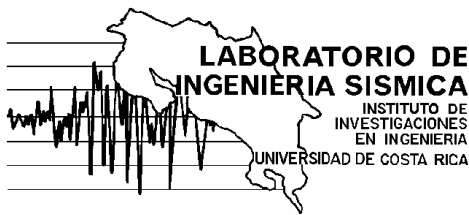


**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA
LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA**



**Proyecto de investigación: Redefinición
de la escala de intensidad Mercalli
Modificada para Costa Rica, No. 731-A5-
093**

Informe final

Por: Ing. Víctor Schmidt Díaz, investigador principal

15 de Diciembre del 2006

Informe administrativo

Título: Redefinición de la escala de intensidad Mercalli Modificada (MM) para Costa Rica, No. 731-A5-093

Vigencia: el proyecto se llevó a cabo en dos etapas:

- Del 01 de enero del 2005 al 31 de diciembre del 2005
- Del 01 de enero del 2006 al 15 de diciembre del 2006

Investigadores:

**Víctor Schmidt Dáiz, investigador principal, jornada 1/8 TC.
Cesar Aarón Moya Fernández, investigador asociado, jornada 1/8 TC
Asistente de investigación: Luis Retana Vargas, colaborador**

Contenido presupuestario:

Partidas asignadas durante el 2005:

| | |
|--------------------------------------|----------|
| - Repuestos y accesorios: | ¢ 35 000 |
| - Útiles y materiales de oficina | ¢ 30 000 |
| - Útiles y materiales de computación | ¢ 80 000 |

Partidas asignadas durante el 2006:

| | |
|--------------------------------------|----------|
| - Herramientas, instrumentos y otros | ¢ 50 000 |
| - Útiles y materiales de oficina | ¢ 10 000 |

Con estos montos se han adquirido: tintas para impresora, materiales para presentar los informes, UPS y baterías para los acelerógrafos.

Otros montos como: papelería, fotocopiado y encuadernación fueron cubiertos con fondos propios del LIS o bien, con presupuesto ordinario del Instituto.

Los objetivos planteados se cumplieron totalmente, aunque el proyecto abre posibilidades para el desarrollo de investigaciones afines, como: curvas de fragilidad para sistemas estructurales en Costa Rica, generación de mapa de daños y pérdidas económicas a partir de estimaciones de las intensidades, correlación de la intensidad con otros parámetros obtenidos a partir de los acelerogramas, entre otros.

Informe científico

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Resumen..... | 4 |
| 2. Introducción..... | 4 |
| 3. Justificación..... | 5 |
| 4. Resultados preliminares..... | 6 |
| 4.1 Tipos de sensores considerados en las escalas de intensidad y clasificación de estructuras para Costa Rica. | 6 |
| 4.2 Definición de niveles de daño y revisión del archivo fotográfico | 8 |
| 4.3 Readecuación de la escala MM a partir de datos locales..... | 11 |
| 4.4 Replanteo de los mapas de intensidad..... | 14 |
| 4.5 Correlaciones sugeridas | 17 |
| 5. Conclusiones preliminares | 20 |
| 6. Referencias bibliográficas | 20 |

Título de la investigación: Redefinición de la escala de intensidad Mercalli Modificada (MM) para Costa Rica.¹

Investigador principal: Ing. Víctor Schmidt Díaz², Aarón Moya Fernández, Asociado²
Asistente de Investigación: Luis Retana Vargas²

Resumen

Debido a que en medios periodísticos y de investigación, las escalas de intensidad sísmica son todavía muy utilizadas para la determinación preliminar de la forma en que los sismos sacuden una región y tomado en cuenta que la descripción de la escala de intensidad utilizada en Costa Rica, es bastante escueta respecto a la identificación de daños en sistemas estructurales, se plantea la necesidad de llevar a cabo una revisión detallada de los distintos grados que forman dicha escala, de acuerdo con las observaciones que se han hecho sobre los efectos que han producido los sismos en el pasado.

Este documento presenta resultados acerca de las correlaciones que se pueden obtener entre la escala de intensidad Mercalli Modificada, con dos parámetros distintos:

- 1- Los niveles de daño observados en estructuras luego de la ocurrencia de sismos fuertes.
- 2- La aceleración pico del suelo (PGA) medida durante la ocurrencia de estos sismos.

