



*Corporación Autónoma
Regional del Valle del Cauca
Comprometidos con la Vida*



Convenio Especial de Cooperación CVC No. 148 de 2006

Evaluación básica e investigación geológica,
sismológica y red acelerográfica como insumo
para la microzonificación sísmica del área urbana y
de expansión de Buenaventura

Primera etapa del Proyecto 1128
"Gestión del Riesgo Sísmico en Buenaventura"

Hacia la reducción del
riesgo sísmico en Buenaventura

Septiembre de 2008

© Convenio especial interinstitucional CVC y Corporación OSSO No. 148 – 06.
Evaluación básica e investigación geológica, sismológica y red acelerográfica como insumo para la
microzonificación sísmica del área urbana y de expansión de Buenaventura.
Primera etapa del Proyecto 1128
Hacia la reducción del riesgo sísmico en Buenaventura.

Textos, ilustraciones y fotos: Corporación OSSO.
Figura 3: Colección USGS.

Diagramación: Departamento de Arte de Feriva S.A.
Impreso en los talleres gráficos
de Impresora Feriva S.A.
PBX 524 9009
www.feriva.com
Cali, Colombia

Agradecimientos

Especialmente a todo el personal de la Oficina de Gestión Ambiental Territorial (OGAT), Pacífico Oeste (Buenaventura) de la CVC por el apoyo, acompañamiento en campo, la información, el transporte y el alojamiento en la estación acelerográfica en “Plan Padrinos”.

Al municipio de Buenaventura, la Secretaría de Prevención y Atención de Desastres y al CLOPAD, a la Asociación de Ingenieros de Buenaventura, a la Brigada de Emergencias de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura.

A la Base Naval ARC de Bahía Málaga y a EPSA, por facilitar los sitios para ubicar las estaciones sismológicas.

A las entidades hospedantes de las casetas acelerográficas: Junta de Acción Comunal barrio Alberto Lleras Camargo, Universidad del Pacífico y CVC, Secretaría de Educación de la Alcaldía de Buenaventura y Comfamar.

A los medios de comunicación por su colaboración, tan importante en la difusión social de la prevención sísmica.

A todos los asistentes a talleres y encuentros; a las entidades que apoyaron el Convenio mediante el préstamo de auditorios para la realización de los talleres temáticos: la Universidad del Pacífico y el Benemérito Cuerpo de Bomberos.

A los líderes comunitarios y a las comunidades costeras de El Choncho, Juanchaco y Puerto Merizalde, quienes facilitaron la realización de mediciones y recorridos de campo.

Al doctor Geovanny Bedoya, Director del Departamento de Geología de la Universidad EAFIT por el préstamo de personal especializado, especialmente el doctor Iván Darío Correa, y sus laboratorios.

A la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, FUNVISIS, y a su jefe del Departamento de Ciencias de la Tierra, doctor Franck Audemard, por su valiosa asesoría en sismotectónica y neotectónica.

Al Laboratorio de Palinología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Nacional sede Medellín, por los análisis de polen.

A la Universidad del Valle por facilitar el uso de la información de la Red Sismológica del Suroccidente recopilada entre 1989 y 2005.

Al Archivo del Patrimonio Fílmico y Fotográfico del Valle del Cauca, por su disposición de fotografías históricas de la ciudad y del puerto en la red mundial.

Participantes

Entidad Gestora

Corporación Autónoma Regional
del Valle del Cauca

Director: José William Garzón Solís

Directora Técnico Ambiental: Doris Amparo Bravo

Supervisor de la Interventoría: Omar Alberto Chaves

Entidad Ejecutora

Corporación OSSO

Dirección General

Hansjürgen Meyer

Coordinación técnica

Andrés Velásquez

Asistencia de coordinación

Cristina Rosales

Diana Mendoza

Sismicidad histórica

Diana Mendoza

Sismicidad instrumental

Jorge Mejía

Einer Muñoz

Geofísica

Cristina Rosales

Ulloa y Díez Ltda.

Geología regional y local

Iván Darío Correa

Claudia Lalinde

Heyley Vergara

Myriam López

Andrés Velásquez

Franck Audemard

Red acelerográfica

Jorge Eliécer Gallego

Red sísmológica temporal

Roque Caicedo

Andrés Racines

Jorge Eliécer Gallego

Sistema de información geográfico

Mauricio Bautista

Jorge Mendoza

Socialización, sensibilización y educación

Henry Peralta

William Burbano

María Mercedes Durán

Administración

Diana Gaviria

Ivonne Caicedo

Carolina Delgado

Wilson Pérez

Asistentes

John Jairo Álvarez

Javier Díaz

Luis Murillo

Isabel Herrera

Interventoría

Asociación de Ingenieros del Valle – AIV

Miguel Charry R.

Elkin de Jesús Salcedo

Gabriel París

Germán Villafañe R.

Beatriz Elena Tofiño.

Beneficiario del Convenio

Municipio de Buenaventura

Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Presentación y objetivos | 6 |
| 1.1. Pronóstico y prevención sísmica – Generalidades | 6 |
| 1.2. El proyecto | 8 |
| 1.2.1. Etapa 1 | 8 |
| 1.2.2. Etapa 2 | 11 |
| 2. Enfoque y Metodología | 11 |
| 3. Buenaventura | 12 |
| 4. Resultados | 16 |
| 4.1. Elementos para la evaluación de las fuentes sísmicas | 16 |
| 4.1.1. Sismicidad histórica | 16 |
| 4.1.2. Fallas geológicas continentales activas | 19 |
| 4.1.3. Sismicidad instrumental en cercanías de Buenaventura | 21 |
| 4.1.4. Investigación de terremotos fuertes en el Litoral | 21 |
| 4.2. Evaluación del efecto local | 23 |
| 4.2.1. Mapa de terrenos naturales y artificiales | 24 |
| 4.2.2. Estudios geofísicos | 25 |
| 4.2.2.1. Perfiles de refracción y reflexión sísmica | 25 |
| 4.2.2.2. Mediciones de vibraciones ambientales | 26 |
| 4.2.3. Mapas urbanos de daños por sismos | 27 |
| 4.2.4. Red acelerográfica | 28 |
| 5. Zonificación preliminar de Buenaventura | 32 |
| 6. Conclusiones | 32 |
| 7. Recomendaciones | 33 |
| 8. Glosario | 34 |
| Acrónimos | 36 |

1. Presentación y objetivos

Los riesgos asociados con fenómenos naturales son el producto de amenazas o peligros derivados de la dinámica propia de la Naturaleza, en este caso los terremotos, que no se pueden evitar ni predecir, y de las condiciones de exposición e intensidad a la amenaza (cercanía al peligro y fuerza o energía con la cual ocurre) y de la vulnerabilidad (grado de resistencia o de debilidad ante los efectos producidos cuando la amenaza se manifiesta), de las comunidades y sus construcciones.

1.1. Pronóstico y prevención sísmica – Generalidades

La inmensa mayoría de pérdidas por terremoto –humanas y materiales– ocurren por daños o colapsos de las edificaciones sometidas a vibración sísmica fuerte. De ahí que la reducción del riesgo sísmico pasa principalmente por el diseño y construcción de edificaciones resistentes a estas vibraciones. Que ésta sea la estrategia más eficaz para protegernos contra los sismos conlleva una ventaja muy importante: no es necesario saber cuándo ocurrirá el próximo terremoto fuerte –una meta científica y práctica aún muy lejana– sino sólo conocer la intensidad del terremoto más fuerte que podría ocurrir en el tiempo futuro de interés, para poder dimensionar la resistencia apropiada.

Así, si el planificador urbano, el arquitecto, el ingeniero civil y el constructor saben cuál es la intensidad probable del futuro terremoto, podrán tomar todas las precauciones necesarias, que esencialmente están en el diseño y construcción de una estructura suficientemente resistente.

Un ejemplo ilustrativo: no necesitamos saber cuándo va a llover para tomar la decisión de ponerle techo a nuestra casa; basta con saber que algún día lloverá para hacerlo, y tenerla así protegida de la lluvia. Además, la meteorología nos dice, a partir de la historia de la pluviosidad, qué tan intensas pueden ser las lluvias, para dimensionar adecuadamente los desagües del techo.

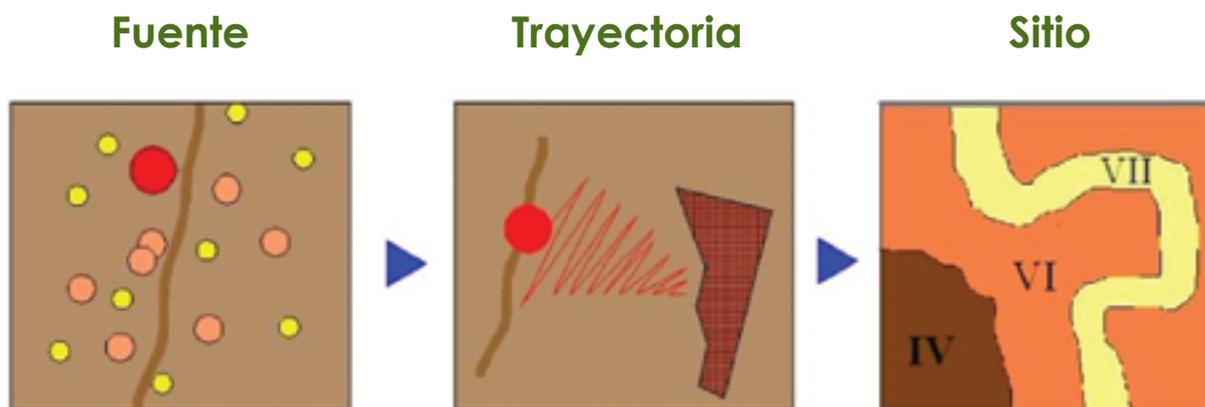
Pero ¿por qué es más factible pronosticar la intensidad de un futuro terremoto que su fecha de ocurrencia?

6

Una hipótesis fundamental del pronóstico de sismicidad dice que la actividad sísmica en cualquier región es estacionaria en periodos muy largos, es decir, su localización, tamaño y frecuencia de ocurrencia mantiene promedios estables. De ésto se concluye que las características de la sismicidad del pasado –que podemos conocer con estudios geológicos, históricos y mediciones instrumentales– se pueden proyectar al futuro.

Pero hay otras condiciones que facilitan aún más el pronóstico: la evaluación de la sismicidad tiene que investigar por separado los tres factores que contribuyen a la

intensidad sísmica en un sitio: las fuentes (fallas geológicas), la trayectoria y el llamado 'efecto de sitio'. Las condiciones de dos de estos factores –la trayectoria y el efecto de sitio– son constantes e invariables en el tiempo. Más aún, el 'efecto de sitio' –las modificaciones de una vibración sísmica por efecto de capas geológicas superficiales (suelos) en el sitio o área de interés– es en muchas ocasiones lo que hace que un sismo fuerte sea un sismo desastroso (con grandes daños) en ciertas áreas, lo que hace su evaluación particularmente importante. Además, la evaluación del efecto de sitio se hace con técnicas que permiten una alta resolución, a costos y tiempos razonables, por estar relacionado con las capas geológicas directamente accesibles, los suelos.



