



**CAPACITY BUILDING FOR NATURAL DISASTER REDUCTION (CBNDR)
REGIONAL ACTION PROGRAM FOR CENTRAL AMERICA (RAPCA)**

Caso de Estudio

**Amenaza Sísmica y Vulnerabilidad Física en la ciudad de
Cañas, Guanacaste, Costa Rica**

Por: A. Climent, D. Salgado, S. Slob y C. J. van Westen

Agosto 2003



Para mayor información contactar:

Dr. Cees van Westen
International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)
P.O. Box 6, 7500 AA Enschede, The Netherlands
E-mail: westen@itc.nl

Información sobre los resultados del proyecto RAPCA pueden ser obtenidos en la página de internet referenciada a continuación:

<http://bb.itc.nl>

Username: UNESCO

Password: RAPCA

Seleccione:

Organizations in which you are participating: UNESCO RAPCA

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVO	2
3	METODOLOGÍA.....	2
4	TECTÓNICA Y SISMICIDAD EN LA REGIÓN DE ESTUDIO	4
4.1	Marco tectónico regional	4
4.2	Proceso de subducción.....	5
4.3	Sistemas de fallamiento	5
4.4	Sismicidad Histórica.....	8
5	ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA.....	12
6	VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS EDIFICACIONES	19
7	CONCLUSIONES	24
8	RECOMENDACIONES.....	24
9	REFERENCIAS	25

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema simplificado para la estimación determinística de la amenaza sísmica.
- Figura 2: Marco tectónico regional de Costa Rica.
- Figura 3: Tectónica relacionada al fallamiento superficial en la región donde se ubica la ciudad de Cañas.
- Figura 4: Sismos históricos severos ($M_s \geq 6,0$) en el periodo 1985-2000, en la región donde se ubica la ciudad de Cañas y localización de los escenarios sísmicos.
- Figura 5: Esquema simplificado para la estimación de la amenaza sísmica determinística utilizando un SIG.
- Figura 6: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica, dado que ocurre un sismo de magnitud 7,7 en la península de Nicoya y asociado a la subducción.
- Figura 7: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica dado que ocurre un sismo de magnitud 6,5 en la falla Chiripa o Cote-Arenal.
- Figura 8: Mapa de condición físico-mecánica cualitativa de los suelos y rocas en la ciudad de Cañas y alrededores.
- Figura 9: Mapa de amenaza sísmica en valores de Intensidad MM en la ciudad de Cañas de acuerdo al escenario sísmico 1.
- Figura 10: Mapa de amenaza sísmica en valores de Intensidad MM en la ciudad de Cañas de acuerdo al escenario sísmico 2.
- Figura 11: Edificaciones tipo identificadas en la ciudad de Cañas.
- Figura 12: Mapa de riesgo sísmico en la ciudad de Cañas, cuantificado de acuerdo a la cantidad de daños esperado, dado que se presenta una Intensidad MM VII.
- Figura 13: Mapa de riesgo sísmico en la ciudad de Cañas, cuantificado de acuerdo a la cantidad de daños esperado, dado que se presenta una Intensidad MM VIII.

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Sismicidad histórica en la región noroeste de Costa Rica.
- Tabla 2. Relación entre escalas de intensidad y el potencial de daños.

PRESENTACIÓN

El presente estudio se ha desarrollado dentro del marco del *Regional Action Program Central America (RAP-CA)* subprograma del *Capacity Building for Natural Disaster Reduction Program (CBNDR)* de *UNESCO*. Dicho programa ha contado con el aporte económico de Holanda y la coordinación de CEPREDENAC como organismo regional en Centroamérica.

Los países participantes de este proyecto, todos los de la región incluyendo a Belice y República Dominicana como país invitado, recibieron capacitación en geo-amenazas - deslizamientos, sismos, inundaciones y erupciones volcánicas- preparación de mapas y zonificación de las mismas para su uso en programas de prevención, planificación y desarrollo urbano. Los métodos y técnicas aprendidas estuvieron basados en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La capacitación fue recibida en el International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC), Holanda, entre los meses de abril a julio del año 2000, incluyendo un caso de estudio y trabajo de campo realizado en la ciudad de Turrialba, Costa Rica.

Una vez finalizada la capacitación, cada país presentó un proyecto nacional de investigación. Para la ejecución del mismo los participantes contaron con el soporte técnico de profesionales y especialistas del ITC, Universidad Tecnológica de Delf (TUD) y la Universidad de Utrecht (UU) hasta el fin del proyecto a finales del año 2003. En el caso de Costa Rica se escogió la ciudad de Cañas como ciudad piloto para implementar el proyecto, coordinado por la CNE, ***Fortalecimiento de Procesos para el Manejo de Información sobre Amenazas y Riesgos en el Nivel Local***, del cual forma el estudio presente.

Por Costa Rica participaron la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE), El Instituto Costarricense de Electricidad ICE y el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), representados por los Srs. Douglas Salgado, Alvaro Climent y Sergio Barrantes respectivamente.

Le correspondió al Ing. Climent del Área de Amenazas y Auscultación Sismo-Volcánica del Centro de Servicio Exploraciones Subterráneas (PySA) del ICE la coordinación del presente estudio, el cual contó con el apoyo del Sr. Salgado y la consultoría técnica de Cees Van Westen y Seifko Slob del ITC.

RESUMEN

En el presente estudio se realizó una cuantificación del efecto de la tectónica y la sismicidad de Costa Rica en la ciudad de Cañas, por medio del cálculo de la aceleración horizontal pico del terreno y de la Intensidad Mercalli Modificada (IMM), que definen el grado de amenaza sísmica en la misma. Además se obtuvieron mapas cualitativos de vulnerabilidad física de las edificaciones de la ciudad, utilizando el archivo digital del catastro de la ciudad y una base de datos relacionada, obtenida del censo e inventario realizado dentro del marco del proyecto, que incluye este estudio en particular.

De la información sismológica recopilada en las bases de datos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), así como de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR), se indica que históricamente se ha reportado la ocurrencia de varios sismos severos en la región donde se localiza la ciudad de Cañas, como por ejemplo el ocurrido el año 1950 (Ms 7,7) asociado a la subducción, o el de 1973 (Terremoto de Tilarán, Ms 6,5) asociado con el fallamiento superficial (falla Chiripa), y cuyo epicentro se ubico aproximadamente a 22 km de Cañas.

Los resultados obtenidos del análisis determinístico de amenaza indican que en el caso de ocurrir un evento sísmico de magnitud 7,7 en la península de Nicoya y asociado a la subducción, la ciudad de Cañas experimentaría una sacudida sísmica de grado VIII en la escala Mercalli Modificada y de grado VII a VIII en el caso de ocurrir en evento de magnitud 6,5 en la falla Chiripa o la Cote-Arenal. Estos valores coincidiendo con las mayores intensidades reportadas en el siglo XX en la región noroeste de Costa Rica. Ambos eventos considerados los escenarios sísmicos más adversos para la ciudad de Cañas.

De acuerdo con los valores de intensidades estimados, se podría esperar que en la ciudad de Cañas, se presenten niveles de intensidad sísmica cuya sacudida sería percibida como muy fuerte. Un 32 % del total de las edificaciones se verían afectadas considerablemente en el caso de presentarse una I(MM) de grado VII, y un 50 % en el caso de VIII. Las viviendas que se verían mayormente afectadas, será debido a problemas de diseño, malas prácticas constructivas o deterioro físico por edad y falta de mantenimiento. Efectos más severos podrían presentarse en sitios muy puntuales debido a condiciones de suelos especiales (amplificación, licuefacción, deslizamientos) o a malas prácticas de diseño y construcción de las obras o infraestructura.

1 INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un país tectónicamente activo y de alta sismicidad, caracterizado por la ocurrencia periódica de eventos sísmicos con características destructivas (terremotos). Al igual que el resto del país, la ciudad de Cañas se encuentra localizada dentro de importantes zonas sismo-tectónicas, por lo que se considera de suma importancia el evaluar y estimar la severidad con que estas estructuras geológicas amenazan sísmicamente dicha ciudad y el efecto que la misma tendrá sobre las edificaciones.

Los eventos sísmicos pueden provocar interrupción y daños en las actividades socio-económicas e infraestructura de una región en particular. El grado de afectación está en función del grado de vulnerabilidad de las mismas. La experiencia ha demostrado que con una acertada planificación y la aplicación de medidas preventivas y correctivas para reducir la vulnerabilidad se puede minimizar el efecto de la ocurrencia de un evento sísmico. Por lo tanto, el conocer el nivel de exposición sísmica y la vulnerabilidad de las edificaciones en la ciudad de Cañas, permitirá a las instituciones correspondientes utilizar dicha información para la preparación de planes relacionados con el uso del suelo, planificación urbana e implementación del uso de normativas de diseño y construcción que aseguren un comportamiento adecuado de las estructuras cuando ocurra un evento sísmico severo en la región noroeste del país.

La toma de decisiones y planes deben de estar basados en mapas que cuantifiquen, tanto la amenaza como la vulnerabilidad y riesgo sísmico, para ello, en la actualidad se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten realizar análisis y presentar resultados en formato de mapas georeferenciados, además de realizar operaciones y cálculos entre ellos. En este estudio se utilizó el programa SIG ILWIS (ITC, 2001) para la confección de las bases de datos y los mapas digitales, que muestran la localización, severidad y puntos críticos de las variables analizadas en esta ciudad de estudio. Se espera que estos mapas faciliten los procesos de toma de decisiones en la ciudad Cañas, contestando de una manera rápida y sencilla preguntas tales como: ¿En dónde está localizada la zona de mayor amenaza?, ¿En dónde están los sitios más adecuados para construir?, ¿Cuál es el efecto de que un evento ocurra en un sitio u otro (escenarios)?.

Los mapas que se presentan en este informe, se consideran un primer intento de cuantificar la vulnerabilidad de la ciudad de Cañas ante la ocurrencia de eventos sísmicos severos. Mapas que podrán ser mejorados y modificados en el tanto se cuente con un mejor inventario, en el futuro, de las características estructurales y condición física de las edificaciones de esta ciudad.

2 OBJETIVO

El presente estudio tiene como objetivo cuantificar el efecto de la tectónica y la sismicidad de Costa Rica en la ciudad de Cañas, por medio de la estimación de la amenaza sísmica, la cual estará representada por valores de aceleración horizontal pico del terreno y de la Intensidad Mercalli Modificada (IMM). Además realizar un análisis preliminar de la vulnerabilidad física de las edificaciones en esta ciudad.

Además se considera como un objetivo importante, la preparación de bases de datos digitales (tablas, mapas, etc.) relacionadas al tema, utilizando un Sistema de Información Geográfico (SIG) que permitirá actualizarlas o modificarlas de una manera fácil y rápida en el futuro.

3 METODOLOGÍA

En este estudio se definirá primero la amenaza sísmica a que esta expuesta la ciudad de Cañas, por medio de mapas digitales. Luego se estimara la vulnerabilidad física de las edificaciones que se encuentran en ella, indicándose en forma cualitativa el grado de daños esperados, dado que un nivel de intensidad sísmica específica se presente en la ciudad de Cañas, debido a la ocurrencia de un evento sísmico severo.

