales- Universidad de Caldas. No. 3.. p. 67-77.
- Salcedo Hurtado, E. (1999). Estudio de Sismicidad Histórica en la Región de Bucaramanga (Colombia). Rev. Acad. Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. XXIII, No. 87. p. 233-248.
- Salcedo Hurtado, E. (2002). Sismicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga. Boletín Geológico INGEOMINAS, No. 40. Santafé de Bogotá. 180p. ISSN – 0120-1425.