Fuente: ¿Dónde se localizan las fallas geológicas (fracturas) que pueden causar sismos? ¿De qué tamaño pueden ser y con qué frecuencia ocurren estos sismos? Para evaluar la ocurrencia de sismos que pueden tener plazos de recurrencia de centenares o miles de años hay que acudir a estudios geológicos e históricos y a mediciones instrumentales.

Trayectoria: ¿Cómo –con cuánta energía y qué contenido frecuencial– llegan las ondas sísmicas de la fuente al sitio de interés?

Sitio: ¿Cómo modifican los suelos en el sitio o área de interés las ondas sísmicas; cuáles componentes de la vibración pueden amplificar?

El pronóstico de amenaza sísmica conduce a una 'zonificación', o sea a la delimitación de regiones con intensidades sísmicas probables similares.

El efecto local es tan importante en la configuración de la amenaza sísmica que para ciudades mayores se procura llevarla a la escala 'micro', como se hace actualmente en Buenaventura. En este caso se busca diferenciar el efecto local –la influencia de los suelos– a escala de barrios o manzanas.

Pues bien, esto es lo que se ha estado haciendo en el proyecto de microzonificación sísmica de Buenaventura: estudiar las fuentes sísmicas de la región y las propiedades de los suelos en el área urbana de la ciudad.

1.2. El proyecto

Para contribuir a que en el municipio, las instituciones públicas y privadas y la comunidad puedan disminuir la vulnerabilidad o debilidad ante vibraciones sísmicas, la CVC diseñó el subproyecto No. 1128, denominado “Gestión del riesgo sísmico de Buenaventura”, que está dividido en dos fases. La primera fase tiene por objetivo la realización de la microzonificación sísmica de la ciudad, en dos etapas. La primera etapa, a cargo de la Corporación OSSO, busca alcanzar evaluaciones e investigaciones básicas como insumos fundamentales para la microzonificación sísmica de la ciudad y sus áreas de expansión, que a su vez deben traducirse en conocimientos y normas para la disminución de riesgos asociados a efectos de los sismos (vibraciones fuertes, amplificaciones sísmicas, fenómenos secundarios asociados). La segunda etapa consistirá en la definición del modelo de amenaza sísmica regional y microzonificación sísmica del área urbana y de expansión urbana de Buenaventura. Las dos etapas serán la base para la segunda fase del subproyecto, el estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico de la ciudad.

Por microzonificación sísmica se entiende la agrupación de los terrenos de una ciudad en categorías que expresan cómo se comportan los suelos ante el paso de las ondas sísmicas, lo que depende de propiedades como la dureza y el espesor, que pueden variar de uno a otro sector. Microzonificación es, en esencia, la delimitación de los diferentes tipos de terrenos según su comportamiento ante las ondas sísmicas. Para que la microzonificación finalmente genere la información requerida para el diseño sismorresistente de edificaciones –los “espectros de diseño” para cada microzona– esta microzonificación se realiza sobre la base de un “modelo sismotectónico”, que especifica la magnitud y distancia de los sismos que probablemente afectan el área microzonificada.

1.2.1. Etapa 1

El Convenio CVC 148-06 tuvo como objeto desarrollar la primera etapa del estudio de Microzonificación Sísmica de Buenaventura. Como resultado se aportaron los insumos básicos para caracterizar la amenaza –dónde están las fuentes o fallas capaces de generar terremotos con potencial de daños en la ciudad, cuál es su capacidad para generar sismos fuertes y en cuánto tiempo podrían ocurrir– a la vez que se generaron conocimientos sobre las características y distribución de los terrenos de la ciudad; en otras palabras, insumos para responder a la pregunta ¿cómo se mueven los diferentes terrenos de Buenaventura ante el paso de las ondas sísmicas?

Los objetivos del Convenio estaban dictados por el nombre mismo de la primera etapa del subproyecto 1128: “*Evaluación básica e investigación geológica, sismológica y red acelerográfica como insumo para la microzonificación sísmica del área urbana y de expansión urbana de Buenaventura*”. Veamos el siguiente listado, en el que se describen las diferentes áreas de investigación del convenio:



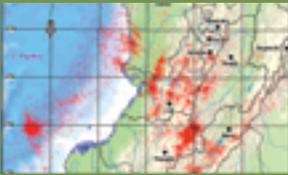
Morfotectónica y neotectónica: buscar anomalías para la
 • identificación de fallas geológicas cercanas, estudio de terremotos, magnitudes máximas probables y tasas de recurrencia.



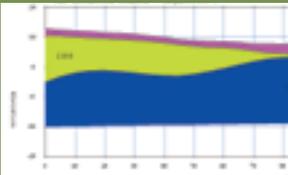
Tsunamitas y horizonte cosísmico y dataciones radiométricas: evaluar evidencias físicas de la ocurrencia de sismos de magnitud mayor, por medio de la identificación de indicadores sedimentológicos o geomorfológicos.



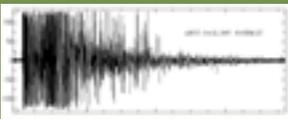
Sismicidad histórica: elaborar el catálogo macrosísmico, a partir de la revisión de fuentes históricas, que incluya las
 • fuentes de los terremotos (falla de subducción, zona de Wadati – Benioff o fallas corticales y los efectos asociados en Buenaventura).



Sismicidad instrumental: elaborar un catálogo preliminar de sismicidad instrumental en la región que cubre el período 1989 a 2005. Instalar y operar dos estaciones sismológicas durante la vigencia del Convenio.



Geofísica: generar el mapa de distribución de la respuesta sísmica de los suelos a las vibraciones ambientales; obtener perfiles de velocidad de ondas mediante refracción sísmica.



Red acelerográfica: instalar una red acelerográfica permanente en la ciudad.



Sistema de Información Geográfica – SIG: cartografía regional y local y bases de datos asociadas preparada en un
 • SIG que garantice intercambio de datos con otros sistemas. Incluye un equipo de computación que quedará disponible en la CVC.



Formaciones geológicas superficiales: cartografía de las
 • unidades geológicas superficiales del área de Buenaventura, que incluye revisión de la información geotécnica.

La investigación geológica que abarca las áreas de Morfotectónica y Tsunamitas buscó generar conocimiento sobre las fallas geológicas cercanas a la ciudad en cuanto a su grado de actividad potencial (cada cuánto pueden generar terremotos y de qué magnitud) e investigar evidencia de grandes terremotos que en el pasado produjeron hundimientos en la zona costera.

Por su parte, la investigación de la actividad de formaciones geológicas superficiales a escala urbana y de las áreas de expansión, permitió la elaboración del mapa con cuatro tipos de terrenos naturales y artificiales: 1. Lodos en zonas de manglar y de bajamar; 2. Rellenos de basuras y escombros sobre los lodos de bajamar, para uso urbanístico; 3. Rellenos de gravas y alta densidad de pilotes, que reemplazaron los lodos preexistentes, en zonas portuarias; 4. Arcillas y limos blandos de color amarillento, generados por descomposición de las rocas, con espesores que oscilan entre 4 y 10 metros en la isla Cascajal y el continente, bajo los cuales se encuentra roca de color gris en capas horizontales, cada vez más dura en profundidad. Este último conjunto (arcillas y limos blandos sobre roca gris dispuesta en capas horizontales) se denomina Formación Mayorquín.

El estudio de la sismología aportó la información sobre localización de sismos de pequeña magnitud registrados por la Red Sismológica del Suroccidente (RedSW) en cercanías de la ciudad. Los pequeños sismos (microsismos) registrados son de importancia porque nos dicen que hay fuentes sísmicas activas y se debe evaluar su potencial para producir sismos más grandes.

La revisión de la sismicidad histórica llevó a la compilación de un catálogo de sismos históricos para Buenaventura, e incluyó hallazgos de eventos que no estaban reportados en otros inventarios. Igualmente aportó el mapa de distribución de daños en la ciudad por dos sismos recientes.

La investigación geofísica en la ciudad proporcionó parámetros sobre el espesor y dureza de los diferentes tipos de terreno hasta los 40 a 50 metros de profundidad y un mapa de la respuesta de los suelos frente a las vibraciones ambientales (un ejemplo de vibración ambiental: el lector seguramente ha tenido la experiencia de sentir que el piso se mueve al paso de un camión cuando se encuentra en ciertos lugares con suelos blandos y que el mismo camión no genera movimiento en un terreno duro).

Como las ondas sísmicas pueden amplificarse y causar más daños según el tipo de terreno, se diseñó e instaló una red de cinco estaciones conformada por equipos –acelerógrafos– capaces de medir la aceleración con que se mueve cada tipo de terreno durante la ocurrencia de terremotos.

Como parte de la estrategia de difusión, socialización y participación, se realizaron cuatro talleres y dos encuentros con participación de la Administración Municipal, los gremios, entidades de socorro y líderes comunitarios. Hay que destacar que un grupo importante de personas asistió a todos los talleres y que el proyecto fue ampliamente difundido por

los medios de comunicación locales. Adicionalmente se diseñaron y difundieron material audiovisual y folletos explicativos de las actividades del Convenio.

En síntesis, en esta primera etapa se llegó a resultados fundamentales para la Etapa 2, en dos grandes temas que son complementarios: la construcción de insumos para la evaluación de la amenaza sísmica, que permitan responder a la pregunta: ¿qué tan fuertes pueden ser las vibraciones sísmicas en sitios de roca en la ciudad?, y la consecución de insumos para la evaluación del efecto local: ¿qué tanto pueden ser amplificadas estas vibraciones al llegar a los terrenos diferentes a roca?, en concordancia con la metodología propuesta y adoptada para el desarrollo del Convenio.

Como las ondas sísmicas pueden amplificarse y causar más daños según el tipo de terrenos, se diseñó e instaló una red de cinco estaciones conformada por equipos –acelerógrafos– capaces de medir la aceleración con que se mueve cada tipo de terreno durante la ocurrencia de terremotos.

1.2.2. Etapa 2

La Etapa 2, “Amenaza sísmica en roca y microzonificación sísmica del área urbana y de expansión de Buenaventura”, parte de los resultados de las evaluaciones e investigaciones que se alcancen en la Etapa 1 (en los temas geología local y regional, sismología histórica e instrumental, operación de la red acelerográfica), que permitirán desarrollar en la Etapa 2 los modelos sismotectónicos y de amenaza sísmica, así como el mapa de microzonificación sísmica. Para este último en esta etapa se continuarán los estudios geofísicos, y se adelantarán los estudios geotécnicos, los estudios de zonificación de amenazas por licuación, tsunami y los de amplificación sísmica.

Incluye actividades como el desarrollo de la sismicidad instrumental en su segunda etapa, la elaboración del modelo sismotectónico, la evaluación de la amenaza sísmica en roca, la segunda etapa de los ensayos geofísicos, la geotecnia, la segunda etapa de la red acelerográfica, la microzonificación sísmica y la elaboración del proyecto de norma y construcción sismorresistente, si los resultados obtenidos así lo ameritan.

2. Enfoque y metodología

Este es el marco metodológico a través del cual se enlazan las metodologías y resultados de cada actividad.

Se propuso el método de aproximaciones sucesivas, empezando con recopilación y análisis de la información disponible (primer nivel de aproximación) hasta la realización de las campañas de geofísica (segundo y tercer nivel de aproximación) y estudios geológicos regionales y locales.