La amenaza sísmica es una metodología, ya sea determinística o probabilística, que permite integrar el conocimiento sismo-tectónico de una región para determinar el grado de intensidad sísmica probable que podría ocurrir en la misma. El método probabilístico permite asociarle probabilidades de ocurrencia con estos niveles de intensidad, y el método determinístico obtener valores absolutos al evaluar diferentes escenarios sísmicos. Una explicación amplia y completa de estas metodologías puede ser encontrada en Cornell (1968), McGuire (1976), Reiter (1991), Giardini y Basham (1993), Krinitzsky *et al.* (1993), Laporte *et al.* (1994, 1995), Krinitzky (1995 a y b), Rojas *et al.* (1998), Climent y Arroyo (2002).

Para definir la amenaza sísmica en la ciudad Cañas se utilizó el método determinístico, el cual utiliza la definición de escenarios sísmicos basados en el conocimiento actual de las condiciones sismo-tectónicas de la región. Aunque se realizaron algunos cálculos probabilísticos, los resultados no se presentan en este informe. En la figura 1 se muestra el esquema simplificado de la metodología determinística, cuyo primer paso es definir las principales fuentes sísmicas o fallas con actividad sísmica y tectónica reciente y que son las que controlan la amenaza sísmica (posibilidades de infligir daño) en el sitio a evaluar, que en nuestro caso sería la ciudad de Cañas. Luego con base en la actividad neotectónica, sismicidad histórica y longitud de la falla, se define el potencial sísmico (magnitud máxima) de cada una de ellas. Conociendo el potencial sísmico y la distancia de cada una de las fuentes sísmicas al sitio a evaluar, se utiliza una ecuación de atenuación de las señales sísmicas (paso 3), para estimar el nivel de intensidad sísmica en el sitio de interés, dado que un sismo con ciertas características determinadas ocurra. En este informe, los valores de intensidad sísmica fueron representados por la aceleración horizontal pico del terreno e Intensidades Mercalli Modificada.

En el caso de la definición de la vulnerabilidad física de las edificaciones relacionada con sismos, se realizó una estimación preliminar cualitativa, considerando información disponible sobre el tipo constructivo, edad de la construcción y condición física aparente de la edificación localizada en cada lote de la ciudad de Cañas. Dicha información fue recolectada en el censo e inventario realizado específicamente para este proyecto. Para realizar esta estimación, se contó con el mapa digital de catastro y por medio del ILWIS se cruzaron las variables antes mencionadas, para obtener el mapa final de vulnerabilidad.

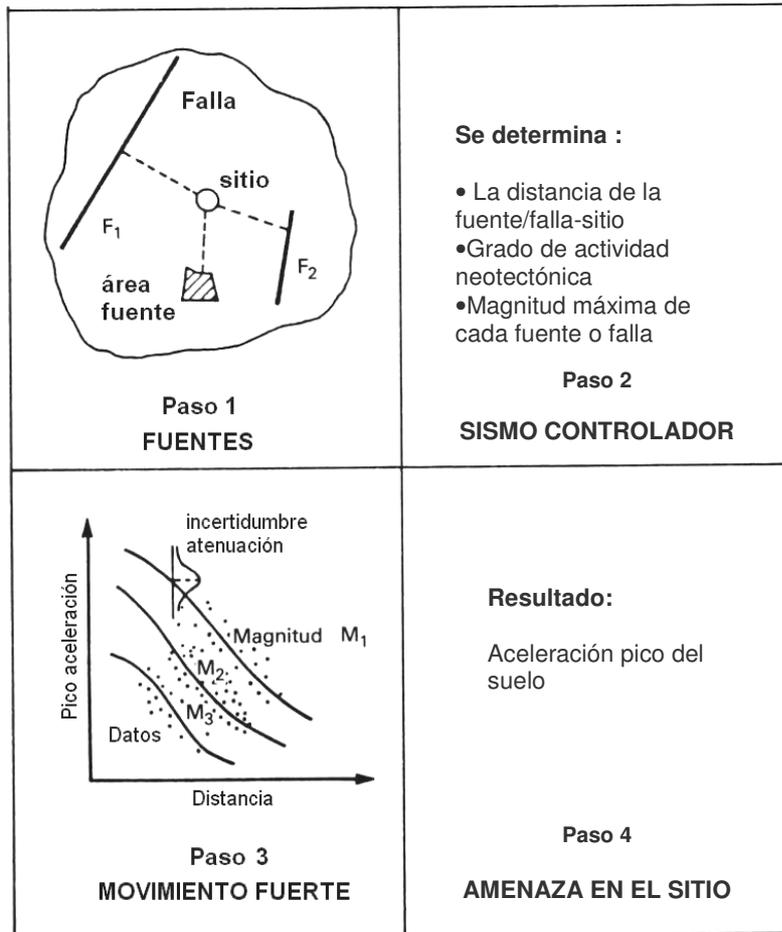


Fig. 1: Esquema simplificado para la estimación determinística de la amenaza sísmica.

4 TECTÓNICA Y SISMICIDAD EN LA REGIÓN DE ESTUDIO

Para la realización de este estudio se prepararon bases de datos de información sísmológica y tectónica específicas para la ciudad de Cañas, con base en los catálogos y mapas disponibles en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), así como de información suministrada por la Red Sísmológica Nacional (RSN:ICE-UCR).

4.1 Marco tectónico regional

Costa Rica está ubicada dentro de una zona tectónicamente activa, caracterizada principalmente por el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, a lo largo de la Fosa Mesoamericana. A partir de diversas evidencias geológicas, Astorga *et al.* (1991) proponen la existencia de un importante sistema de fallas que atraviesa la parte central del país dividiéndolo en dos grandes bloques denominados Bloque Norte y Bloque Sur (Fig. 2). Montero (2001) avala este modelo de un límite incipiente entre la microplaca de Panamá y la placa Caribe al que denomina Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), pero sugiere visualizar esta zona de deformación como una zona ancha constituida por varios sistemas de fallas con diferentes tipos de deslizamientos.

La región al sureste de la península de Nicoya (P. d. N. en la fig. 2) se caracteriza por la presencia de irregularidades batimétricas como la Cordillera del Coco que provoca una disminución en la profundidad de la fosa oceánica y un menor ángulo de subducción. En la región sur del país, existe otro rasgo tectónico importante que es la Fractura de Panamá, la cual separa las placas del Coco y Nazca. La condición de borde convergente activo de placas provoca el desarrollo de importantes caracteres geomorfológicos por los esfuerzos compresivos que se originan en la interacción de las placas Coco y Caribe, dando lugar a complejos sistemas de fallas al interior del país.

A nivel regional, en el caso específico de Costa Rica, se puede decir que, principalmente, la tectónica está regida por dos grandes sistemas que interactúan entre sí: a) El proceso de subducción de la placa del Coco bajo la Placa Caribe y b) El sistema de fallamiento local al interior del continente.

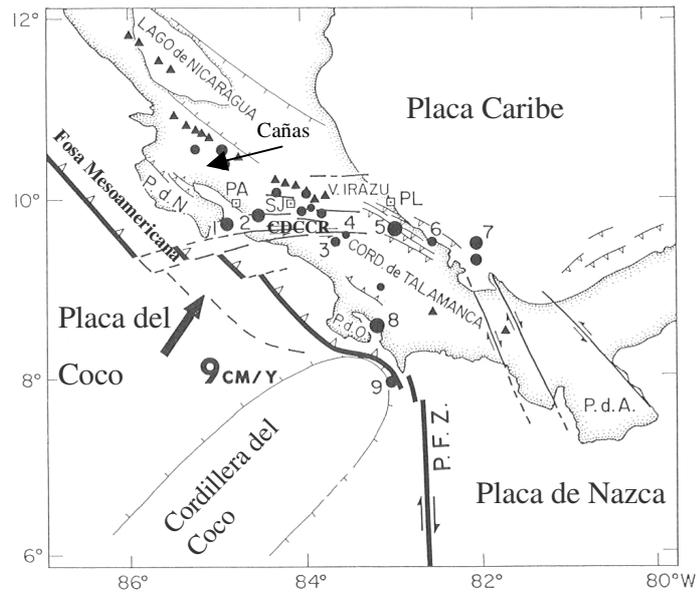


Fig. 2: Marco tectónico regional de Costa Rica (tomado de Jacob *et al*, 1991).

4.2 Proceso de subducción

La introducción de la placa del Coco debajo de la Caribe origina una zona de sismicidad que se extiende en profundidad, desde la fosa hacia el interior del país, que se conoce como "Zona de Benioff", en la cual se producen los sismos más fuertes que ocurren en Costa Rica, y que pueden causar daños importantes en las regiones costeras cercanas al epicentro y daños menores hacia el interior del país. Además, la actividad entre estas dos placas genera complejos sistemas de fallas hacia el continente.

Esta fuente sísmica es una de las más importantes, dado que se caracteriza por grandes liberaciones de energía en forma de terremotos de magnitudes altas ($M_s \geq 7,7$) que pueden generar intensidades máximas de grado VIII o IX en la zona epicentral y, además, por su profundidad son sentidos en una región más amplia que los originados en fallas locales. Los hipocentros de los eventos sísmicos generados por esta fuente se localizan en la zona sísmica de Benioff, la cual buza bajo la corteza continental hasta profundidades máximas de unos 200 km. Históricamente, esta fuente ha generado importantes sismos como los de 1916, 1939, 1950, 1978 y 1990 en la región noroeste del país. En el pacífico norte del país, a este proceso de subducción se le han identificado dos zonas sísmicas: Papagayo y Nicoya, las cuales coinciden con áreas de ruptura conocidas (Morales, 1985), y tienen potencial para generar un sismo importante ($M=7,7$) a mediano plazo (Barquero, 1990).

4.3 Sistemas de fallamiento

Los esfuerzos compresivos generados por el proceso de subducción producen sistemas de fallas de carácter regional, predominantemente de tipo inverso y de

rumbo a nivel de la corteza continental. Además de dichas estructuras, muchas otras fallas locales con dimensiones más pequeñas, se encuentran presentes hacia el interior del país. Estas fallas se caracterizan por la generación de sismos de magnitudes locales intermedias ($5,0 \leq M_L \leq 6,5$) con foco superficial ($5 \leq Z \leq 20$ km), condición que hace que los mismos sean generalmente más destructivos cuando ocurren cerca de centros de población.

Se consideró que en la región Chorotega de Costa Rica, en la cual se encuentra la ciudad de Cañas, hay cuatro fallas activas locales más importantes a tomar en consideración: a) Chiripa, b) Cote-Arenal, c) Bagaces y c) Caño Negro (Fig. 3). Aunque en la región hay evidencia de otras estructuras cuaternarias, se consideró que las anteriores, de acuerdo con el conocimiento actual, representan adecuadamente el nivel de amenaza sísmica en la zona. La estadística de temblores en esta región, estima que un sismo de magnitud hasta de 6,5 puede ocurrir a mediano plazo, en los próximos 20 años (Barquero, 1990)

Falla Chiripa: La identificación de esta falla en la zona suroeste del lago de Arenal fue posible gracias a los registros sismológicos obtenidos por la Red Sismológica de Arenal instalada de 1974 a 1978, mediante la cual se pudieron localizar gran cantidad de réplicas del terremoto de Tilarán de abril de 1973. Es una falla de rumbo NNW de unos 20 km de longitud. El mecanismo focal elaborado por Matumoto et al. (1978) muestra una solución de tipo transcurrente sinistral, uno de cuyos planos nodales concuerda con la dirección del alineamiento de los epicentros de las réplicas del terremoto Tilarán. Este fallamiento está asociado con la deformación cortical que resulta de los esfuerzos compresivos regionales de rumbo NE originados por el proceso de subducción. A esta falla se le podría asociar también el terremoto de Guatuso de 1911 y de Cañas de 1853 (Alvarado, 1989). Montero (1984) estimó un período de recurrencia de 60 años, para sismos de magnitudes intermedias (6,0-6,5) en la región donde se localiza esta falla.