Lo anterior permitirá entre otras cosas, la identificación de zonas de mayor vulnerabilidad sísmica en el país para el planteamiento de criterios que permitan destinar recursos que se orienten al mejoramiento de las condiciones en esas zonas para enfrentar sismos en el futuro.

Descriptores: intensidad sísmica, sismos fuertes, daños en estructuras, aceleración del suelo.

Introducción

La intensidad de un sismo es la medida de la forma en que las ondas sísmicas son sentidas y de cómo se asocian a los efectos que estas producen en una determinada localidad, ya sea en estructuras o en la naturaleza; por lo tanto una medida de la fuerza de un sismo.

Existen varias escalas para determinar la intensidad de un evento sísmico. La más utilizada es la Mercalli Modificada, donde cada grado de intensidad (de I a XII) aporta una descripción de la forma en que el sismo es sentido por las personas, los efectos y los daños observados, o sea, de alguna forma indica la fuerza de un sismo en un sitio determinado. También existe la Escala de Intensidad Macrosísmica Europea (EMS) la cual utiliza también doce grados de intensidad. Otras escalas importantes utilizadas alrededor del mundo son: la Medredev-Sponheuer-Karnik (MSK), la de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), la Rossi-Forel (RF). Algunas de ellas cuantifican los daños, las cantidades y las vulnerabilidades de las diferentes estructuras.

¹ No. Vicerrectoría de Investigación: 731-A5-093

² Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería

Basándose en su definición, la intensidad para un sismo dado suele ser máxima en las zonas cercanas al epicentro y disminuye con la distancia. Sin embargo, debe aclararse que la intensidad es un parámetro subjetivo y no medido: depende de la percepción de las personas para definir los niveles bajos de la escala, y de los efectos observados en la naturaleza y en las edificaciones para definir los niveles medios y altos.

Aún cuando no correspondan a un mismo concepto, varios investigadores en otros países han intentado correlacionar las intensidades estimada en sitios determinados con las aceleraciones máximas del terreno (PGA) medidas en esos sitios, ya que el PGA es un parámetro que también se atenúan con la distancia, lo que ha permitido obtener resultados interesantes pero no exactos; más bien se han obtenido rangos de aceleración posibles asociados a un valor de intensidad específico. Por lo tanto, estas correlaciones han permitido establecer una aproximación más racional acerca de la fuerza de los sismos, por lo que se espera obtener correlaciones entre estos parámetros a través de esta investigación.

Por otro lado, la aplicación de las escalas de intensidad en Costa Rica normalmente ha sido realizada sin tomar en cuenta aspectos constructivos y de diseño propios del país, así como consideraciones subjetivas de percepción y apreciación que pueden diferir de una persona a otra. Basándose en esto, a través del proyecto se pretende revisar las descripciones de las escalas, enfocándose principalmente en daños estructurales y no estructurales de edificios, y así formular un procedimiento que permita la asignación de la intensidad de la escala MM a partir de la observación de daños, tanto en estructurales como efectos geotécnicos, aplicados al contexto nacional.

Como parte de las investigaciones efectuadas a partir de los datos de algunos de los sismos fuertes que han afectado Costa Rica recientemente, el LIS ha recopilado una gran cantidad de información relacionada con los efectos en las estructuras, especialmente luego de los terremotos de Cóbano, Alajuela y Limón (Santana *et al.* 1990; Santana *et al.*, 1991 y Ramírez y Brenes, 1994). Parte de la información corresponde a un banco de imágenes que incluye unas 250 fotografías y 1550 de diapositivas, que muestran los daños en puentes, carreteras, edificios y otras estructuras, producidos por los terremotos de 1990 y 1991.

Desde la década de 1980, la Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR) y el OVSICORI-UNA, han realizado investigaciones relacionadas con la distribución de intensidades en Costa Rica, tanto de sismos históricos, como de sismos ocurridos durante las últimas dos décadas (Montero y Miyamura, 1981; Boschini, 1989; Montero *et al.* 1993; Montero, 1999, entre muchos otros). No obstante, hasta el momento no hay ninguna publicación que muestre una relación entre la intensidad reportada y la aceleración registrada para Costa Rica, ni tampoco una investigación que describa en forma minuciosa una escala intensidad adaptada a las condiciones existentes en el país.