Uso de datos para tres niveles de microzonificación

| | Etapa | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
|-------------------------|-------|--|---|--|
| Movimientos del terreno | 1 | <ul style="list-style-type: none"> • Mapa de unidades geológicas superficiales. • Distribuciones de daños por sismos (Catálogo de efectos en Buenaventura – Sismicidad histórica). | <ul style="list-style-type: none"> • Mapa de zonificación a las microtrepidaciones. • Perfiles de refracción sísmica longitudinales de velocidades de onda S. | |
| | 2 | | <ul style="list-style-type: none"> • Zonificación geotécnica a partir de estudios disponibles. | <ul style="list-style-type: none"> • Investigación geotécnica. • Análisis de respuesta del suelo • Zonificación geotécnica. |

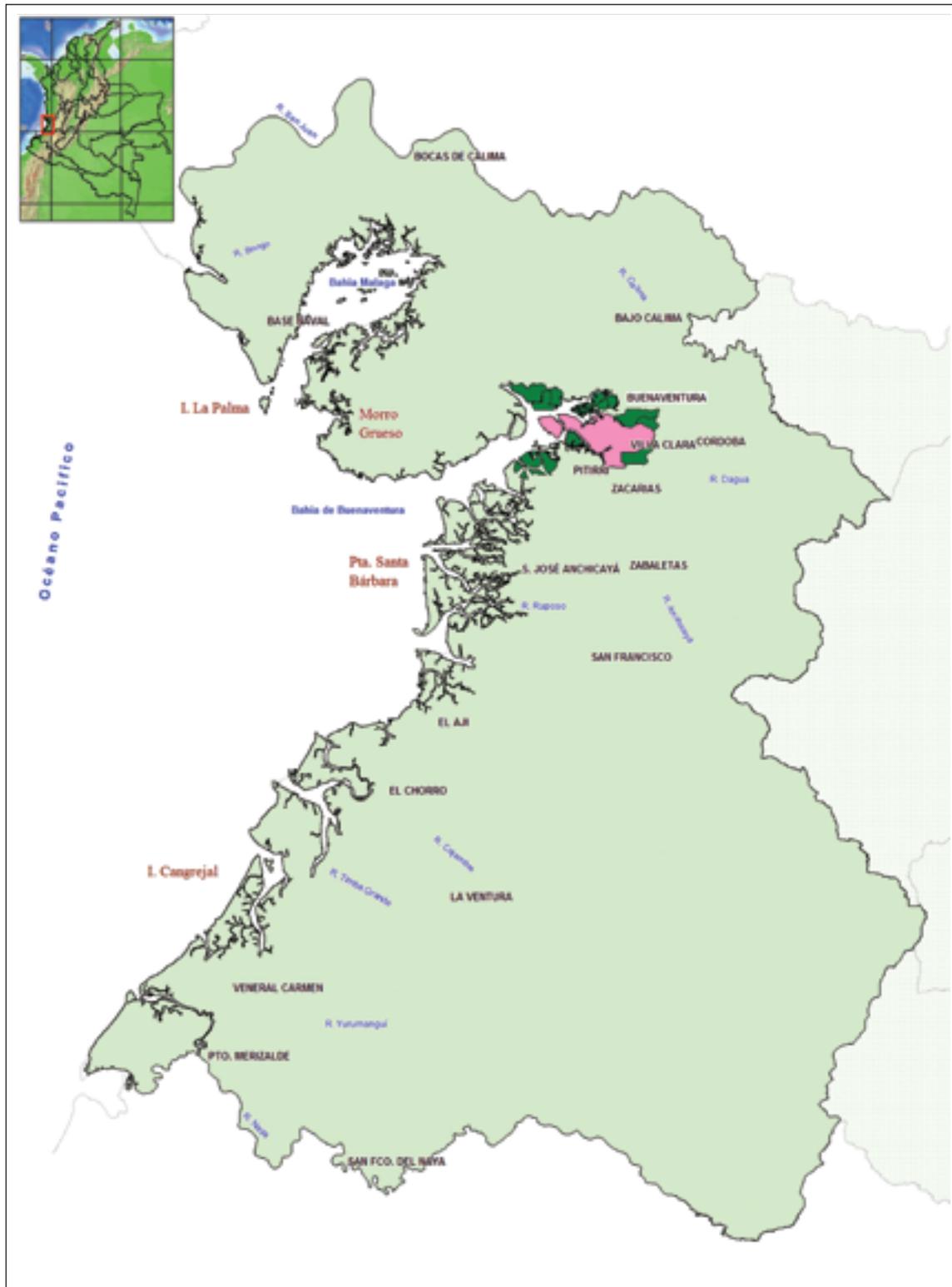
La metodología para microzonificaciones sísmicas está estandarizada en el mundo, por ejemplo, a través de las normas y recomendaciones de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), o en el caso de Colombia, a través de normas nacionales, como es el caso de las recomendaciones para microzonificación en la norma sismorresistente de Colombia. Esta metodología básica se va adaptando a los avances científicos y técnicos, y además se ajusta a las circunstancias y disponibilidades particulares en cada país o proyecto. En las investigaciones geológicas de fuentes se priorizó el área más próxima a la ciudad (hasta ~50 km), se instaló una red sísmica local temporal para observar con mayor detalle fuentes en esta área próxima, y se realizaron estudios de depósitos geológicos formados por olas de tsunami, vestigios datables de sismos grandes en la zona de subducción.

3. Buenaventura

12

Con una extensión de 6.078 km², Buenaventura es el municipio más extenso del Valle del Cauca. Hacia el sur está limitado por terrenos cenagosos que se extienden hasta el municipio de López de Micay y por el norte por los terrenos selváticos del departamento del Chocó. Tiene una población cercana a los 329.000 habitantes, según el censo del 2005, y está cruzado por numerosos y caudalosos ríos: Anchicayá, Bongo, Cajambre, Calima, Dagua, Guapi, Guapicito, La Sierpe, Mayorquín y Naya. Fue fundada el 14 de julio de 1539, por Juan de Ladrilleros, y es municipio desde 1872. Su ubicación se observa en el siguiente mapa:

Figura 1. Localización del municipio de Buenaventura



El municipio de Buenaventura está integrado por los corregimientos de Barcos, Bocas del San Juan, Calle Honda, El Carmen, Cisneros, El Patico, El Tigre, Gamboa, Guadualito, Kilómetro 43 o Triana, La Trojita, Mayorquín, Nicolás Ramos Hidalgo, Potedó, San Antonio de Yurumanguí, San Isidro, San Lorenzo, San Pedro de Naya, Silva y Taparal; la ciudad está dividida en 12 Comunas, de las cuales 4 pertenecen a la zona insular y 8 a la zona continental. Las de mayor importancia económica son las localizadas en la isla de Cascajal, pero la más poblada es la número 12, en la zona de acceso a la ciudad.

Su principal actividad económica es el movimiento portuario, en la que es primera en el país, por lo que su funcionalidad es de vital importancia estratégica: a través de su puerto, Colombia envía al exterior cerca del 80% del café y del 60% de todas las exportaciones, y recibe un porcentaje igualmente alto de las importaciones. La restante actividad económica se reparte en los sectores de pesca marina y fluvial, explotación forestal, comercio y minería.

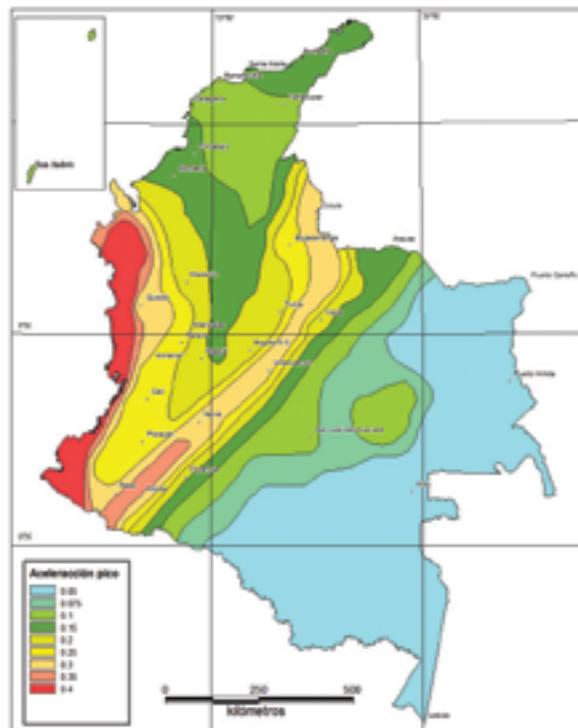
La principal actividad económica de Buenaventura es el movimiento portuario, en la que es primera en el país, por lo que su funcionalidad es de vital importancia estratégica, lo que hace que cobre especial importancia la prevención sísmica.

El occidente colombiano (y por lo tanto el litoral Pacífico y Buenaventura) es la región de mayor amenaza sísmica en el país, como puede observarse en las Figuras 2a y 2b. Mayor amenaza significa que aquí pueden ocurrir terremotos más grandes y más frecuentemente. Las vibraciones fuertes generadas por terremotos pueden causar daños a las viviendas, edificios, vías, sistemas de agua y alcantarillado e instalaciones portuarias, a la vez que heridas a la gente, inclusive muerte, por el derrumbe de edificaciones sin la adecuada resistencia a las ondas sísmicas fuertes. Las vibraciones de los sismos también pueden generar deslizamientos, corrimientos de tierra en las orillas de los esteros y licuación de los suelos blandos saturados de agua. El Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (Ley 1400 de 1997) prescribe que en la región de Buenaventura –y en general, para todo el litoral Pacífico– se debe diseñar para aceleraciones sísmicas equivalentes al 40 % de la fuerza de la gravedad (las más altas para todo el territorio nacional) y que las ciudades con más de 100.000 habitantes deben dotarse de un estudio de microzonificación sísmica para que los ingenieros y constructores diseñen las viviendas, edificios y obras de infraestructura de tal manera que resistan las fuerzas a las cuales pueden ser sometidas durante un terremoto.