Falla Cote-Arenal: Falla de traza semi-curvilínea con rumbo NW-SE hasta WNW-SSE que se extiende por más de 20 km con el bloque sur descendido. A unos 7,3 km de la represa de Sangregado por la carretera hacia Nuevo Arenal, se ha observado un extenso afloramiento en donde se evidencia una clara tectónica normal que afecta casi a toda la secuencia de tefras del Arenal de los últimos 3 000 años. No ha sido posible evaluar posibles movimientos transcurrentes (horizontales). La falla principal ha desplazado unos 5,4 m verticalmente a un nivel de paleosuelo rico en materia orgánica. De este nivel se obtuvo una fecha con radiocarbono de 1370 ± 215 años A.C. Basándose en que la falla se ha desplazado 540 cm en 3 000 años, se obtuvo una velocidad de aproximadamente 0,18 cm/año lo cual la califica como una falla de alta actividad. Esta falla también pudo haber sido la fuente del terremoto de Guatuso de 1911 (Alvarado, 1989).

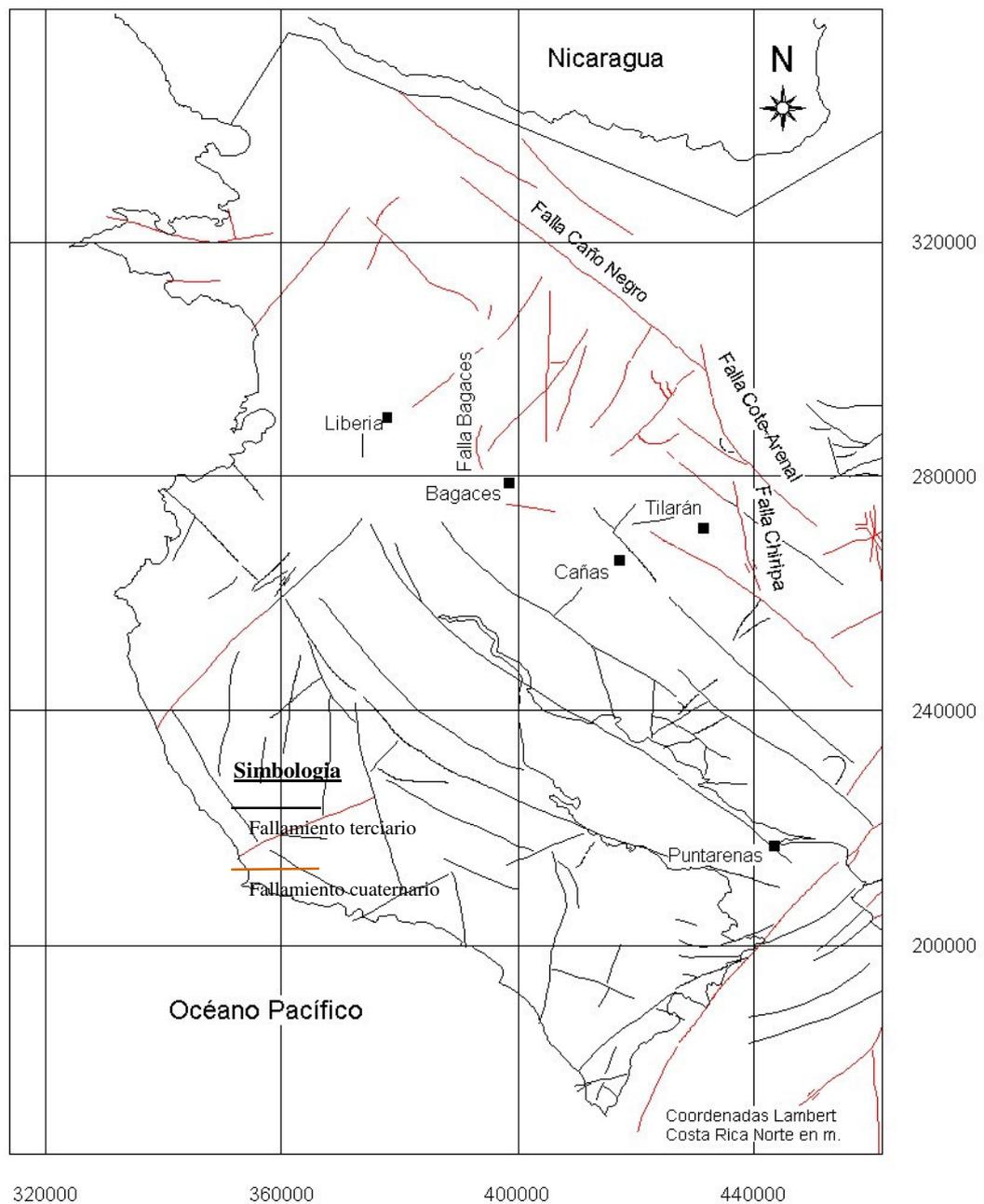


Fig. 3: Tectónica relacionada al fallamiento superficial en la región donde se ubica la ciudad de Cañas.

Falla Bagaces: Falla perteneciente al sistema N-S y NNE-SSW de fallas normales que constituyen la estructura del graben Fortuna-Peje. Esta falla, cuya parte de su traza se observa en un alineamiento geológico de rumbo NNE-SSW cerca de Bagaces, parece ser la fuente de los terremotos de 1935 y 1941 (Montero y Alvarado, 1988).

Falla Caño Negro: Falla de rumbo NW-SE de unos 50 km de longitud cuyo escarpe se distingue claramente en las fotografías aéreas y que parece ser una

prolongación del graben (depresión tectónica limitada por fallas) de Nicaragua. Los mecanismos focales elaborados con temblores recientes, presumiblemente asociados con esta fuente, confirman la existencia de una falla normal orientada NW-SE con componente en coincidencia con el escarpe observado en fotografía aérea. No se han podido encontrar evidencias directas de esta falla en el campo, ya que posiblemente estén cubiertas por suelos, aluviones, lahares y espesa vegetación (Barquero, 1990).

4.4 Sísmicidad Histórica

Los terremotos históricos más importantes de Costa Rica han sido documentados por varios autores (Miyamura, 1980; Morales, 1983; Montero, 1989; Rojas, 1993; White y Harlow, 1993; Peraldo y Montero, 1994, entre otros).

Desde 1900 hasta el presente se han registrado 25 eventos sísmicos importantes ($M_s > 5,5$) en la región NW de Costa Rica localizados entre la fosa mesoamericana y el arco volcánico (Tabla 1), algunos de ellos tuvieron como fuente el fallamiento local y otros el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la Caribe. Históricamente, los que han causado mayores daños materiales y humanos, debido a su poca profundidad y cercanía de los centros de población, son los originados por las fallas locales, aún cuando sus magnitudes son menores que los originados por la subducción. En la figura 4 se presenta el mapa con la ubicación epicentral de los más importantes de ellos, en color azul los relacionados a la subducción y en verde al fallamiento local.

Dentro de los sismos de mayor magnitud asociados con fallamiento superficial se pueden citar los eventos de 1941 y 1935 que han sido asociados con la falla Bagaces, el de 1911 a la falla Cote-Arenal, el de 1973 a la falla Chiripa. En el caso de la subducción, algunos de los sismos mayores ocurridos en esta fuente son el de 1916 y 1983 asociados con la zona sísmica de Papagayo, y una serie de eventos como los de 1916, 1950 y 1978 relacionados con la zona sísmica de Nicoya. Debido a ellos en la zona donde se localiza la ciudad de Cañas se ha reportado Intensidades Mercalli Modificada máximas de grado VII, este valor máximo podría variar si se incluyeran terremotos más antiguos a los mencionados.

A continuación se presenta una pequeña descripción de los principales eventos sísmicos históricos ocurridos en la región noroeste de Costa Rica en el siglo XX.

Terremoto de 1916:

Fecha: 27 de febrero de 1916, Localización: Latitud 10,7° N Longitud 85,88° W
Magnitud: 7,5, Intensidad epicentral: superior IX R.F.
Origen: Subducción, zona sísmica de Papagayo.

Tristán (1916) lo reporta causando gran cantidad de daños en la región noroeste de Costa Rica, con un área epicentral entre la bahía Culebra, Península Santa Elena y Punta Gorda. Daños en Sardinal, en El Coco con colapso parcial o total de construcciones.

Tabla 1: Sismicidad histórica en la región noroeste de Costa Rica

Fecha	Latitud	Longitud	Magnitud	Localización epicentral
21-06-1900	10°00,00'	85°30,00'	7,2	Pen. de Nicoya
20-01-1905	09°51,00'	84°40,80'	6,7	Mata de Limón
10-10-1911	10°36,00'	84°56,00'	6,5	Laguna Cote
27-02-1916	10°42,00'	85°52,80'	7,5	Golfo Papagayo
24-04-1916	10°21,00'	85°12,00'	7,3	Pen. de Nicoya
04-03-1924	09°51,00'	84°33,60'	7,0	Orotina
01-08-1935	10°34,50'	85°14,70'	5,5	Bagaces
21-12-1939	10°08,40'	84°36,00'	7,3	Miramar
22-12-1939	09°48,00'	84°31,80'	6,7	San Mateo
27-10-1940	09°45,00'	84°30,00'	6,7	San Mateo
06-12-1941	10°30,00'	85°15,00'	5,5	Bagaces
05-10-1950	10°00,00'	85°30,00'	7,7	Pen. de Nicoya
13-05-1952	10°18,00'	85°18,00'	6,9	Pen. de Nicoya
14-04-1973	10°27,50'	84°54,00'	6,5	Tilarán
02-10-1973	10°03,00'	85°29,40'	5,0	Pen. De Nicoya
25-02-1976	10°00,00'	85°28,20'	5,9	Pen. De Nicoya
23-08-1978	09°45,60'	85°34,20'	7,0	SW de Sámará
23-08-1978	09°53,40'	85°30,00'	7,0	SW de Sámará
01-05-1981	09°34,20'	85°01,20'	5,4	Golfo de Nicoya
29-09-1983	10°35,40'	85°54,00'	5,7	Golfo de Papagayo
02-03-1988	09°31,77'	84°52,30'	5,7	Golfo de Nicoya
25-03-1990	09°36,24'	84°56,76'	6,5	Golfo de Nicoya
01-03-1991	10°49,20'	84°48,00'	5,8	Guatuso
16-03-1991	09°43,20'	85°39,60'	6,3	Frente Pen. de Nicoya
20-07-2000	09°11,40'	85°28,20'	6,2	Océano Pacífico

Terremoto de Bagaces de 1935:

Fecha: 01 de agosto de 1935, Hora: 10:08 (L.T.)

Localización: Latitud 10,5° N Longitud 85,5° W (ISS)

Magnitud: 5,5, Profundidad: 10-15 km, Intensidad epicentral: VII, Origen: F. Bagaces

Este terremoto ocasionó daños principalmente en Bagaces, en donde hubo destrucción total o parcial de casas, se escucharon ruidos subterráneos y se reportaron también algunos daños en Liberia; en Cañas se sintió muy fuerte, pero no produjo daños materiales, en San José, Heredia y Cartago fue sentido fuerte y prolongado.