Justificación

Costa Rica está ubicada en una zona de alta sismicidad. El país forma parte de la placa Caribe y la microplaca de Panamá, las cuales interactúan con las placas del Coco y Nazca. Estas cuatro placas se unen en territorio costarricense y sus movimientos son los responsables de la gran cantidad de terremotos que afectan al país.

A lo largo de la historia desde la época de la independencia, Costa Rica ha sufrido los efectos de unos 40 terremotos, catorce de los cuales han cobrado la vida de alrededor de 750 personas. La mayor tragedia relacionada con un evento sísmico ocurrió el 4 de mayo de 1910, cuando un terremoto de 6,1 (Ms) destruyó totalmente la ciudad de Cartago dejando un saldo de 500 muertos.

Inevitablemente, los sismos destructivos volverán a ocurrir en el futuro y por esta razón, deben desarrollarse investigaciones tendientes a mitigar los efectos destructivos provocados por los sismos fuertes.

Hasta el momento, el LIS ha trabajado muy poco en la determinación del grado de intensidad provocado por un evento específico. A raíz de la ocurrencia de los sismos de Bijagua y Burica en el 2002, y de las dificultades presentadas al asignar un grado de intensidad en ciertas localidades, el personal del LIS comenzó a cuestionarse acerca de la versatilidad de la escala de Intensidad Mercalli Modificada (MM) tomando en cuenta las características de los sistemas constructivos en Costa Rica y el efecto en la población.

Es por esto que se ha visto la necesidad de adaptar la escala Mercalli Modificada (usada tradicionalmente en Costa Rica) a las condiciones de los sistemas constructivos existentes en el país. De esta forma, será más sencillo asignar un determinado grado de intensidad, tomando en cuenta descripciones minuciosas de los efectos en diversas estructuras.

Por otra parte, el establecer una correlación entre la aceleración registrada en el LIS y la intensidad reportada, permitirá entre otras cosas, categorizar cada grado de intensidad en forma cuantitativa, lo cual será muy útil para plantear interpretaciones relacionadas con efectos de sitio, amenaza sísmica y sismicidad histórica en general.

Con base en lo anterior, se definen los siguiente objetivos:

- Redefinir en forma preliminar la escala de intensidad Mercalli Modificada (MM) con base en los daños observados en las estructuras de distintos sistemas constructivos utilizados en Costa Rica y el valor de aceleración registrado por la red de acelerógrafos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) durante el período 1983–2003.
- Establecer correlaciones entre la intensidad sísmica (parámetro subjetivo) y la aceleración del terreno (parámetro medido), ya que en términos generales, ambos son máximos en la zona epicentral y disminuyen con la distancia.

Resultados preliminares

4.1 Tipos de sensores considerados en las escalas de intensidad y clasificación de estructuras para Costa Rica

Cualquier escala de intensidad consiste en una serie de descripciones de diferentes efectos que tienen los sismos en un número de objetos que pueden ser encontrados en el entorno diario. Tales parámetros se consideran como “sensores”, ya que su respuesta ante un sismo es utilizada para medir la fuerza del mismo. Estos sensores suelen ser muy comunes, lo que implica una ventaja al utilizarlos como herramientas para la definición de la intensidad, ya que no requiere de instrumentación para ser medidos. Los sensores han sido clasificados tradicionalmente en cuatro grupos:

- Seres Vivos- *personas y animales. Conforme la intensidad aumenta, una mayor proporción de gente o animales sienten el sismo y/o se asustan por él.*
- Objetos ordinarios - *conforme la intensidad aumenta, mayor cantidad de objetos domésticos (libros, ollas, etc.) se sacuden y luego vuelcan o caen.*
- Edificaciones – *conforme aumenta la intensidad, las edificaciones se van dañando progresivamente.*

- Geología y entorno – *conforme aumenta la intensidad existen mayores cambios en el entorno y aparecen mayores grietas en el suelo, o deslizamientos.*

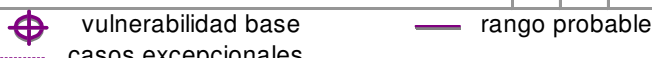
En esta investigación solamente interesa revisar los sensores definidos como *edificaciones*, debido a que no son tomados en cuenta detalladamente en las descripciones proporcionadas por la escala MM.