Figura 2a. Mapa de fuentes sísmicas



Figura 2b. Mapa de amenaza sísmica nacional



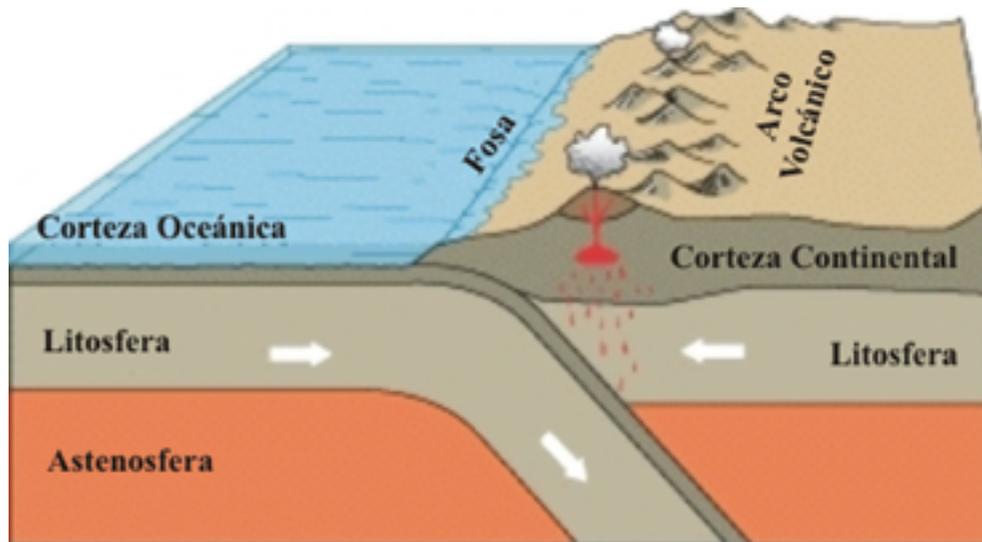
En la Figura la parte **a** corresponde a las fuentes sísmicas (fallas) incluidas en el Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia, que se traduce en la zonificación mostrada en la parte **b** de la misma (los niveles de aceleración esperables según la norma sismorresistente colombiana). AIS, 1997

4. Resultados

4.1. Elementos para la evaluación de las fuentes sísmicas

El municipio de Buenaventura está localizado sobre la fuente sísmica primaria y más importante del territorio colombiano, la zona de subducción del Pacífico, que puede verse en la Figura 3. Con base en el conocimiento hasta ahora disponible en cuanto a qué tanto pueden actuar las fallas para generar terremotos grandes, por ejemplo la zona de subducción, la norma sismorresistente colombiana vigente le asigna a Buenaventura el valor de aceleración más alto (el 40% del valor de la gravedad) entre las ciudades colombianas con más de 100.000 habitantes. El continuo mejoramiento del modelo sismotectónico para la región y el área de Buenaventura es, entonces, de la mayor importancia. Los estudios de la Etapa 1 no fueron concluyentes sobre rupturas de la zona de subducción frente a Buenaventura, en la costa vallecaucana, ya que no hay evidencia instrumental de sismos fuertes frente a la misma. Además, investigaciones disponibles indican que la mayor cantidad de energía sísmica en los grandes sismos del siglo pasado se liberó al sur y que la cantidad de energía liberada en el segmento vallecaucano fue mínima, como ocurrió durante el terremoto del 12 de diciembre de 1979.

Figura 3. Zona de subducción



16

4.1.1. Sismicidad histórica

Consistió en la investigación de los efectos de sismos que en la historia de la ciudad han generado daños. Con esta actividad se aportó a la respuesta de las siguientes preguntas principales: ¿Cuántos sismos han producido daños a lo largo de la historia de la ciudad? ¿En cuáles fuentes sísmicas se generaron esos sismos? ¿Cuáles son los tipos de efectos o daños que produjeron, en cuáles sitios y en qué tipo de terrenos?

El estudio de la sismicidad histórica permitió identificar 51 eventos con efectos en Buenaventura. La fuente más recurrente con daños es la zona Wadati–Benioff (continuación de la placa que subduce, Nazca, en profundidad, después de chocar con el continente, a unos 40 km o más bajo la superficie), con sismos aproximadamente cada década desde que se registran. Los principales sismos de esta fuente ocurrieron en 1925, 1938, 1957, 1960 y 1961, 1979 (23 de noviembre) y 1995. Los sismos generados frente al litoral, al norte de Buenaventura, en noviembre de 1991 y noviembre de 2004, produjeron efectos en la ciudad mientras que sismos de la zona de subducción, en 1906 y diciembre de 1979, al parecer no generaron efectos importantes. Las fuentes de estos sismos pueden observarse en la Figura 4. El terremoto de 1906 está pobremente documentado en lo que respecta a Buenaventura y, además, la ciudad era muy pequeña, confinada a la isla Cascajal y con construcciones de un piso, en madera, con techo de paja. El de 1979, a su vez, produjo pánico y solamente daños menores.



Relator, 24 de mayo de 1957

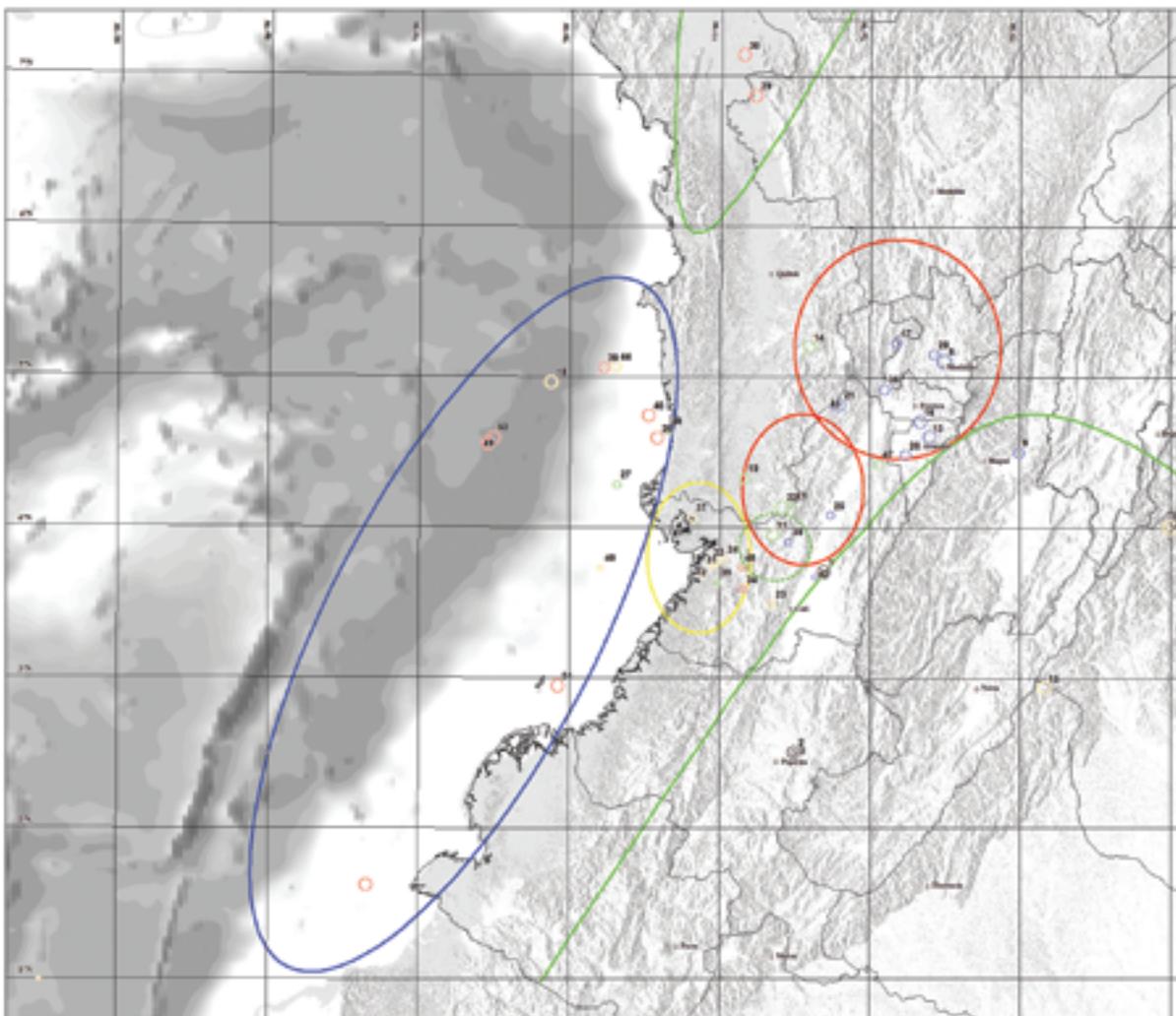
La sismicidad de fuentes superficiales lejanas ha tenido poca influencia en la ciudad.

Se encontró que la zona de actividad sísmica registrada por instrumentos en cercanías de la ciudad ha generado sismos sentidos, pero no se tiene reporte de daños asociables a sismos de esta fuente.

Sismos relativamente cercanos, como el de noviembre de 1991 en el delta del San Juan y el de noviembre de 2004 en Pizarro, produjeron daños pero no tan intensos como los causados en Cali, ciudad localizada casi al doble de distancia de la fuente. Los daños en Cali, en edificios altos, se debieron a condiciones de efecto local de espesos depósitos de arcillas, que no los hay en Buenaventura.

La fuente de sismos más recurrente con daños en Buenaventura es la zona Wadati – Benioff, con sismos aproximadamente cada década desde que se registran. Los principales sismos de esta fuente ocurrieron en 1925, 1938, 1957, 1960 y 1961, 1979 (23 de noviembre) y 1995.

Figura 4. Fuentes sísmicas principales que han afectado a Buenaventura



La figura azul señala la zona de subducción; las rojas, la zona de Wadati-Benioff; en verde se muestran las fuentes superficiales lejanas a la ciudad, y en amarillo las fuentes superficiales cercanas.



4.1.2. Fallas geológicas continentales activas

Todos los terremotos se originan por ruptura y desplazamientos de las rocas a lo largo de un plano denominado “falla geológica”, una fractura en la corteza terrestre, causada por los esfuerzos que generan movimientos en el interior de la Tierra. Cuando una falla rompe cerca de la superficie de la Tierra el movimiento puede quedar registrado y observarse como el desplazamiento de capas de suelos. Las fallas bajo el mar o aquellas profundas como las producidas por el roce entre la placa de Nazca y el continente, solo son observables por métodos indirectos, esto es, el registro con sismógrafos de las vibraciones producidas por cada ruptura. Las fallas más superficiales en el continente pueden dejar su huella expresada como rupturas de las capas más superficiales o como deformaciones en los terrenos, alineación de colinas y desplazamientos y cursos rectos de los cauces de ríos y quebradas.

Mediante el uso de mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite se identificaron los rasgos topográficos típicos de fallas que han tenido rupturas en los últimos miles de años hasta una distancia de 50 km del área urbana. Las preguntas a responder fueron: ¿Dónde se localizan las fallas geológicas que pueden producir terremotos que afecten la ciudad? ¿Cuál es su grado de actividad en términos de magnitudes máximas probables y tiempo en el cual pueden activarse?

Debido a que el registro histórico de terremotos sólo abarca los últimos cientos de años desde la Colonia y el registro instrumental apenas varias décadas, y porque los terremotos mayores tienen periodos de retorno promedio que pueden superar los varios centenares y miles de años, la investigación de las fallas en el continente se complementó con la búsqueda de efectos de terremotos grandes causados por la zona de subducción, que por estar en el fondo del mar frente al litoral no es observable directamente.

En el radio de 50 km adoptado para evaluar fuentes cercanas (con mayor potencial de daños), se encontraron fallas activas como Las Bombas y San Cipriano, a unos 15 y 20 km al este de la ciudad, respectivamente, con magnitudes de momento máximas probables del orden de 6,7, periodos de retorno entre 500 y 7.000 años y tasas de movimiento de moderada a media-alta, entre 1,0 y 5,0 mm/año. A estas fallas, y a la falla Cisneros, que pueden observarse en la Figura 5, parece asociarse actividad sísmica instrumental registrada por la RedSW y analizada en el marco de este Convenio, como se describe en el siguiente numeral. Otras, como la falla Garrapatas, no muestran actividad sísmica reciente asociada.