Terremoto de Bagaces de 1941:

Fecha: 06 de diciembre de 1941, Localización: Latitud 10,5° N Longitud. 85,25° W

Magnitud: 6,0, Profundidad: 10-15 km, Intensidad epicentral: VIII

Origen: Falla Bagaces.

Este terremoto ocasionó daños considerables en Bagaces en donde unas 100 casas quedaron inhabitables, el techo de la iglesia colapsó, las oficinas de la Jefatura Política, Municipalidad y Telégrafo también quedaron dañados. Otros datos de intensidades según Montero y Alvarado (1988) son: en Montano VII, en Montenegro VI-VII, en Salitral VII, Liberia, La Fortuna de Bagaces VI, Bebedero VI.

Terremoto de 1950:

Fecha: 5 de octubre de 1950, Localización: Latitud 10,0° N Longitud 85,50° W
Magnitud: 7,7, Origen: Subducción, Zona Sísmica de Nicoya.

Este terremoto originó daños en construcciones de Puntarenas, Nicoya, San Ramón, Filadelfia, Santa Cruz y otros poblados en la península de Nicoya, y de la costa pacífica central del país y en el Valle Central Occidental (Montero, 1984).

Terremoto de Tilarán de 1973:

Fecha: 14 de abril de 1973, Hora: 03:35 (L.T.), Magnitud: $M_b = 5,7$ $M_s = 6,5$
Localización: Latitud 10,35° N Longitud 84,88° W, Profundidad: 10 km
Intensidad epicentral: VIII (MM), Origen: falla Chiripa

Los daños, debidos a este terremoto, estuvieron concentrados dentro de una área de 150 km² y los deslizamientos mayores, generados por la sacudida sísmica, se produjeron dentro de un área de 20 km², fueron responsables de la muerte de 23 personas y de daños a los caminos vecinales (Mora y Morales, 1986). Los fracturamientos observados están relacionados todos con deslizamientos gravitacionales y ninguna de las fracturas tenía más de unas decenas de metros de longitud (Plafker, 1973).

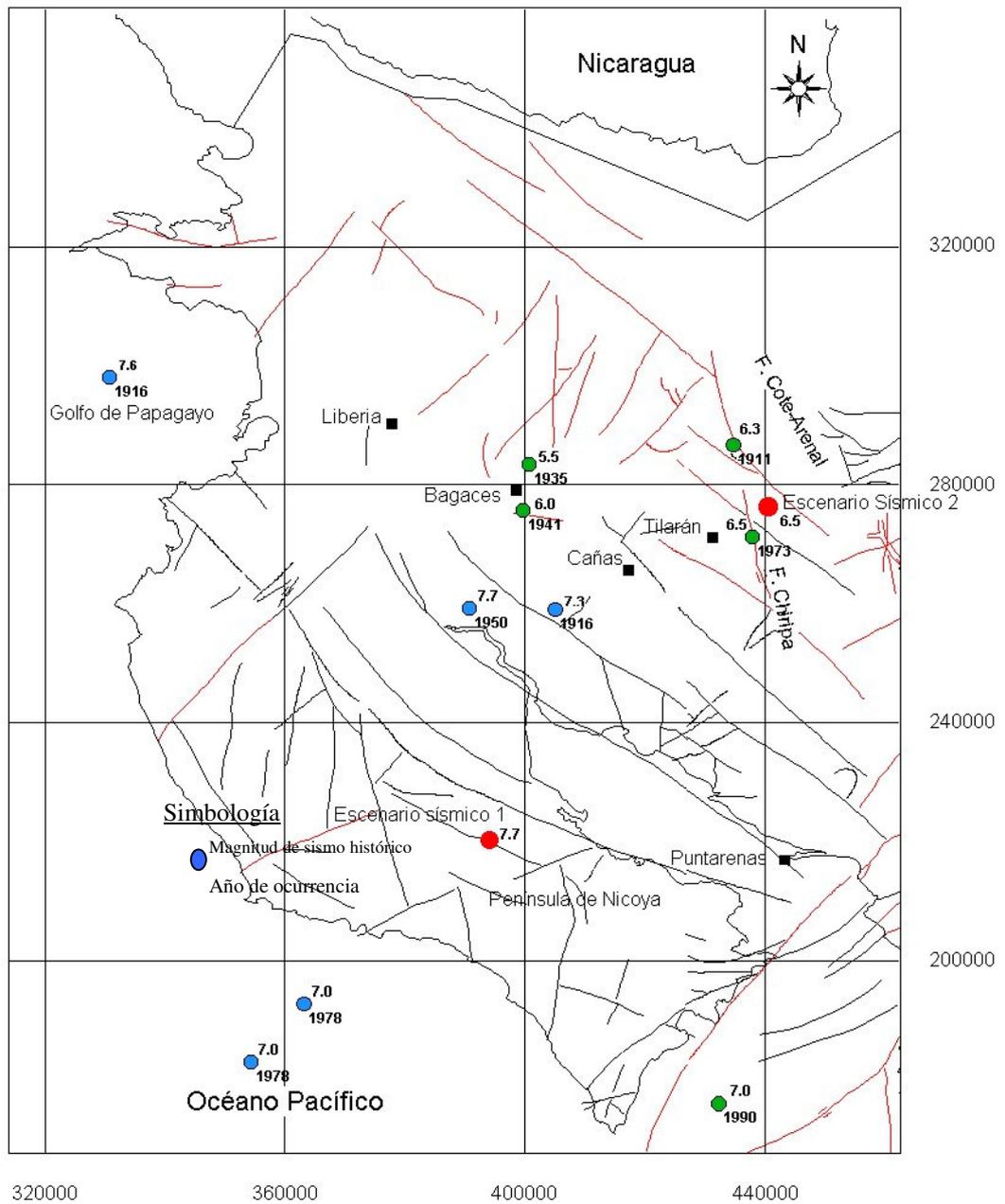


Fig. 4: Sismos históricos severos ($M_s \geq 6,0$) en el periodo 1900-2000, en la región donde se ubica la ciudad de Cañas y localización de los escenarios sísmicos.

5 ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

Como se indico anteriormente, en este estudio la amenaza sísmica (grado de exposición) será determinada con base en la definición de escenarios sísmicos específicos, basados en el conocimiento de la sismicidad histórica y el potencial de generar sismos de cada una de las fallas o fuentes sísmicas seleccionadas. En la figura 5 se presenta el esquema simplificado de la metodología seguida utilizando sistemas de información geográfico.

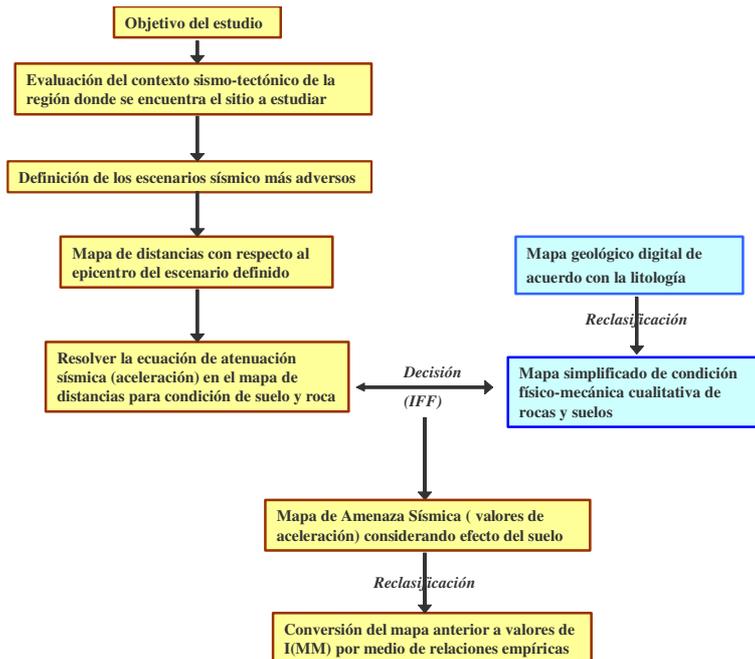


Fig. 5: Esquema simplificado para la estimación de la amenaza sísmica determinística utilizando un SIG.

Con base en la información sísmo-tectónica presentada en los apartados anteriores para la región noroeste de Costa Rica, se pueden establecer cuatro posibles escenarios sísmicos que podrían tener un impacto importante en la ciudad de Cañas. El primero es un sismo que hipotéticamente ocurriría en la zona sísmica denominada Nicoya (zona de subducción), el cual tendría una magnitud máxima de 7,7 y una profundidad promedio de 30 km bajo la península de Nicoya. El segundo un sismo que sería originado en la zona sísmica de Papagayo (subducción) con una magnitud de 7,7 y ocurriendo a una profundidad promedio de 40 km. El tercer y cuarto escenario serían sismos originados en una falla local. Estos eventos tendrían una magnitud máxima de 6,5 y una profundidad promedio de 12 km. El primero asociado con las fallas Cote-Arenal o con la Chiripa y el segundo a la fallas Bagaces o la Caño Negro. Es conveniente indicar que posiblemente hay otras fallas cercanas, igualmente activas y potencialmente dañinas, pero no tan estudiadas, y cuyos efectos para nuestro estudio serían similares a los acá analizados.

De los cuatro escenarios antes planteados, finalmente se seleccionaron dos como los que presentan condiciones más adversas para la ciudad de Cañas: 1) Un evento de magnitud 7,7 relacionado a la subducción en la península de Nicoya y, 2) Un evento de magnitud 6,5 ocurriendo en la zona donde se encuentran las fallas Chiripa y Cote-Arenal. En la figura 4 se muestran las localizaciones epicentrales de estos dos escenarios sísmicos, que fueron descritos con mayor detalle anteriormente.

Definidos los escenarios sísmicos, se preparo en ILWIS un mapa de distancias, para cada uno tomando como referencia el epicentro de los mismos, y en ellos se resolvió la ecuación de atenuación de las señales sísmicas, obteniéndose un mapa raster de valores de aceleración horizontal pico del terreno. Para el cálculo se utilizó la ecuación propuesta por Climent *et al.* (1994) para la región de América Central. Esta ecuación permite obtener valores de aceleración horizontal pico tanto para condición de suelo como de roca, y esta representada por la siguiente expresión:

$$\ln A = -1.687 + 0,553 * M - 0.537 * \ln(r) - 0,00302 * r + 0.327 * S + \ln \epsilon$$

donde: A	Aceleración horizontal pico en m/s ²
M	Magnitud momento (Mw)
r	Distancia hipocentral
S	S es 0 para sitios de roca y 1 para suelos
lnε	término relacionado con el error de estimación (0,75)

La ecuación anterior relaciona el nivel de aceleración con el tamaño del sismo (magnitud), la distancia de ocurrencia del evento y la condición de la geología superficial local del sitio a evaluar. Con base en los escenarios sísmicos se obtuvieron los valores de **M** y del mapa de distancias los de **r**; y la condición de sitio fue obtenida por medio de mapas geológicos disponibles de la región, reclasificando las diferentes unidades litológicas de acuerdo con su condición físico-mecánica cualitativa. El mapa resultante se puede considerar como una gruesa macrozonificación, En el caso de este último parámetro, para estudios posteriores se recomienda complementar esta información con mapas de espesores de suelos, y en la medida que se pueda con pruebas geofísicas que suministren valores de la velocidad de la onda **P** y **S** para poder preparar un mapa más detallado y preciso.