Los tipos de edificaciones que se considerarán en este análisis y que son comunes en Costa Rica se clasifican de la manera que se muestra en el cuadro 1. El círculo corresponde a la categoría predominante y las líneas a posibles categorías que puede asumir cada sistema estructural. Van de la A, que corresponde a sistemas que se comportan muy bien ante sismos, hasta la F, cuyo comportamiento se considera como muy deficiente.

Obsérvese que son las estructuras tipo F las más vulnerables ya que están formadas por materiales de desecho, tales como: cartón, plástico, madera en mal estado, adobe muy antiguo, o bien construidas antes de la existencia de los códigos de diseño. Por el contrario, algunas estructuras de acero, concreto reforzado y mampostería son las que han mostrado un mejor comportamiento ante sismos (estructuras tipo A).

Considerando lo anterior, se procedió a revisar todo el banco de fotografías disponibles en el LIS sobre daños producidos por terremotos, para evidenciar otros posibles efectos que frecuentemente se observan en las estructuras una vez ocurrido el sismo.

Cuadro 1. Clasificación de las estructuras para Costa Rica, tomando en cuenta los sistemas constructivos que predominan

| Clasificaciones adaptadas para Costa Rica | | | | | | |
|--|------|---|---|---|---|---|
| Descripción de la estructura | Tipo | | | | | |
| | F | E | D | C | B | A |
| Desecho Estructuras en desecho | ⊕ | | | | | |
| Adobe Estructuras en adobe | ⊕ | — | | | | |
| Mampostería Roca Masiva (Canto Rodado) Mampostería sin refuerzo Mampostería confinada o con refuerzo integral | | | ⊕ | — | | |
| | | ⊕ | — | | | |
| | | | | ⊕ | — | ⋯ |
| Concreto Reforzado Estructuras a base de marcos en RC Estructuras a base de muros en RC | | | | ⊕ | — | |
| | | | ⋯ | ⊕ | — | |
| Madera Estructuras en madera Pilotes de madera sin arriostrar Pilotes de madera arriostrados | | | ⊕ | — | ⋯ | |
| | | ⊕ | — | | | |
| | | | ⊕ | — | | |
| Acero Estructuras en acero | | | | | ⊕ | — |
| Prefabricado Estructuras a base de marcos prefabricados Prefabricado total (vivienda) | | | | ⊕ | — | |
| | | | ⋯ | ⊕ | — | |
|  | | | | | | |

4.2 Definición de niveles de daño y revisión del archivo fotográfico

La mayoría de las escalas de intensidad antiguas trataban el daño en estructuras de una manera muy limitada, ya que los sistemas constructivos que predominaban eran muy pocos, por lo que el daño de ellos era descrito de una forma muy simplificada. En la actualidad, al existir una gran cantidad de sistemas constructivos vigentes cuyo comportamiento estructural ante sismos suele ser muy distinto, se hace necesario definir relaciones entre el daño observado y la intensidad asociada en ese sitio, lográndose incorporar estos nuevos criterios para la determinación de la intensidad.

Al considerar el daño en estructuras, es fundamental determinar si éste es estructural (en elementos esenciales para que la estructura se mantenga en pie, por ejemplo: vigas, columnas, algunos muros), o bien, en elementos no estructurales, que son aquellos que si fallan, la estructura puede seguir en pie (ej. paredes de cerramiento, cielorrasos, puertas, ventanas, etc.).

Tomando como base la escala de intensidad europea (EMS-98), en la cuál se hace referencia al grado de daño que pueden presentar las estructuras, se elaboró la

siguiente descripción para cada grado, mostrada en el cuadro 2. Para esto se consideraron además las observaciones hechas a partir del archivo fotográfico que mantiene el LIS.