En el sitio donde la falla Las Bombas cruza la carretera Simón Bolívar (vía a Sabaletas), se realizaron dos dataciones de trozos de madera localizados en la parte superior de la Formación Mayorquín. La primera datación dio una edad superior a 43.000 años y la segunda 37.000. Esto indica que al menos la última fase de sedimentación de dicha formación es geológicamente joven y, como se encontró, está deformada por la acción de la falla, significa que en épocas geológicas recientes se produjeron en ella terremotos, razón por la cual hay mérito para investigar con más detalle este sitio y otros por donde cruza la falla.

Figura 6. Fallas continentales activas en el municipio de Buenaventura y regiones cercanas



Falla Las Bombas



Las líneas en negro muestran los planos de falla, es decir, la superficie de desplazamiento.



4.1.3. Sismicidad instrumental en cercanías de Buenaventura

Comprendió el análisis de información sísmológica instrumental disponible de la RedSW entre 1989 y 2005. Se analizaron 52.779 registros y se seleccionaron aquellos cuya localización estaba a una distancia hasta de 50 km de Buenaventura. 4.893 eventos sísmicos fueron seleccionados para generar el catálogo de sismos superficiales cercanos a la ciudad que deben ser analizados en mayor detalle en la Etapa 2. Preliminarmente se encontró que la actividad sísmica cercana a la ciudad podría estar asociada con las fallas geológicas cercanas como Las Bombas y San Cipriano.

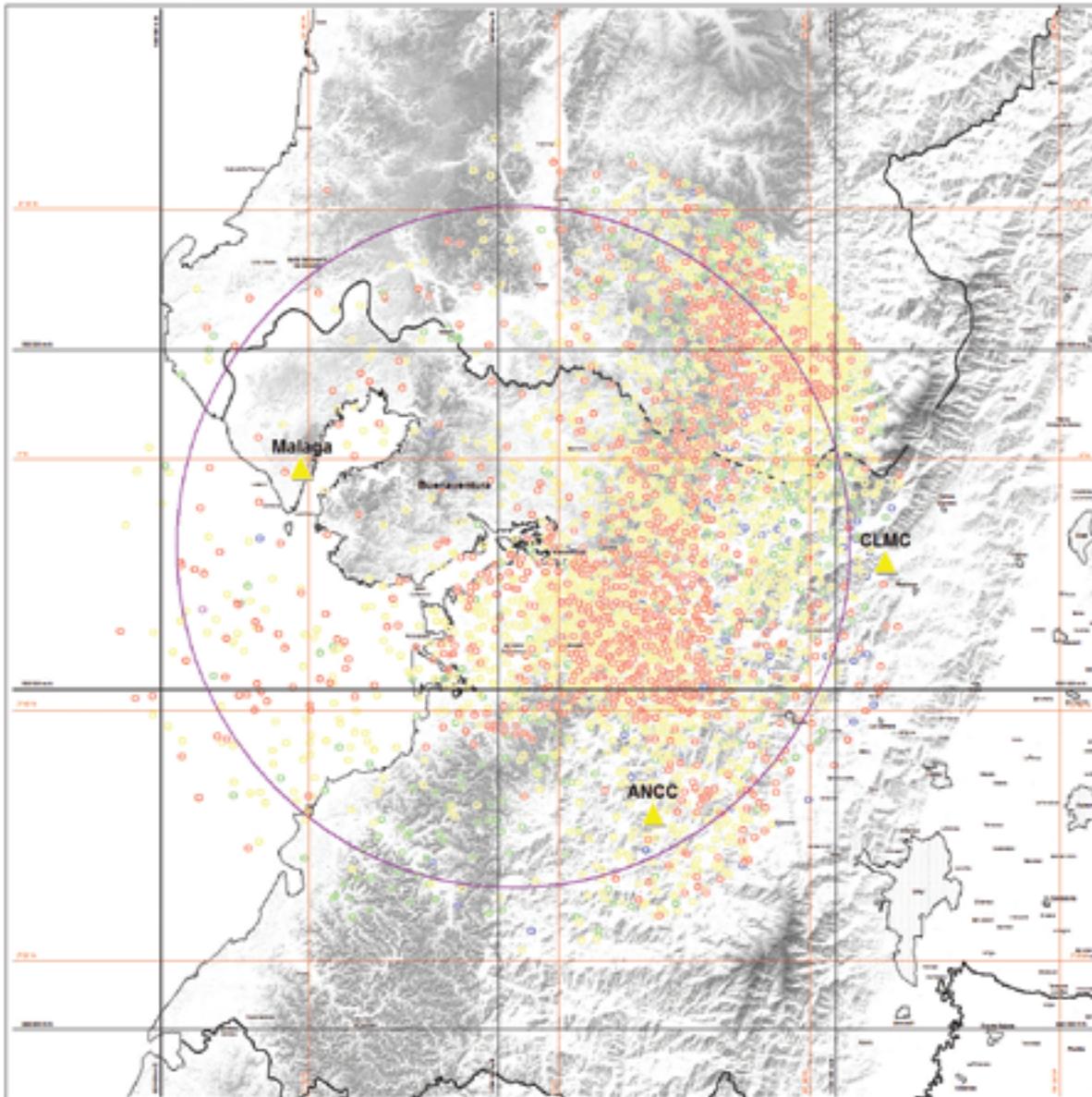
De manera complementaria la Corporación OSSO instaló una red sísmológica temporal de su propiedad, integrada por las estaciones Alto Anchicayá, Lago Calima y Bahía Málaga, que conforman un triángulo que abarca la sismicidad superficial cercana a la ciudad, de tal manera que los microsismos que ocurran podrán ser localizados y analizados adecuadamente, con la finalidad de identificar cuáles de las fallas presentan actividad, como se puede ver en la Figura 6. Las estaciones de esta red son digitales, de tres componentes cada una y los registros que se obtengan de ella serán entregados a la CVC y servirán para re-analizar la sismicidad instrumental del catálogo entregado, especialmente para mejorar el conocimiento sobre la actividad sísmica asociada a las fallas geológicas identificadas. La red temporal permanecerá en operación hasta la fecha de finalización del Convenio.

Por otra parte, un conjunto de eventos no asociado todavía a fallas conocidas se localiza a lo largo del litoral. Se propone como hipótesis que este conjunto de sismos podría estar relacionado con la prolongación al sur de la falla Bahía Solano, la cual también podría ser origen de los sismos de noviembre 19 y noviembre 15 de 1991 y 2004, respectivamente, que tuvieron efectos en Buenaventura.

4.1.4. Investigación de terremotos fuertes en el Litoral

Para disminuir la incertidumbre sobre sismos mayores que pudieron generar subsidencia de la costa y tsunamis, se adelantó una campaña de exploración mediante perforaciones de las cuales se extrajeron muestras de arenas, suelos y vegetación enterrados asociables a hundimientos del litoral durante grandes terremotos y/o a fuertes marejadas durante el fenómeno climático conocido como El Niño, durante el cual el nivel medio del mar en el Pacífico colombiano se incrementa hasta unos 30 cm. Las exploraciones se realizaron desde el sur del delta del San Juan hasta el río Naya. Se documentó que durante los sismos del 12 de diciembre de 1979 y 19 de noviembre de 1991 hubo hundimientos de la costa del orden de 1,4 metros en San Juan de La Costa (Nariño) y de 30 cm en El Choncho (delta del San Juan), que estos hundimientos generaron erosión en parte de las islas alargadas de arena (islas barrera) y depósito de arenas en otros lugares y que, finalmente, las islas San Juan de la Costa, El Choncho y Togoromá (Chocó), se rompieron por la acción complementaria de fuertes marejadas durante el fenómeno de El Niño ocurrido en los años 1997 – 1998.

Figura 5. Catálogo de sismicidad instrumental 1989 – 2005



Los triángulos en amarillo indican la localización de las estaciones que forman parte de la red temporal

22

Los terremotos mayores en el Pacífico generalmente producen hundimiento súbito de los terrenos, fenómeno que denominamos “subsistencia cosísmica”. Estos suelos son luego cubiertos por materiales de origen marino, si es que el sismo también genera olas de tsunami, o por nuevos terrenos formados sobre ellos por aportes de las mareas o los ríos. Se estudiaron 85 secuencias de suelos entre el delta del San Juan y el río Naya, mediante excavación de apiques (huecos de aproximadamente 1 m de profundidad) y recuperación de muestras de suelos hasta 2,5 m de profundidad adicional; se seleccionaron 62 muestras

con alto contenido de materia orgánica, que fueron analizadas mediante la técnica de Carbono 14, que permite conocer la edad, es decir, el tiempo transcurrido desde que los suelos estuvieron expuestos al aire libre antes de su hundimiento o cobertura por arenas y materiales aportados por los tsunamis o por las mareas y los ríos.



Los resultados de las 62 dataciones de suelos y muestras de materia orgánica enterrados permitieron comprobar que a lo largo de toda la costa examinada hubo hundimiento asociado con el terremoto de 1906 con más de 10 muestras que arrojaron resultados de alrededor de 110 años de antigüedad. Los reportes históricos de este sismo señalan que el tsunami generado llegó a toda la costa, incluido el delta del San Juan. Además, varios conjuntos de muestras dieron edades alrededor de los años 1450, 1050 y 710 de la era actual. Esto sugiere que pudo haber sismos importantes en esos años. Si investigaciones complementarias a los avances logrados hasta ahora confirman lo encontrado, podría llegarse a que en la zona de subducción ocurren sismos grandes, como el de 1906, con un periodo promedio de retorno del orden de 400 años. Otros conjuntos de dataciones dieron edades adicionales, por ejemplo alrededor de 180 y 250 años, pero el estado de la investigación (que requiere más exploraciones y dataciones al sur y al norte de la zona estudiada), no permite todavía tener certeza sobre si los datos se pueden asociar a otros sismos, grandes pero no extremos, como el de diciembre de 1979 y los de noviembre de 1991 y 2004.