Dado que los escenarios sísmicos seleccionados tienen un carácter regional con respecto a la ciudad de Cañas, en las figuras 6 y 7 se presenta a manera ilustrativa el entorno regional de amenaza sísmica (en valores de aceleración), en el cual se encontraría la ciudad de Cañas en el caso que los escenarios sísmicos planteados ocurrieran. En estos mapas la condición de sitio fue incluida con base en la mapa geológico 1:500000. En la Tabla 2 se presenta de una manera cualitativa, como pueden interpretarse los valores de aceleración que aparecen en estos mapas y su relación con I(MM) (según Wald *et al.*, 1999).

Tabla 2: Relación entre escalas de intensidad y percepción de la sacudida sísmica.

I(MM)	Rango Acel. (g)	Como se percibe la sacudida
VI	0,08 – 0,15	Fuerte
VII	0,15 – 0,30	Muy fuerte
VIII	0,30 – 0,60	Severamente
IX	0,60 – 1,20	Violentamente

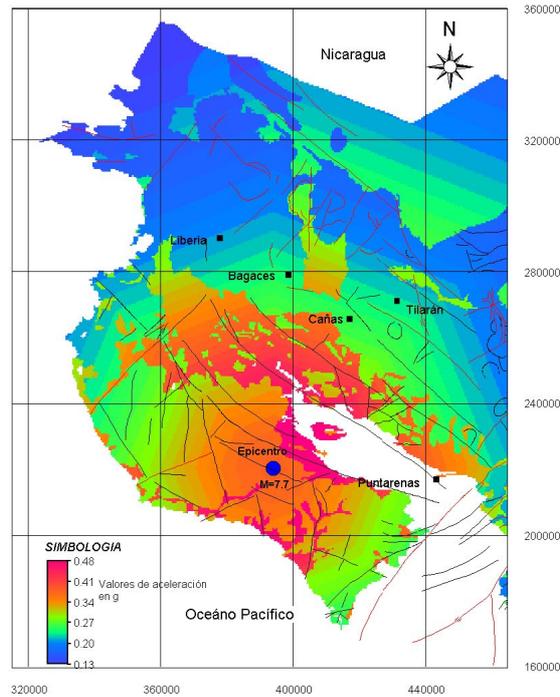


Fig. 6: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica, dado que ocurre un sismo de magnitud 7,7 en la península de Nicoya y asociado a la subducción (Escenario 1).

Del mapa de la figura 6, correspondiente con un sismo que tendría lugar en la península de Nicoya, se nota que en general toda la región noroeste del país presentaría aceleraciones superiores al 10 % de g, que las aceleraciones máximas variarían entre 0,5 y 0,6 g, en la zona epicentral, y valores entre 0,05 y 0,10 g en las zonas más alejadas hacia el norte del epicentro. Esto significaría que la sacudida sísmica sería percibida a partir de niveles considerados como fuertes, y que los niveles más altos estarían localizados principalmente en la zona epicentral y zonas clasificadas como de suelos blandos en las llanuras de inundación de los ríos, especialmente en la del Tempisque. En el caso de la ciudad de Cañas, se esperaría niveles de aceleración alrededor de 0,30 g y las variaciones con respecto a ese valor estarían en función de la variación de la condición de los suelos localmente

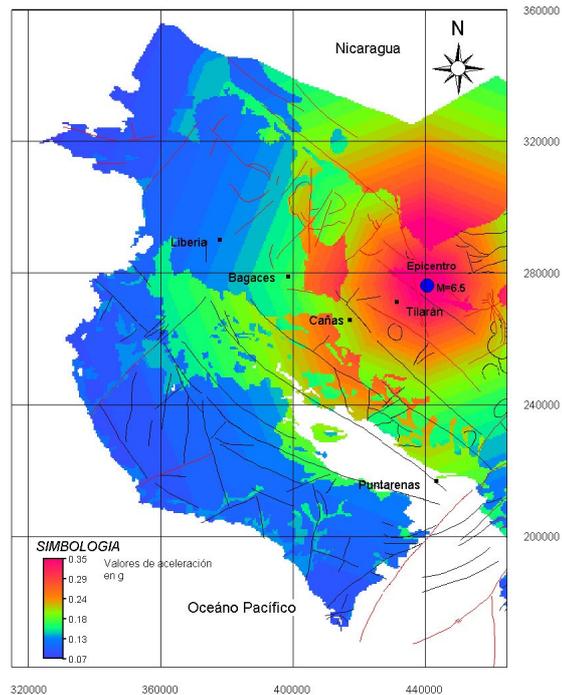


Fig. 7: Amenaza sísmica en la región noroeste de Costa Rica dado que ocurre un sismo de magnitud 6,5 en la falla Chiripa o Cote-Arenal (Escenario 2).

Del mapa de la figura 6, correspondiente con un sismo que tendría lugar en la península de Nicoya, se nota que en general toda la región noroeste del país presentaría aceleraciones superiores al 10 % de g , que las aceleraciones máximas variarían entre 0,5 y 0,6 g , en la zona epicentral, y valores entre 0,05 y 0,10 g en las zonas más alejadas hacia el norte del epicentro. Esto significaría que la sacudida sísmica sería percibida a partir de niveles considerados como fuertes, y que los niveles más altos estarían localizados principalmente en la zona epicentral y zonas clasificadas como de suelos blandos en las llanuras de inundación de los ríos, especialmente en la del Tempisque. En el caso de la ciudad de Cañas, se esperaría niveles de aceleración alrededor de 0,30 g y las variaciones con respecto a ese valor estarían en función de la variación de la condición de los suelos localmente.

En el caso de presentarse un evento sísmico en las falla Chiripa o la Cote-Arenal (Fig. 7), en la zona epicentral se pueden esperar aceleraciones horizontales pico entre 0,4 y 0,5 de g y de 0,25 g en promedio en la ciudad de Cañas. Debido a que la zona epicentral de este evento se encontraría en una zona montañosa, se considera que existe el potencial de formación de crecidas o avalanchas en algunos ríos de la zona por represamiento de sus cuencas, especialmente si el sismo ocurre durante la época lluviosa. En el caso de Cañas podría verse afectada por el represamiento en la cuenca alta del río Cañas y la correspondiente avalancha río abajo.

Ya ha sido planteado el contexto regional en el cual se encuentra la ciudad de Cañas en el caso de ocurrir los eventos antes mencionados. El efecto en la ciudad propiamente, dependerá en buena medida de las condiciones locales de sitio, ya que es bien conocido, y ampliamente aceptado que existe un efecto de la geología

superficial sobre los movimientos sísmicos, el que puede ser en algunos casos muy importante. Los materiales no consolidados (suelos blandos) modifican las características de los movimientos sísmicos con respecto al comportamiento en roca o suelo firme, especialmente en lo referente a la duración del movimiento, la amplitud de la señal y la distribución frecuencial de la energía (Bard, 1995).

Para efectos de incluir esta condición en los mapas finales de amenaza sísmica de la ciudad de Cañas, se preparó un mapa de macrozonificación simplificado de la condición físico-mecánica cualitativa de suelos y rocas (Fig. 8) basado en el mapa geológico 1:50 000 disponible (en los mapas de amenaza regional se utilizó el mapa geológico 1: 500 000), y el cual fue reclasificado de acuerdo a la litología. Dadas las limitaciones de este estudio, no se realizaron estudios de detalle para corroborar los espesores de estos sedimentos y su zonificación. Sin embargo, dado que la ciudad se ubica en el ápice del abanico aluvial de los ríos Cañas y Bebedero, puede que existan algunos cañones o gargantas profundas rellenas con sedimentos aluviales antiguos, y que debido a su ubicación geomorfológica y de geología fluvial se considero que la ciudad de Cañas se ubica sobre sedimentos recientes con potencial de amplificación, como condición más adversa.

En los mapas de las figuras 9 y 10 se presentan los mapas de amenaza sísmica en la ciudad de Cañas en valores de Intensidad Mercalli Modificada, considerando el efecto de la geología local superficial. Para obtener estos mapas, los valores de aceleración horizontal pico fueron convertidos a valores de I(MM) por medio de relaciones empíricas propuestas en Wald *et. al* (1999).

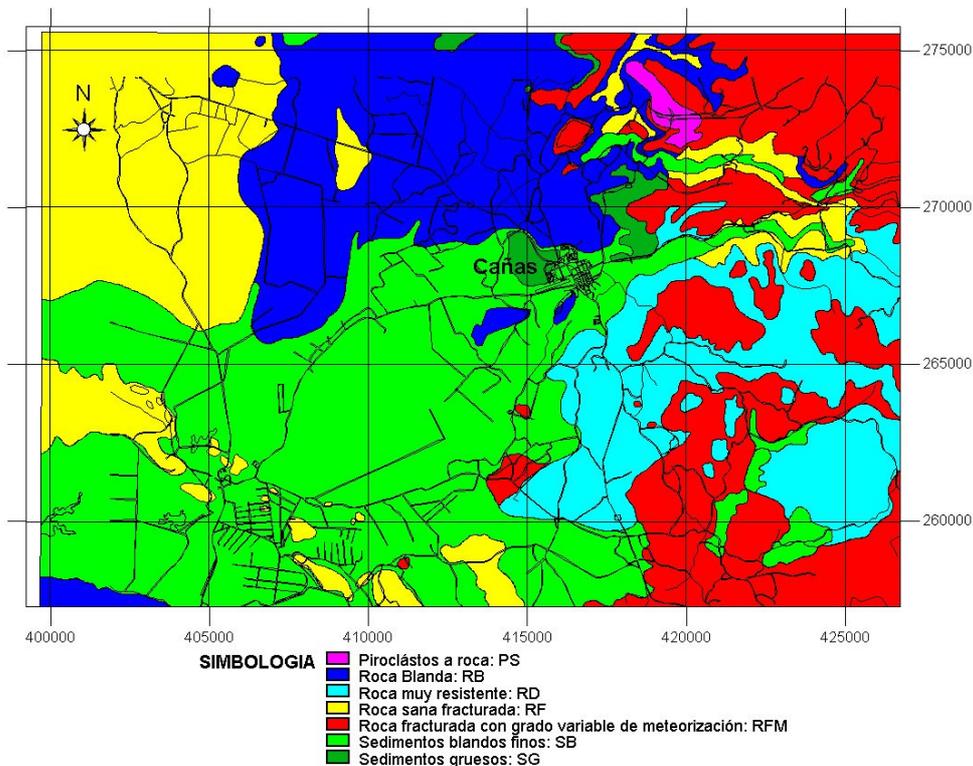


Fig. 8: Mapa de condición físico-mecánica cualitativa de los suelos y rocas en la ciudad de Cañas y alrededores.