Cuadro 2. Niveles de daño posibles en estructuras, basados en la escala EMS-98, en el archivo fotográfico del LIS y en la mayoría de sistemas constructivos existentes en el país.

| |
|---|
| <p>Grado 1: Plenamente operativo No existe daño estructural, y existe muy poco daño no estructural</p> |
| <p>Caída de fragmentos muy pequeños de mortero. Grietas finas en repello de miembros de marcos o en la base de las paredes. Grietas finas en paredes y divisiones.</p> |
| <p>Grado 2: Desempeño operativo Poco daño estructural, y daño no estructural moderado</p> |
| <p>Grietas finas en muchas paredes. Caída de piezas medianas de repello frágil. Caída o desplazamiento de paneles de cielos colgantes. Grietas en miembros de marcos y en muros estructurales. Grietas en divisiones, caída de cubiertas. Caída de mortero de juntas.</p> |
| <p>Grado 3: Seguridad de vidas Daño estructural moderado, severo daño no estructural</p> |
| <p>Grietas grandes y largas en la mayor parte de las paredes. Desprendimiento de tejas. Fractura de chimeneas en la línea de techo. Fallas generales y en ocasiones colapso de cielos rasos Falla individual de elementos no estructurales (divisiones, cerramientos) Grietas en columnas, en uniones viga-columna, en la base de los marcos y en juntas de muros. Desprendimiento de piezas grandes de repello y de concreto. Deformaciones en las varillas de refuerzo. Caída de tapicheles en mampostería sin refuerzo. Evidencias de falla por columna corta.</p> |
| <p>Grado 4: Colapso cercano Daño estructural severo, daño no estructural muy severo</p> |
| <p>Falla severa de paredes. Falla parcial de techos y pisos. Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el concreto por compresión y rotura de armaduras. Ladeo de columnas Colapso de algunas columnas o del nivel superior. Daños por columna corta (con falla en las paredes)</p> |
| <p>Grado 5: Colapso Daño estructural muy severo</p> |
| <p>Colapso total o de secciones (alas) de edificios.</p> |

Es importante indicar que todas las estructuras no son igualmente vulnerables. Una forma de entender este concepto es que, al comparar los daños sufridos por dos estructuras ubicadas una a la par de la otra que son sometidas a la misma sacudida sísmica pero construidas con diferentes sistemas o materiales, la que presenta mayor vulnerabilidad es aquella que sufrió mayores daños.

Hay varios aspectos que afectan significativamente la vulnerabilidad de una estructura, entre ellos:

- La calidad de los materiales y de la mano de obra: entre más control se tiene en estos aspectos, la estructura es menos vulnerable.
- El mantenimiento y estado de preservación: sobretodo es un aspecto importante en estructuras antiguas, que ya hayan superado su vida útil.
- La existencia de códigos de diseño: se ha observado un evidente mejor comportamiento de edificaciones diseñadas bajo normas sísmicas, respecto a las que no han seguido algún código de diseño.
- El tipo de sistema constructivo: hay sistemas que muestran un mejor comportamiento ante sismos respecto a otros.

Los aspectos anteriormente mencionados son difíciles de tomar en cuenta a la hora de determinar la intensidad en un sitio. Sin embargo, deben ser considerados en una encuesta cuando se evalúe el estado de la estructura dañada.

A continuación se muestran unas fotografías a modo ejemplo, que corresponden al terremoto de Alajuela y al de Limón, que fueron utilizadas para redefinir las intensidades debidas a estos sismos.



a) Fotografías de estructuras dañadas debido al terremoto de Alajuela (22/12/90). Corresponden a grado de daño 3 (foto izquierda) y grado 5 (foto derecha)



b) Fotografías de estructuras dañadas debido al terremoto de Limón (22/04/91). Corresponden a la modalidad de daños en líneas del tren (intensidad X) y licuación del terreno (intensidad IX-X)

Figura 1. Algunas fotografías utilizadas en la redefinición de la escala Mercalli Modificada y en el replanteo de los mapas de isosistas.

4.3 Readecuación de la escala MM a partir de datos locales

En el caso específico de esta investigación, interesa analizar los sensores correspondientes a edificaciones, ya que los datos que se han obtenido en el LIS en más de 15 años son registros fotográficos de estructuras dañadas en forma leve o severa. Debido a que los daños no estructurales y estructurales solamente se observan para intensidades intermedias y altas, es en estos grados en los que se va a centrar la atención.