4.2. Evaluación del efecto local

Como ya se mencionó, además de las características de las fuentes de terremotos (magnitudes máximas que pueden generar, periodos promedio de retorno) y de trayectoria (por ejemplo, atenuación sobre la distancia a la ciudad), la amenaza sísmica también está ligada a propiedades mecánicas y la estructura de los terrenos superficiales de la

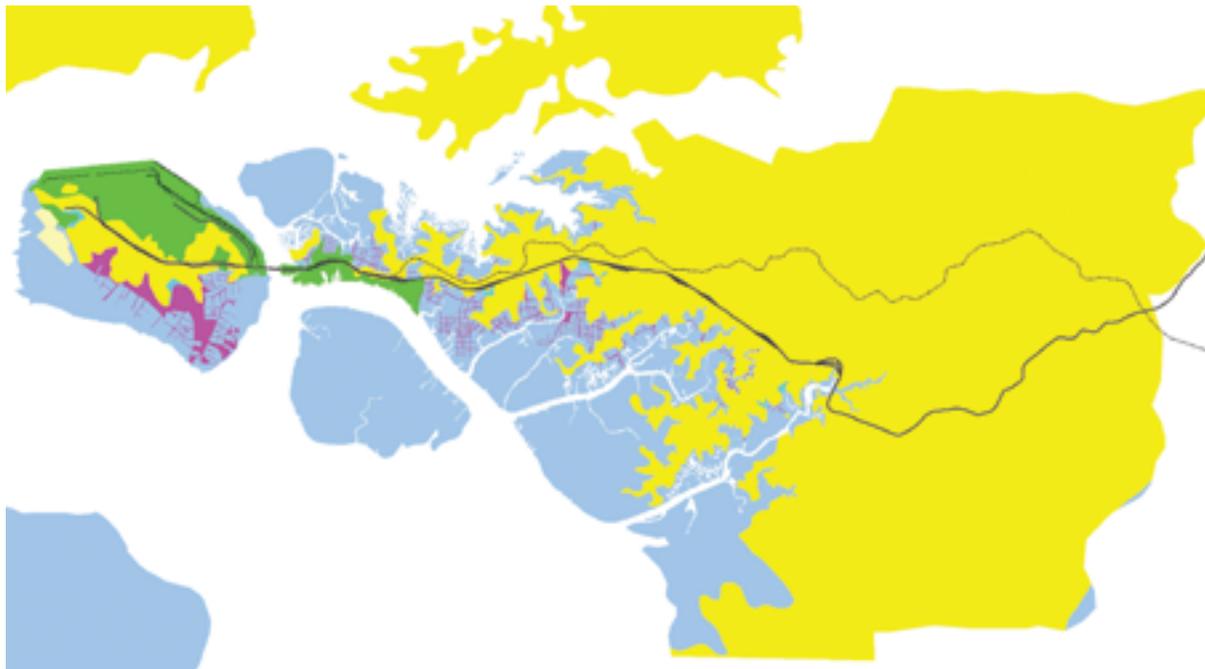
ciudad. Para generar el conocimiento sobre estos terrenos se realizaron investigaciones, acopio y análisis de información en los campos de la geología (tipos de suelos y terrenos), geotecnia (profundidad de los suelos de menor dureza, tipo de materiales), evolución del desarrollo urbanístico y portuario (localización y tipos de rellenos artificiales) y ensayos geofísicos (medición de las propiedades físicas de los terrenos mediante el uso de vibraciones sísmicas inducidas artificial y naturalmente).

4.2.1. Mapa de terrenos naturales y artificiales

Se elaboró la cartografía de las formaciones geológicas superficiales y de los rellenos artificiales, la cual se desarrolló mediante análisis de literatura disponible, fotografías aéreas, cartografía geológica, recorridos de campo y selección y análisis de estudios de suelos para obras civiles y datos geotécnicos a partir de perforaciones disponibles.

Se encontró, confirmó y mejoró el conocimiento sobre las formaciones geológicas superficiales, que básicamente son: (1) depósitos de lodos intermareales, (2) depósitos intermareales con rellenos heterogéneos de basuras y escombros para urbanización informal, (3) rellenos técnicos de gravas y alta densidad de pilotaje, con reemplazo de los lodos de las formaciones intermareales preexistentes y (4) suelos residuales (arcillas y limos blandos) derivados de la descomposición (meteorización) por acción del agua de las limolitas grises de la Formación Mayorquín, tal como aparece en el siguiente mapa:

Figura 7. Mapa de terrenos naturales y artificiales



En amarillo se muestran los suelos de la Formación Mayorquín; en verde los rellenos técnicos; en azul claro los depósitos intermareales y en fucsia los rellenos de basuras y escombros.



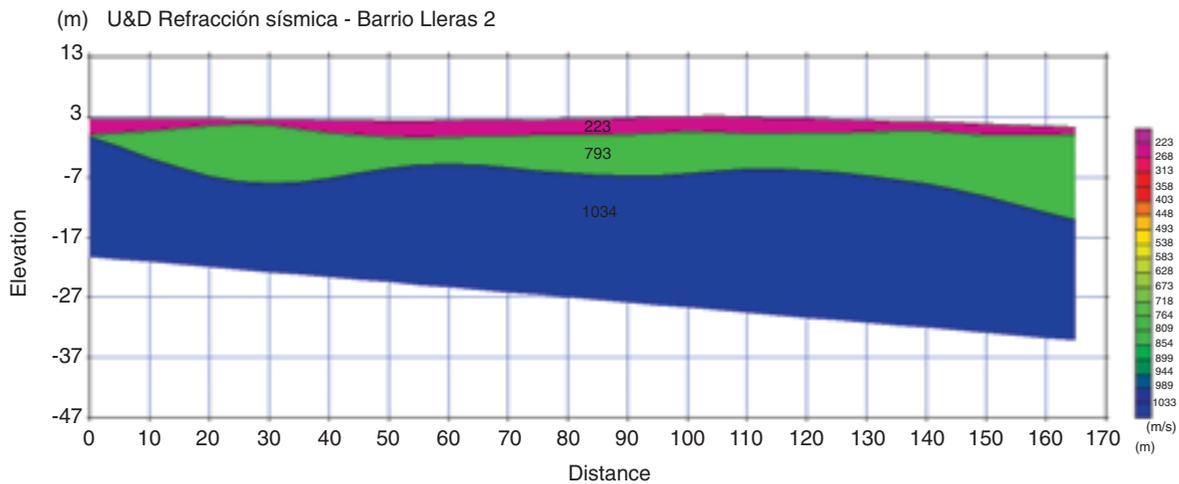
4.2.2. Estudios geofísicos

Con base en la cartografía de los tipos de terrenos naturales y artificiales se diseñaron campañas de exploración de las propiedades físicas de los terrenos y se ejecutaron doce perfiles de refracción sísmica, dos de reflexión sísmica y cuarenta y cuatro mediciones de vibraciones ambientales.

4.2.2.1. Perfiles de refracción y reflexión sísmica

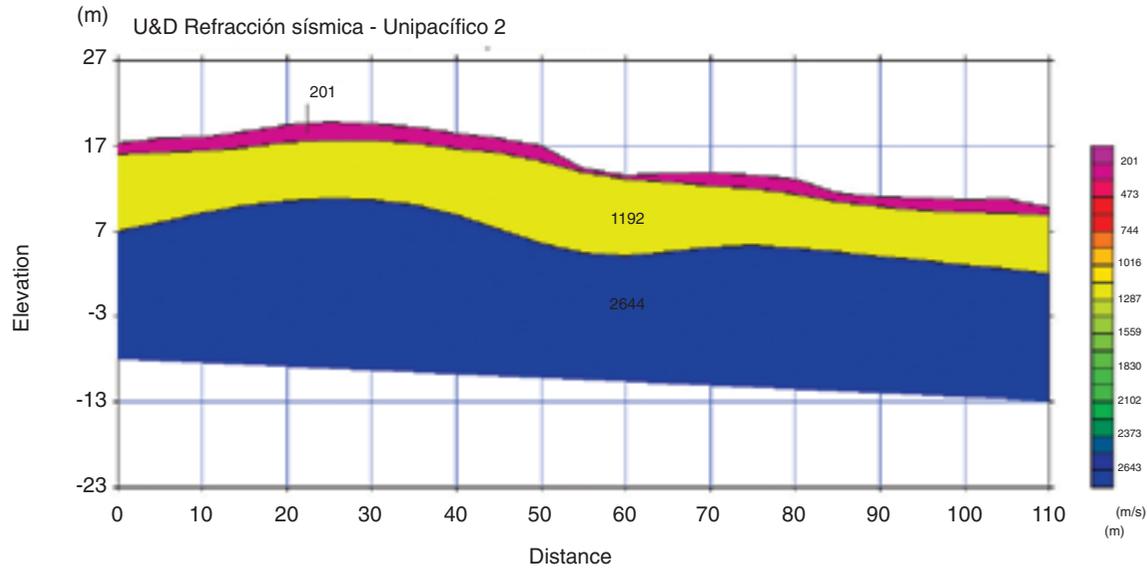
Los perfiles de refracción y reflexión sísmica consistieron en generar vibraciones artificiales mediante golpes de un martillo de 20 libras sobre una placa de acero y registro de las ondas sobre una línea de 12 sensores (geófonos) distanciados cada 5 m. Las ondas sísmicas generadas con el martillo viajan a diferentes velocidades según la dureza de las capas que atraviesan (a mayor dureza es mayor la velocidad de viaje de las ondas), de tal manera que mediante cálculos de los tiempos de llegada de las ondas a cada geófono se conoce la profundidad o espesor de cada capa y la velocidad promedio con que viajan las ondas a través de cada una.

Figura 8. Perfil de refracción sísmica, barrio Alberto Lleras



De los reconocimientos de campo, la recopilación y análisis de estudios geotécnicos y perforaciones disponibles y la realización de los perfiles de refracción sísmica, se concluye que los suelos (arcillas y limos blandos) derivados de la Formación Mayorquín, sobre la cual se asienta más del 90 % de la ciudad, tienen espesores generalmente del orden de 3 a 10 m, con máximos de 25 m. Estos suelos también reposan bajo los lodos intermareales y los rellenos antrópicos.

Figura 9. Perfil de refracción sísmica, Universidad del Pacífico



Los perfiles de refracción sísmica se complementaron con dos perfiles de reflexión que en conjunto permitieron explorar profundidades de mínimo 50 y 80 m, respectivamente, encontrando que bajo los suelos residuales y la roca descompuesta más blanda, la Formación Mayorquín está conformada por capas horizontales superpuestas de limos duros de color gris, con velocidades de ondas sísmicas equivalentes a roca según la norma sismorresistente colombiana. En general se halló que bajo la capa de suelos blandos ya señalada la velocidad de viaje de las ondas es de 2.000 metros por segundo o más.

4.2.2.2. Mediciones de vibraciones ambientales

Son las vibraciones del terreno provenientes de diferentes fuentes: agua, lluvia, vehículos, gente... La técnica por medio de la cual se miden se fundamenta en que cada cuerpo de la Naturaleza, en este caso cada tipo de terreno, tiene un periodo natural de vibración característico y una capacidad de amplificar o de no amplificar las ondas que viajan a través de él. Para medir esta propiedad de los terrenos se realizaron 44 mediciones que consistieron en disponer un sensor con tres componentes, esto es, con tres geófonos, uno sensible a las vibraciones verticales y otros dos, perpendiculares entre sí, sensibles a las vibraciones horizontales. En cada sitio se registró, durante un mínimo de 20 minutos, cómo vibran los terrenos por la acción del tráfico de vehículos, oleaje, viento y por otros agentes. El método permite llegar muy rápida y eficazmente a medir si el suelo amplifica las ondas y la frecuencia de las mismas, el parámetro más importante del efecto local.

Medición de vibraciones ambientales



Los datos de las mediciones de vibraciones ambientales, distribuidas en los diferentes tipos de terrenos, se agrupan según la frecuencia de las ondas que, dado el método, el suelo amplifica preferencialmente. Se encontró que en los rellenos heterogéneos de basuras y escombros ocurre amplificación de las ondas con frecuencias del orden de 1,8 a 2,1 Hz; en los rellenos técnicos para obras portuarias y edificaciones importantes no hay amplificación (tienen comportamiento equivalente a roca), mientras que los suelos blandos y roca descompuesta de la Formación Mayorquín tienen dos comportamientos diferenciados: (a), depósitos de lodos intermareales, isla Cascajal y porción W del continente, donde predominan colinas alargadas entalladas entre los esteros Aguacate y San Antonio, con frecuencias entre 3,6 y 5 Hz y, (b), porción oriental del continente con frecuencias arriba de 5,0 Hz hasta 10 Hz o sin pico predominante de amplificación o respuesta plana. Esto se puede observar mejor en el mapa de la Figura 10.