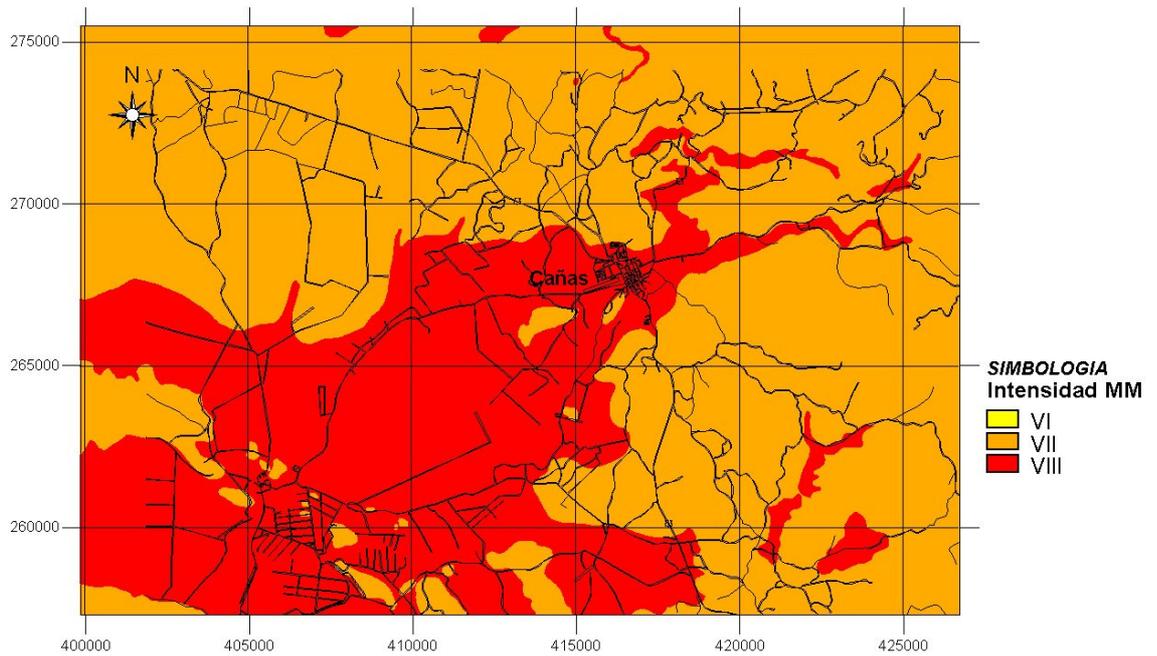


Fig. 9: Mapa de amenaza sísmica en valores de Intensidad MM en ciudad la de Cañas de acuerdo al escenario sísmico 1.

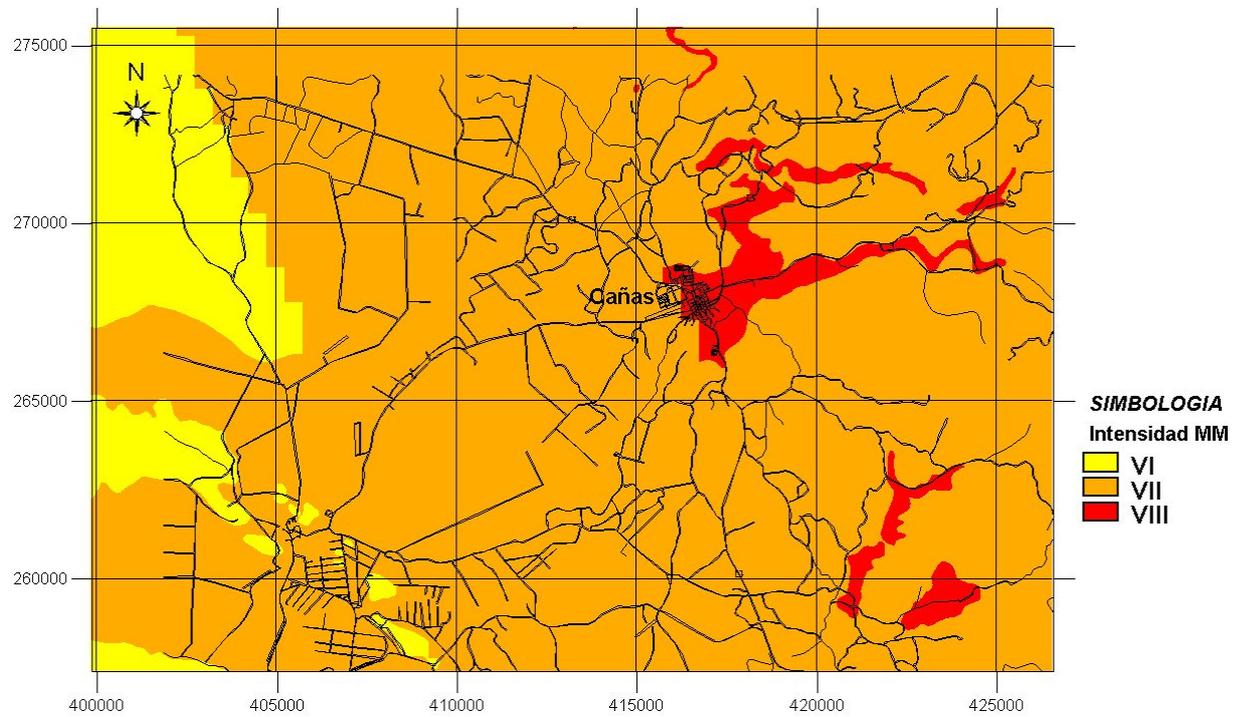


Fig. 10: Mapa de amenaza sísmica en valores de Intensidad MM en la ciudad de Cañas de acuerdo al escenario sísmico 2.

De acuerdo a los dos escenarios sísmicos evaluados en este informe, se ha estimado que en el caso de ocurrir el evento sísmico en la Península de Nicoya y asociado a la subducción, la ciudad de Cañas se vería afectada por sacudidas sísmicas representadas por Intensidades Mercalli Modificada de grado VIII en la mayoría de la ciudad. En el caso de que ocurriera el sismo en la Falla Chiripa o Cote-Arenal por intensidades de grado VII en la parte oeste y de grado VIII en la parte este de la ciudad acorde con la distribución de los mapas de las figuras 9 y 10.

6 VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS EDIFICACIONES

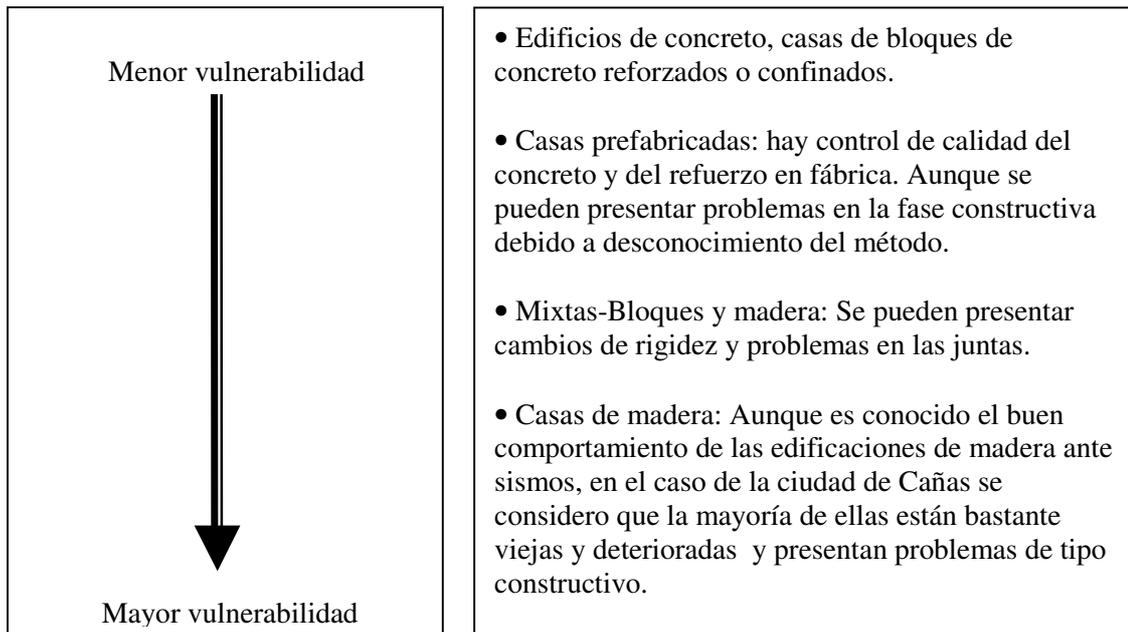
Dado que se disponía del Catastro Municipal, lote por lote, en formato digital ArcView, además de información relacionada con cada uno de ellos, obtenida de la encuesta e inventario realizado a principios del año 2003, como parte de este proyecto, se decidió realizar un análisis preliminar de vulnerabilidad física de las edificaciones localizadas en la ciudad de Cañas.

Debido a que en Costa Rica no se cuenta con funciones de vulnerabilidad o matrices de daño para edificaciones tipo, en vez de utilizar las desarrolladas en otros países, se decidió realizar un análisis cualitativo de la vulnerabilidad física, basado en consideraciones sobre el comportamiento de los diferentes sistemas constructivos ante sismos, calidad del diseño y construcción, edad, condición física aparente, y a relaciones empíricas desarrolladas a nivel mundial referentes al nivel de daños esperados de acuerdo al tipo de estructura y el nivel de intensidad sísmica (Sauter, 1989; Kramer, 1996; Wald *et. al*, 1999). En la figura 11 se presentan los diferentes tipos constructivos identificados en la ciudad de Cañas.



Fig. 11: Edificaciones tipo identificadas en la ciudad de Cañas.

Para efectos de realizar el análisis, se consideró inicialmente que las edificaciones tipo de la ciudad de Cañas, presentan una vulnerabilidad física, ante sismos, menor o mayor de acuerdo al orden en que se presentan a continuación. Es conveniente indicar que esta valoración es específica para esta ciudad y de este estudio en particular.



La vulnerabilidad de estas edificaciones además estará influenciada por la edad de las mismas y el aspecto o condición física aparente, de tal forma que edificaciones más viejas y más deterioradas presentan mayor vulnerabilidad y lo contrario en el caso de edificaciones más recientes y de una buena condición física aparente. Otro aspecto que fue considerado a la hora de evaluar la edad, fue que el primer Código Sísmico de Costa Rica, que da la normativa de diseño antisísmico, fue publicado en el año 1986, por lo que se esperaría un mejor diseño de la estructuras a partir de dicho año. Los niveles de daños esperados representados como mayor, considerable, moderado a menor y menor

Utilizando la base de datos lote por lote, se prepararon los mapas temáticos relacionados a tipo constructivo (TC), edad (ED) y condición física aparente (CFA) (ver Anexo I). Luego los mapas fueron cruzados entre sí, primero TC con ED y luego TC con CFA, para ambas combinaciones se obtuvieron niveles de daño para I(MM) de VII y VIII, de acuerdo a los resultados del estudio de amenaza sísmica. Los mapas resultantes de estas dos combinaciones fueron cruzados, luego las combinaciones fueron reclasificadas escogiéndose la peor condición y obteniéndose los mapas finales de vulnerabilidad física ante sismos que se muestran en las figuras 12 y 13. Es importante indicar, que debido a la representación de estos mapas lote por lote, en algunos casos se puede generar una falsa indicación de grandes áreas vulnerables o riesgosas, cuando realmente lo que se encuentra es la presencia de pequeñas y únicas construcciones ubicadas en grandes lotes, por lo que se debe tener cuidado a la hora de interpretar estos mapas, especialmente en estos casos.