4.2.3. Mapas urbanos de daños por sismos

Además de aportar al conocimiento de las fuentes de sismos fuertes, la investigación sobre sismicidad histórica también permite evaluar el efecto local por suelos, identificando áreas urbanas de mayor o menor concentración de daños. Con este fin se realizaron mapas de distribución de daños para varios sismos, encontrándose que éstos se concentran, en términos de severidad, en los rellenos heterogéneos de basuras y escombros; en segundo lugar en las colinas de suelos blandos y roca descompuesta en Cascajal y la

Figura 10. Mapa de periodos naturales de los suelos por vibraciones ambientales



Los círculos representan el periodo de los suelos, medido a partir de las vibraciones ambientales: el color rojo indica el rango entre 0,47 y 0,55 segundos, en verde 0,2 y 0,4 segundos, y el azul entre 0,14 y 0,2 segundos. Los círculos morados (de menor tamaño) indican que el suelo –en el rango de observación– no tiene periodo de vibración predominante. Los periodos de vibración de suelos ente 1 y 10 segundos correlacionan con los periodos de los sismos que más daños pueden generar. Si éstos coinciden con el periodo de vibración del edificio, los daños pueden ser más críticos. Generalmente un edificio de 10 pisos tiene un periodo de 0,1 segundos y una casa de 2 pisos un periodo de 0,5.

porción occidente del continente y sólo algunos daños menores en las otras unidades de terrenos (Rellenos técnicos y porción oriental del continente). (Ver mapa Figura 11).

El estudio de la sismicidad histórica también permite evaluar el efecto local por suelos e identificar áreas urbanas de mayor o menor concentración de daños.

4.2.4. Red acelerográfica

28

Con la instalación de una red de acelerógrafos en el área de interés, se busca determinar el efecto de sitio, visible en la Figura 12, producido por las condiciones geológicas superficiales. Así, se puede establecer cómo contribuye un tipo de terreno en particular (depósitos de suelo, roca) en la amplificación de las señales sísmicas.

Para esto, se instaló una red de cinco (5) estaciones acelerográficas, ubicadas estratégicamente, como resultado de un proceso de búsqueda de sitios, los cuales

Figura 11. Distribución de daños por el terremoto de Pizarro del 15 de noviembre de 2004

Las estrellas indican daños leves de viviendas y los círculos indican destrucción de las mismas.

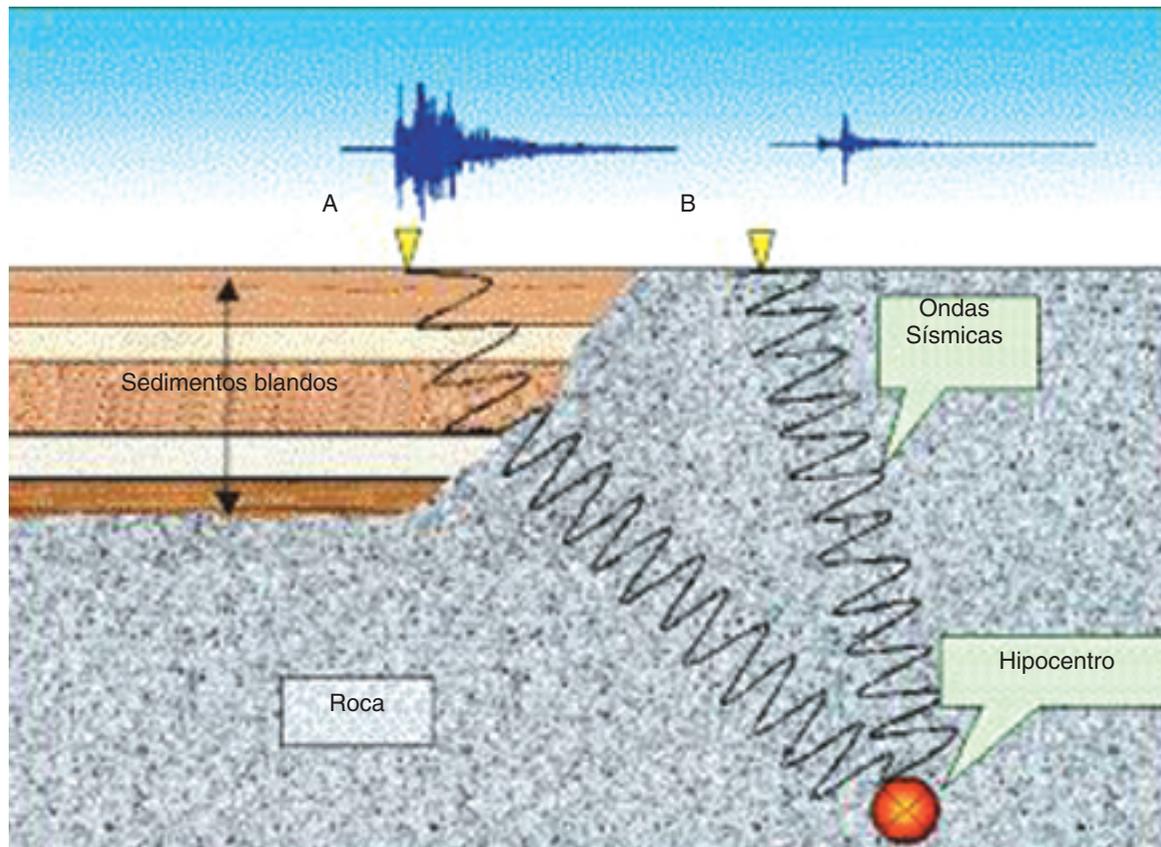
incluyen una (1) estación ubicada en roca (que funciona como estación de referencia), con el fin de determinar los efectos de amplificación de las señales sísmicas (efecto de sitio), en las otras estaciones.

Se trata de equipos autónomos que pueden registrar datos en forma continua, durante largo tiempo.

Para la instalación de esta red se seleccionaron cinco sitios representativos de los tipos de terreno previamente identificados, para cubrirlos todos, agrupados según su respuesta al paso de ondas sísmicas, determinada por las mediciones de vibraciones ambientales y atendiendo, además, a criterios de seguridad y disponibilidad de instituciones con las cuales la CVC pudiera realizar convenios de comodato para la construcción de las casetas que albergan los equipos. Para situar el acelerógrafo de referencia se seleccionó el sitio con mayor dureza de suelos (o sea, menor efecto local), encontrado por revisión geológica y confirmado mediante perfiles de refracción y reflexión sísmica y por mediciones de vibraciones ambientales; se trata de la nueva sede de la Universidad del Pacífico en la vía Simón Bolívar, camino al aeropuerto de Buenaventura.

Después se llevó a cabo la gestión de convenios de comodato con instituciones para el préstamo del terreno y se construyeron las casetas para instalar los cinco acelerógrafos. Para adquirirlos, a su vez, se hizo una selección técnica y económica de proveedores de equipos, así como su compra y nacionalización.

Figura 12. Efecto de sitio

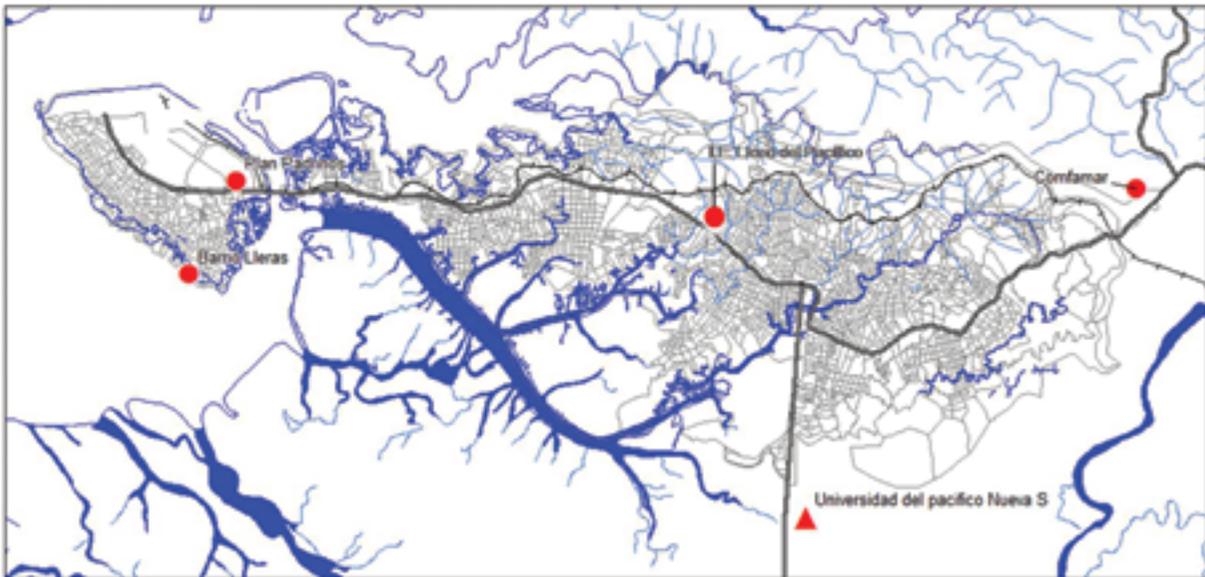


La red acelerográfica urbana permanente de propiedad de la CVC, que operará en el largo plazo, está compuesta de cinco estaciones. Todas son digitales y cuentan con las más altas especificaciones. Están ubicadas en terrenos de relleno de basuras y escombros, en un espacio facilitado por la Junta de Acción Comunal del barrio Alberto Lleras Camargo, en suelos blandos y roca descompuesta de la Formación Mayorquín en el sitio Plan Padrinos en la isla Cascajal, en el Liceo del Pacífico en la porción occidental del continente y en el Club Comfamar, en el extremo oriental del área urbana, como se ve en la Figura 13.

30

Como resultado de esta actividad se tiene la red instalada y en funcionamiento, de tal manera que durante eventos sísmicos futuros se dispondrá de registros de la aceleración que ocurra en cada sitio, que serán insumos para mejorar cada vez más los llamados “espectros de diseño”, esto es, los valores con los cuales se deben calcular las edificaciones para que sean construidas con la resistencia suficiente a las fuerzas inducidas por las vibraciones sísmicas en cada microzona de la ciudad.

Figura 13. Red Acelerográfica de Buenaventura

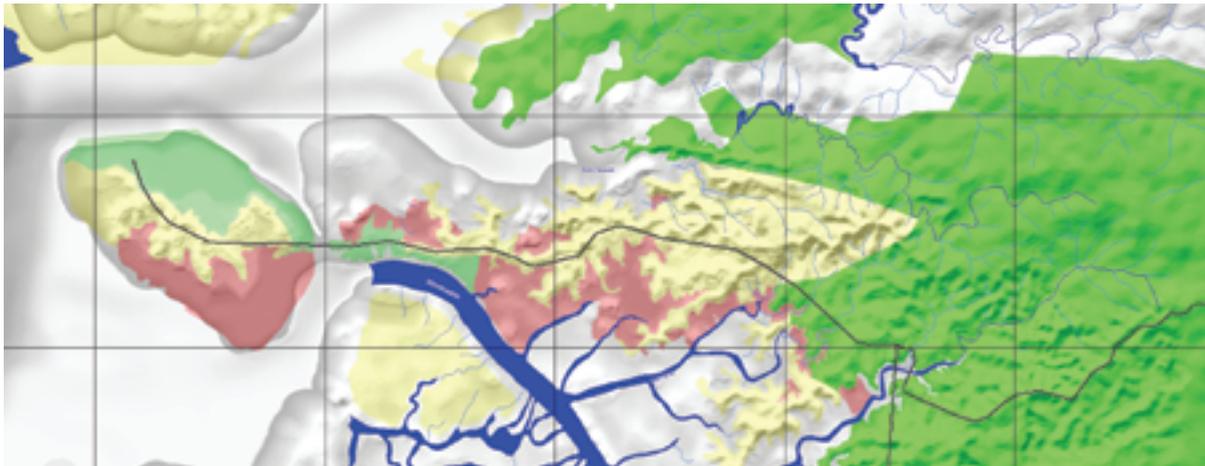


5. Zonificación preliminar de Buenaventura

Con base en el mapa de tipos de terrenos de la ciudad y los conjuntos de datos de las vibraciones ambientales, se compuso el mapa de zonificación sísmica preliminar de Buenaventura. En este punto es útil recordar que el propósito primario de la microzonificación sísmica, en cuanto a efecto local, es proveer parámetros de respuesta para toda la gama de periodos de las posibles edificaciones que se puedan construir sobre determinado terreno.

Todos los objetos en la Naturaleza tienen una frecuencia de resonancia propia. De lo que se trata es de evitar que la frecuencia de resonancia de las edificaciones coincida con la del suelo, lo que maximizaría los daños.

Figura 14. Mapa de zonificación sísmica preliminar de Buenaventura



El color guayaba señala rellenos heterogéneos de basuras y escombros sobre lodos, con mayores amplificaciones; el color amarillo, depósitos intermareales y suelos de la Formación Mayorquín con amplificaciones intermedias; el verde claro señala rellenos técnicos (gravas y pilotajes densos) para obras portuarias y el verde más intenso, suelos duros de la Formación Mayorquín. En estas dos últimas zonas no hay o no se observaron amplificaciones importantes de las ondas (ver Figura 10).

32 6. Conclusiones

Las principales conclusiones de los estudios adelantados en la Etapa 1, que generan insumos para la microzonificación sísmica de Buenaventura, se sintetizan en los siguientes puntos:

- Se dispone de nuevos conocimientos sobre fallas activas en cercanías de la ciudad, las cuales presentan evidencia de rupturas recientes en términos geológicos, en los últimos centenares a miles de años, con magnitudes estimadas esperables del orden de 6,7

grados. A estas fallas puede estar asociada la actividad sísmica actual, expresada en más de 4.800 sismos de pequeña magnitud, disponibles en un catálogo de un radio de 50 km alrededor de Buenaventura, el cual podrá ser re-analizado para asignar los eventos a fallas específicas, incluidas fallas todavía no documentadas en terreno.

- Se encontraron primeras evidencias que sustentan una recurrencia del orden de 400 años para sismos muy grandes, como el de 1906, en la zona de subducción.
- Hay evidencias que apuntan hacia que en la parte central y norte del litoral, es decir, más o menos desde Naya hasta Bahía Solano, no hay capacidad para liberación de momento sísmico alto.
- La fuente sísmica más relevante, en términos de daños históricos en la ciudad, es la zona de Wadati – Benioff, entre 40 y 100 km bajo el continente. Los daños por sismos de esta fuente ocurrieron en 1925, 1938, 1957, 1960, 1979 (noviembre) y 1995. Los sismos de subducción en 1906 y 1979 (diciembre) no produjeron daños tan severos como los anteriores, aunque debe aclararse que en 1906 la ciudad era muy pequeña, con edificaciones de madera de un piso.
- Los daños en la ciudad se han concentrado en terrenos de bajamar con rellenos de basuras y escombros y en la porción occidental del continente y la isla Cascajal. En el primer caso los terrenos amplifican las ondas sísmicas entre 1,8 y 2,2 Hz y en el segundo entre 2,5 y 5,0 Hz. Los demás tipos de terrenos amplifican arriba de 5,0 Hz, o no amplifican, con un comportamiento equivalente a roca, incluidos los rellenos de gravas y alta densidad de pilotaje.
- Se dispone de una red acelerográfica de cinco estaciones, en los diversos tipos de terrenos de la ciudad, y de una red sismológica temporal de tres estaciones. La primera aportará datos esenciales para la elaboración de espectros de diseño según los tipos de terrenos y la segunda permitirá conocer los parámetros de la sismicidad cercana a la ciudad y, por lo tanto, mejorará el conocimiento sobre el potencial de ocurrencia de sismos fuertes y cercanos.
- Se logró la elaboración de un mapa preliminar de microzonificación sísmica que agrupa los terrenos con características homogéneas atendiendo a varios criterios complementarios: tipo de suelo (dureza, espesores), natural o artificial, concentración de daños por sismos y frecuencias de respuesta del suelo.

7. Recomendaciones

- Proseguir con el estudio de la sismicidad instrumental, re-analizando el catálogo disponible en conjunto con los datos que, durante la duración del Convenio, aportará la sismicidad cercana a Buenaventura a través de la red sismológica temporal en operación (estaciones Alto Anchicayá, Bahía Málaga y Lago Calima).
- Analizar, previa disposición de cartografía detallada, ojalá a escala del orden de 1:10.000, o de imágenes detalladas de sensores remotos, el Andén Pacífico cercano al litoral,

con la finalidad de identificar posibles fallas activas (¿prolongación de la falla Bahía Solano?), que no tienen fuerte expresión en superficie, quizá porque las condiciones climáticas de la zona las hayan borrado.

- Desarrollar un programa de investigación a lo largo del litoral, como mínimo entre la región ya estudiada y la frontera con Ecuador, para verificar si los horizontes de suelos enterrados identificados corresponden a sismos mayores, como el de 1906, caso en el cual se llegaría a mayores certezas sobre los periodos de recurrencia probables para la mayor fuente de amenaza sísmica de Colombia y para evaluar el potencial de actividad del segmento de esta falla frente al litoral vallecaucano, el más cercano a la ciudad.
- Estudiar en detalle sitios propuestos para la realización de investigaciones adicionales en las fallas identificadas como activas, especialmente Las Bombas en la vía a Sabaletas - carretera Simón Bolívar y San Cipriano en el km 29 desde Buenaventura, carretera Alejandro Cabal Pombo.
- En la Etapa 2 se deberá llegar a definir si con los modelos vigentes y los nuevos datos sobre el potencial de actividad de la falla de la zona de subducción el valor de la aceleración asignada por la norma nacional para la región de Buenaventura prevalece o se modifica.
- Para la elaboración del mapa de microzonificación sísmica definitivo, serán necesarias mediciones de vibraciones ambientales adicionales y la realización de perforaciones, estudios geotécnicos, nuevos perfiles de refracción sísmica y sísmica *downhole* (medición directa de la velocidad de las ondas en cada capa, mediante la realización de pozos), así como ensayos de laboratorio y modelos numéricos.
- Finalmente, se recomienda para la segunda fase continuar con la metodología propuesta internacionalmente, adaptada durante la Etapa 1 ejecutada.

8. Glosario

Aceleración: una de las dimensiones fundamentales que definen un movimiento (como el de una onda sísmica); las otras dos son el desplazamiento y la velocidad. En la Ingeniería Sísmica es importante la aceleración porque permite calcular directamente las fuerzas que una onda sísmica genera en una estructura.

Contenido frecuencial: una de las propiedades de una vibración sísmica más relevantes para el diseño sismorresistente es la longitud de estas ondas, que se expresa generalmente mediante el 'periodo' (duración de una onda completa) o la 'frecuencia' (cantidad de ondas completas por unidad de tiempo). Vibraciones sísmicas suelen estar compuestas por ondas de diferentes longitudes, por lo cual se usa el término 'contenido frecuencial'. La frecuencia se mide en 'ciclos por segundo' o en 'hertz'(Hz). Una de las metas del diseño sismorresistente es evitar que la frecuencia dominante de las vibraciones coincida con la frecuencia de vibración de las edificaciones, para evitar efectos de resonancia.



Formación: un conjunto de capas geológicas que se caracterizan por tener rasgos comunes en tipo de roca o sedimento, origen, edad, etc. En el área de Buenaventura existen dos formaciones geológicas principales, ambas de origen sedimentario: la Formación Mayorquín, que consta de capas de limolitas de origen continental y marino, y la formación Raposo, caracterizada por acumulaciones de gravas y bloques redondeados de origen continental.

Limolita: un tipo de roca sedimentaria; se forma a partir de arenas muy finas (limos). Limolitas son un tipo de roca común en la Formación Mayorquín.

Meteorización: el proceso mediante el cual agentes externos a la tierra sólida (agua, vegetación, radiación solar) descomponen las rocas.

Microsismo: por convención, se llaman así los sismos con magnitudes hasta 3, tan pequeños que solo pueden ser detectados con instrumentos (sismógrafos). Son importantes – entre otras – porque ocurren con mucho más frecuencia que sismos de magnitudes mayores y así hacen posible la identificación y caracterización de fuentes sísmicas (fallas) en tiempos cortos.

Modelo sismotéctónico: representación de las fuentes o fallas geológicas como capaces de generar sismos con efectos en un lugar determinado, expresado en términos de magnitudes máximas esperables, periodo de retorno y distancia al lugar a evaluar.

Momento sísmico: es la medida moderna para cuantificar el tamaño de sismos, a partir de sismogramas; es el sucesor del concepto de la “magnitud de Richter”.

Periodo de retorno: un concepto fundamental del pronóstico sísmico probabilístico (aquel que se aplica en la prevención sísmica mediante la sismorresistencia), también llamado ‘recurrencia’; es el tiempo que en promedio transcurre entre la ocurrencia de dos terremotos de igual tamaño. El periodo de retorno se calcula a partir de la reconstrucción de la historia de la sismicidad en la región de interés. A partir del periodo de retorno se calcula el tamaño del terremoto más grande que podría ocurrir dentro del periodo de vida útil de una edificación.

Sismorresistente: el diseño y construcción resistente a sismos es la principal estrategia de prevención. Para lograr esta meta eficazmente es necesario conocer las características relevantes (aceleraciones máximas, contenido frecuencial, duración de las vibraciones) de los movimientos sísmicos más fuertes que pueden ocurrir durante la vida útil de las edificaciones.

Subsidencia cosísmica: proceso de hundimiento vertical del suelo por deformaciones regionales asociadas a esfuerzos en zonas de fallas. Subsistencia cosísmica es el hundimiento súbito (durante un sismo) de la costa en respuesta a los esfuerzos entre la placa oceánica y la placa continental. Durante el terremoto de diciembre de 1979 en la costa de Nariño se midieron hundimientos de 1.5 metros.

Zona de subducción: así se denominan las fallas geológicas propias de un frente de colisión entre dos placas tectónicas (una continental y otra oceánica). Este tipo de fallas

– como la existente sobre la margen de Suramérica en el Pacífico – son las que causan los terremotos más grandes y más frecuentemente; son las fuentes de sismicidad más importantes de la Tierra.

Acrónimos

AIV: Asociación de Ingenieros del Valle

CLOPAD: Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres

CVC: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

OSSO: Observatorio Sismológico del Suroccidente