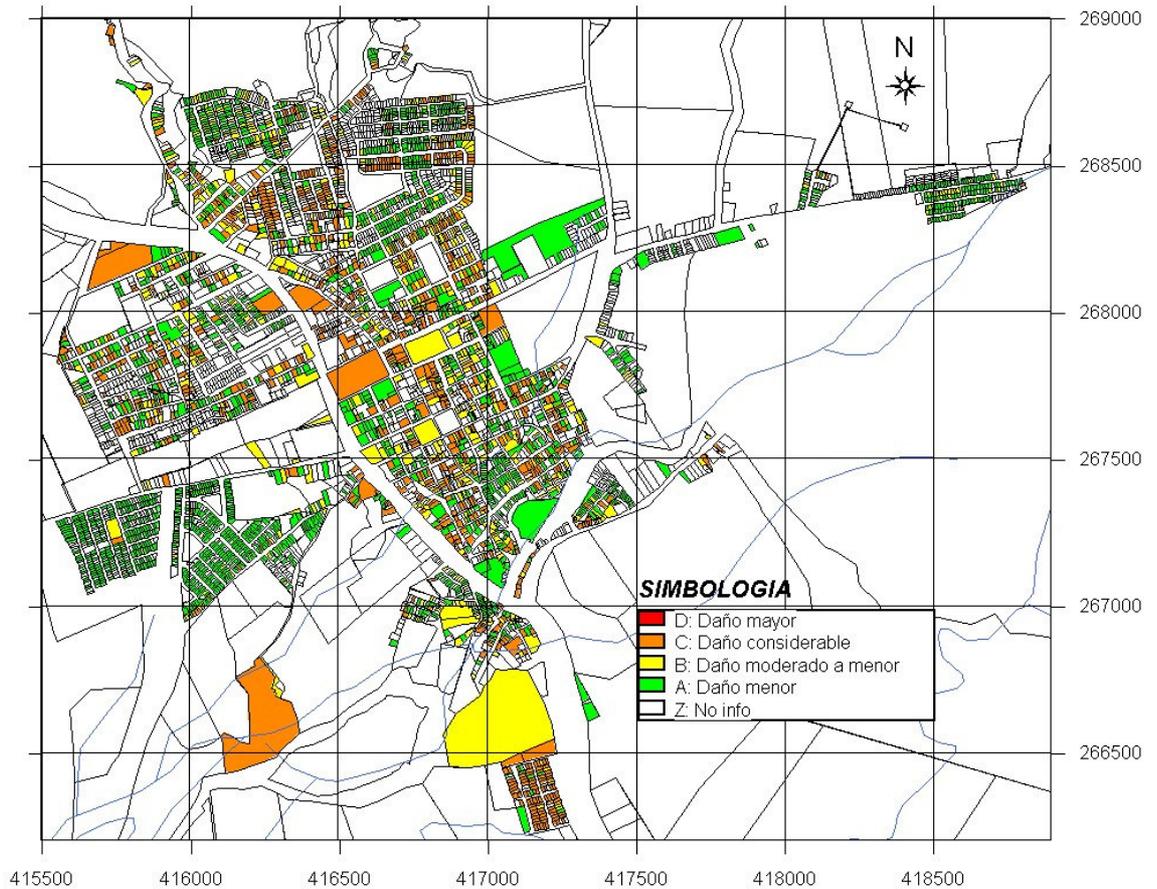


Fig. 12: Mapa de riesgo sísmico en la ciudad de Cañas, cuantificado de acuerdo a la cantidad de daños esperado, dado que se presenta una Intensidad MM VII.

De acuerdo al mapa de la Figura 12 y a la estadística calculada, en el caso de presentarse una intensidad de grado VII Mercalli Modificada en la ciudad de Cañas, no se esperaría la ocurrencia de daños mayores en las edificaciones, un 68 % del total de ellas sufriría daños menores y un 32 % daños de consideración, por lo que un 25 % de la población se vería afectado de manera importante y de diferentes formas. Para el grado de intensidad VII (MM) los daños considerables están relacionados con edificaciones muy pobremente diseñadas y construidas.

En el caso del mapa de la Figura 13, se puede resumir indicando que de presentarse una intensidad de grado VIII Mercalli Modificada en la ciudad de Cañas, se esperaría que se presenten daños mayores en un 30 % y que un 28 % del total de edificaciones sufra daños de consideración, viéndose afectado un 50 % de la población. El resto de las edificaciones sufrirían daños menores. Para el grado de intensidad VIII los daños mayores y considerables están relacionados con edificaciones pobremente diseñadas y construidas. Se esperaría entonces que aquellas construcciones que hayan sido bien construidas y diseñadas para resistir cargas horizontales debido a sismo, sufran daños leves o moderados, fácilmente reparables y no estén propensas a colapso.

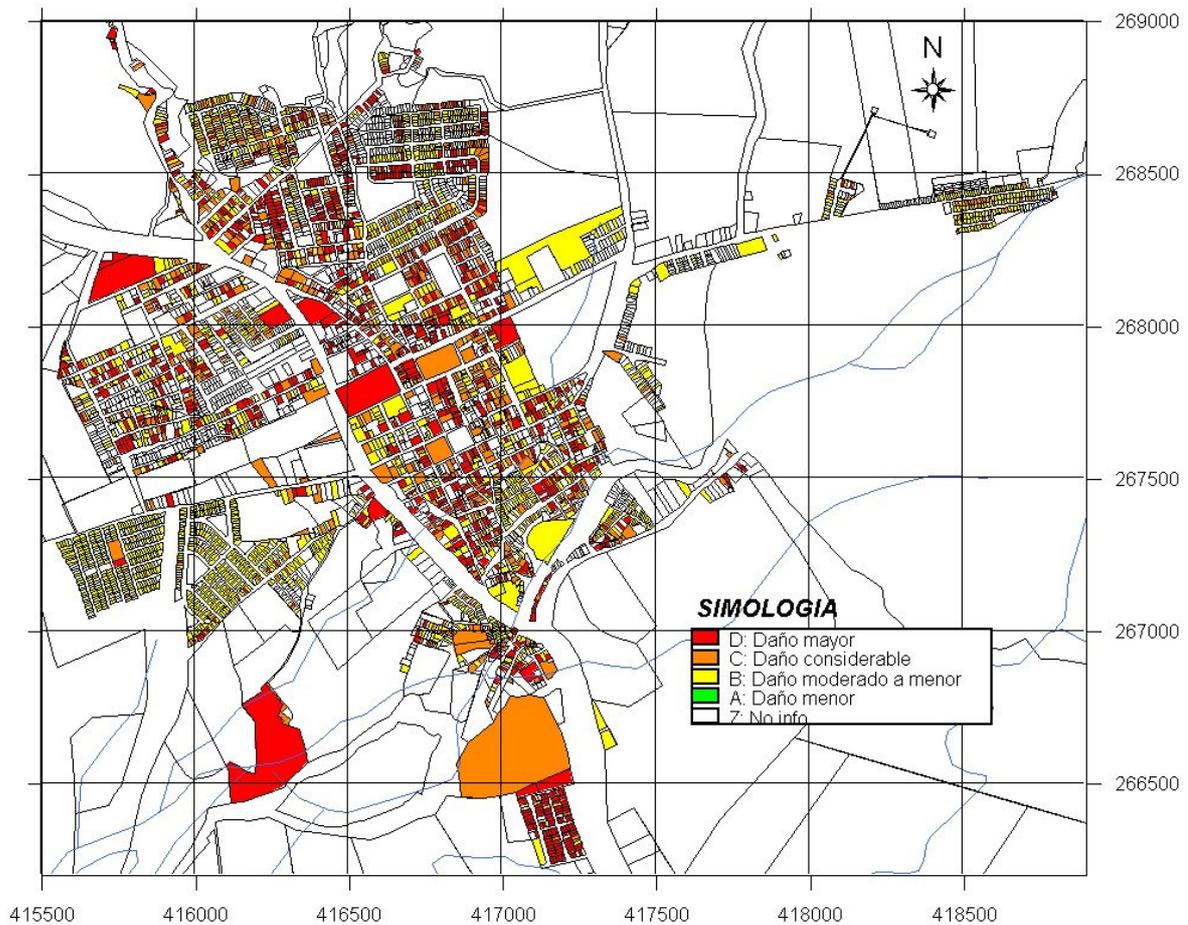


Fig. 13: Mapa de riesgo sísmico en la ciudad de Cañas, cuantificado de acuerdo a la cantidad de daños esperado, dado que se presenta una Intensidad MM VIII.

Se considera conveniente indicar que en la ciudad de Cañas las edificaciones que aparecen con estimación de daños indicados como mayores o considerables, posiblemente presentan problemas constructivos y deterioro por falta de mantenimiento, especialmente en las casas de madera, las cuales en general son bastante viejas. Una de las principales maneras de mitigar y reducir estos efectos, dado que ocurre un sismo severo, es la de mejorar la calidad del diseño civil y las prácticas constructivas utilizadas en nuevas edificaciones y reforzando las ya existentes.

Finalmente se preparó un mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Cañas considerando la combinación de la ocurrencia de sismo y la generación de fuego (Fig. 14). Para realizar este mapa se partió de los mapas temáticos tipo constructivo y tipo de energía utilizada para cocinar (ver Anexo I), considerando que las casas de madera son más vulnerables al fuego que las casa de concreto, y que el uso de cocinas que usan madera y gas para cocinar son más propensas a generar fuego que las que usan electricidad. En el Anexo I se incluye también un mapa de vulnerabilidad considerando solo la variable fuego y tipo constructivo (Fig. I-5). No

se incluyó en este mapa la ubicación de la estación de bomberos ni la distribución de los hidrantes disponibles.

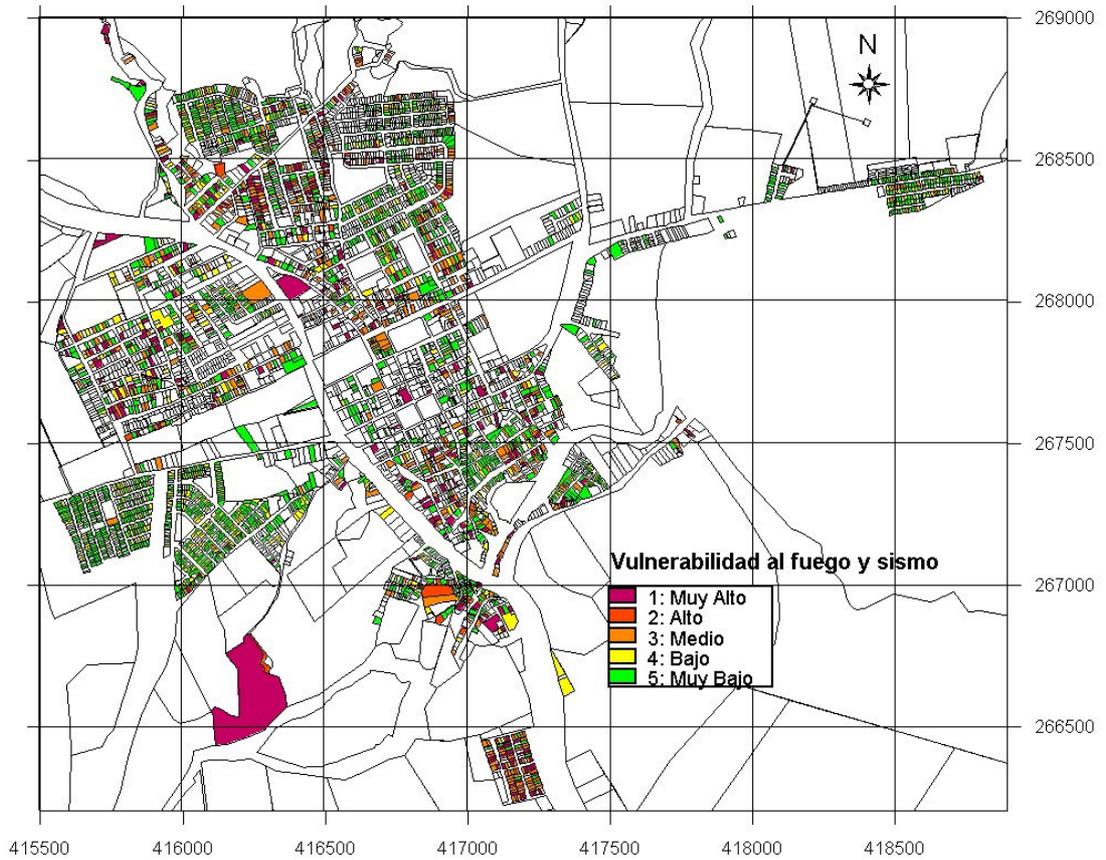


Fig. 14: Mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Cañas considerando sismo y fuego.

7 CONCLUSIONES

Del estudio determinístico de amenaza sísmica, se estimó que de ocurrir sismos de magnitud 7,7 y 6,5 en la zona de subducción (Península de Nicoya) y en la falla Chiripa o la Cote-Arenal respectivamente, en la ciudad de Cañas el terreno y edificaciones estarían expuestos a sacudidas sísmicas del grado VII y VIII de la escala Mercalli Modificada, por lo que las mismas serían percibidas por las personas de muy fuerte a severamente. En el caso de presentarse una intensidad de grado VII (MM), no se esperaría la ocurrencia de daños mayores en las edificaciones, un 68 % del total de ellas sufriría daños menores y un 32 % daños de consideración, por lo que un 25 % de la población se vería afectado de diferentes formas. En el caso de presentarse una intensidad de grado VIII, se esperaría que se presenten daños mayores en un 30 % y que un 28 % del total de edificaciones sufra daños de consideración, viéndose afectado un 50 % de la población. El resto de las edificaciones sufrirían daños menores. Efectos más severos podrían presentarse en sitios muy puntuales debido a condiciones especiales de los suelos o a deslizamientos en las regiones montañosas vecinas.

La menor o mayor vulnerabilidad física de las edificaciones en la ciudad de Cañas, es un reflejo de la calidad del diseño civil ante sismos y de los métodos constructivos utilizados. Los niveles de daños esperados e identificados como mayores o considerables, en los mapas de las figuras 12 y 13, indican que en estos lotes se presentan problemas constructivos y gran deterioro físico de las edificaciones. Lo anterior debido al envejecimiento, falta de mantenimiento, deterioro y falta de reforzamiento de las mismas, especialmente en las casas de madera que son muy viejas.

Los sismos son eventos naturales, cuya ocurrencia no puede ser evitada, por lo tanto aquellas regiones, zonas o ciudades que estén expuestas a ellos deben de estar preparados para mitigar sus efectos reduciendo la vulnerabilidad física de las edificaciones y líneas vitales.

8 RECOMENDACIONES

Para efectos de reducir la vulnerabilidad de cualquier tipo de proyecto de infraestructura a desarrollarse en la ciudad de Cañas, debido al impacto adverso de los efectos directos e indirectos de la ocurrencia de un evento sísmico, se recomienda diseñar y construir en forma correcta para disminuir la vulnerabilidad física. Lo anterior siguiendo la normativa nacional, como el Código Sísmico de Costa Rica 2002 y apoyándose en recomendaciones internacionales. A la vez establecer los controles del caso para que se cumpla con las especificaciones, cantidades y dimensionamientos propuestos en estos códigos de diseño.

Que las autoridades de la ciudad de Cañas utilice la información presentada en este informe, como el detonante para desarrollar planes de mitigación ante eventos sísmicos, que incluyan como punto importante la concientización de la población civil de la importancia de que sus viviendas y edificaciones estén bien construidas y se les de el mantenimiento y reforzamiento civil del caso, para efectos de reducir la vulnerabilidad de las mismas, y por lo tanto asegurar sus vidas.

La vulnerabilidad debido a la ocurrencia de efectos secundarios disparados por eventos sísmicos, podrá ser disminuida, si con respecto a los proyectos a desarrollar, se indica claramente la ubicación de zonas de laderas potencialmente inestables, depósitos marinos con potencial de licuefacción y valles de inundación, ya que estas condiciones locales aumentan el potencial de daños debido a la ocurrencia de un evento sísmico severo.

Es conveniente que los resultados aquí presentados sean complementados con estudios de vulnerabilidad de las líneas vitales en la región, que permitan tener una idea clara de la continuidad de la prestación de los servicios de electricidad, agua potable, telecomunicaciones, carreteras, puentes, etc.

9 REFERENCIAS

Alvarado, G., 1989: Consideraciones neotectónicas recientes en los alrededores de la Laguna de Arenal, Costa Rica. Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal, 2(3):6-21.

Astorga, A., Fernández, J.A., Barboza, G., Campos, L., Obando, J., Aguilar, A. y Obando, L. G., 1991: Cuencas Sedimentarias de Costa Rica: Evolución geodinámica y potencial de hidrocarburo. Rev. Geol. Amér. Central. 13: 25-59.

Bard, P., 1995: Local Effects on Strong Ground Motions. Basic Physical Phenomena and Estimation Methods for Microzonation Studies. International Training Course on Seismology and Seismic Hazard Assessment. Managua, Nicaragua. 33 pp.

Barquero, R., 1990: Sismicidad y tectónica de la región NW de Costa Rica, con énfasis en la zona del Proyecto Geotérmico Miravalles. Tesis de Licenciatura, Escuela C.A. de Geología, Univ. de Costa Rica, 90 pp.

Boschini, I. 1985: Informe preliminar de la actividad sísmica en la zona cercana al volcán Miravalles, abril-mayo 1985. Inf. Int. ICE. 3 págs.

Climent, A., Taylor, W., Ciudad Real, M., Strauch, W., Villagrán, M., Dahle, A., Bungun, H. 1994: Spectral strong motion attenuation in Central America. Tech. Report No. 2-17 NORSAR. 63 pp.

Climent, A. y Arroyo, I., 2002: P.H. Boruca, Estudio de Amenaza Sísmica. Inf. Interno ICE. C.S. Exploración Subterránea, PySA. 27 pp + figs.

Cornell, C.A., 1968: Engineering Seismic Hazard Analysis. Bull. Seismic. Soc. Amer., 58,(5), 1583-1606.

Giardini, D. y Basham, P. (eds.), 1993: Global Seismic Hazard Assessment Program. Istituto Nazionale di Geofisica, Annali di Geofisica, Special issue, UN/IDNDR. XXXVI, 3-4: vi + 257 pp.

Gutenberg, B y Richter, C., 1954: Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Hajner. New York.

ITC, 2001: ILWIS 3.0 Academic. User`s Guide. Unit Geo Software Development Sector Remote Sensing & GIS, IT Department. International Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede, The Netherlands.

Jacob, K. H., Pacheco, J. y Santana, G., 1991: Seismology and Tectonics. En Costa Rica Earthquake of April 22, 1991-Reconnaissance Report. Earthquake Spectra, Supplement B to Volumen 7. 15-33.

Kramer, S., 1996: Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. 653 pp.

Krinitzsky, E.L. Gould, J.P. y Edinger, P.E., 1993. Fundamentals of earthquake-resistant construction. -John Wiley & Sons, Inc., New York, xxviii + 299 pp.

Krinitzsky, E. L., 1995a: State of the Art for Assessing Earthquake Hazard in the United States. Selection of Earthquake Ground Motions for Engineering. U.S. Army Corps of Engineers. Report 29. 54 pp.

Krinitzsky, E. L., 1995b: Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures. Engineering Geology 40:1-7.

Laporte, M., Lindholm, C., Bungum, H. y Dahle, A., 1994: Seismic hazard for Costa Rica. Technical Report No. 2-14, RONDICA Project. Kjeller, Noruega. 73 pp.

Laporte, M., Barquero, R. y Climent, A., 1995: Estudio de amenaza sísmica para los P.H. Peñas Blancas y Laguna Hule y el P.G. Miravalles III. Inf. Interno ICE. 56 pp.

Matumoto, T., Liaw, H.B., Guendel, F., Avila, G. y Olivares, E., 1978: Análisis de datos pasivos red sismográfica de Guanacaste. Inf. Interno ICE. 26 pp.

McGuire, R.K., 1976: FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis, USGS, Open File Report 76-67.

Miyamura, S. 1980: Sismicidad de Costa Rica. Ed. Univ. de Costa Rica. 190 pp.

Montero, W., 1984: Sismicidad y riesgo sísmico del Proyecto Sandillal, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. Inf. Interno ICE, 52 pp..

Montero, W., 1989. Sismicidad histórica de Costa Rica 1638-1910. Geof. Int., Vol. 28-3 , pp 531-559.

Montero, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. Rev. Geológica de América Central, 24:29-56.

Montero, W. y Alvarado, G. E., 1988: Los terremotos de Bagaces de 1935 y 1941: Neotectonismo transversal a la Cordillera Volcánica de Guanacaste, Costa Rica. Ciencia y Tecnología: 12(1-2):69-87.

Mora, S. y Morales, L.D., 1986: Los sismos como fuente generadora de deslizamientos y su influencia sobre la infraestructura y líneas vitales de Costa Rica. 4º Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-reistente. Seminario de Ingeniería Estructural.

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 3-8 noviembre de 1986, San José, 201-214.

Morales, L.D., 1983. Riesgos geológicos asociados con terremotos en los alrededores del Golfo de Nicoya. *Bresensia* 21:93-117.

Morales, L.D., 1985: Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. *Rev. Geol. de Amér. Central*, 3:69-101.

Peraldo, G. y Montero, W., 1994: Temblores del período colonial de Costa Rica.- Ed. Tecnológica de Costa Rica. 162 pp.

Plafker, G. 1973: Field reconnaissance of the effects of the earthquake of april 1973 near Laguna de Arenal, Costa Rica. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 63:1847-1856.

Red Sismológica Nacional: Boletín sismológico de Costa Rica (1984-2002).

Reiter, L., 1991. *Earthquake Hazard Analysis, Issues and Insights*. Columbia University Press, New York. X+254 pp.

Rojas, W., Bungum, H. y Lindholm, C., 1993: A catalog of historical and recent earthquakes in Central America. -NORSAR report, 77 pp.

Rojas, W., Lindholm, C., Bungum, H., Boschini, I., Climent, A., Barquero, R., Alvarado, G., Soto, G., Montero, W., Fernández, M., Protti, M., Moya, A., Esquivel, L. y Schmidt, V., 1998: *Seismic Hazard Analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley, Costa Rica*. Technical Report, Norsar, Norway. 58 pp.

Sauter, F., 1989: *Fundamentos de Ingeniería Sísmica 1. Introducción a la Sismología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 271 pp.

Tristán, J.F., 1916: The Costa Rica Earthquake of February 27, 1916.- *Bull. Seism. Soc. Amer.* 4:332-335.

Wald, D., Quitariano, V., Heaton, T. y Kanamori, H., 1999: Relations between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, Volume 15, No. 3, pp. 557-564.

White, R. A., and D. H., Harlow, 1993: Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, vol. 83, No. 4:1115-1142.