En vista de que la escala MM es bastante escueta en lo que se refiere a descripción de daños en estructuras, se tomó como base la escala Macrosísmica Europea (EMS-98), la cuál aporta una descripción bastante detallada en lo referente a daños. Debido a que los tipos estructurales descritos en esta escala y los utilizados en Costa Rica son distintos, fue necesario establecer equivalencias tomando en cuenta los tipos definidos por el Código Sísmico de Costa Rica 2002.

A continuación se muestra la escala MM preliminarmente adaptada, considerando el sensor "daños en estructuras" para mejorar la descripción de cada grado. Solamente se describen los grados de V en adelante, ya que para grados inferiores no se espera observar efectos en las estructuras. Se comparan con otros sensores para identificar la severidad de cada nivel.

Grado V

- a) Sentido dentro del edificio por la mayoría y fuera por pocos. Pocos se asustan y corren fuera. Muchas personas dormidas se despiertan. Animales pueden alterarse un poco. Es posible determinar la dirección de las ondas.
- b) Objetos colgantes oscilan considerablemente. Vajilla, vasos, puertas y ventanas traquean fuertemente. Objetos livianos pueden desplazarse o volcarse. Puertas y ventanas se pueden abrir o cerrar. Se quiebran ventanas en pocos casos. Líquidos en recipientes bien llenos y abiertos pueden derramarse. En pocos casos se pueden detener los relojes de péndulo.
- c) **Daño de grado 1 en pocos edificios de tipo F y/o E**
- d) En ciertos casos se modifica el caudal de los manantiales.

Grado VI

- a) Sentido dentro de edificaciones por la mayoría y fuera por muchos. Pocos pierden el balance. Muchos se asustan y corren fuera. Animales huyen de sus establos.
- b) Objetos pequeños de estabilidad media se caen. Los libros se caen de sus estantes. Los muebles pesados se pueden mover. En pocas ocasiones se quiebran platos o vasos. Campanas pequeñas de torres o campanarios pueden sonar. Se quiebran ventanas en muchos casos.
- c) **Daño de grado 1 se mantiene para estructuras de tipo F o E, pocos de tipo F o E sufren daño de grado 2, pocos de tipo D sufren de daño de grado 1.**

Grado VII

- a) Sentido por todos (dentro y fuera). La mayoría se asusta y corren afuera. Se tiene dificultad para mantener el balance. Es sentido por conductores de vehículos en marcha.
- b) Campanas grandes pueden sonar. Muebles livianos se mueven, y muebles pesados pueden volcarse. Gran cantidad de objetos caen de las repisas. La mayoría de las ventanas se quiebran
- c) **Muchos edificios de tipo F sufren daño de grado 3; pocos de grado 4. Muchos edificios de tipo E sufren daño de grado 2; pocos de grado 3. Pocos edificios de tipo D sostienen daño de grado 2. Pocos edificios de tipo C sufren daño de grado 1.**
- d) Ondas grandes en embalses y depósitos de agua; y el agua se enturbia por remoción del fango. En algunos casos, se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes altas. Cambia el nivel de agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos, vuelven a fluir manantiales que estaban secos y se secan otros que fluían.

Grado VIII

- a) Dificultad para conducir vehículos. Dificultad para mantenerse en pie incluso en el exterior. Pueden verse ondas (durante el sismo) en terreno muy suave.
- b) Muebles se vuelcan. Pueden caerse objetos como televisores, máquinas de escribir, etc. Lápidas pueden moverse, torcerse o volcarse. Pocos postes se ladean o caen
- c) **Muchos edificios de tipo F sufren daño de grado 4; pocos de grado 5. Muchos edificios de tipo E sufren daño de grado 3; pocos de grado 4. Muchos edificios de tipo D sufren daño de grado 2; pocos de grado 3. Pocos edificios de tipo C sufren daño de grado 2. Estatuas, monumentos**

o postes se mueven o giran. Pueden caerse chimeneas de fábricas y tanques elevados.

- d) Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y terraplenes con pendientes pronunciadas. Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho en terrenos húmedos. Se enturbia el agua de los lagos. Aparecen nuevos manantiales. Vuelven a tener agua pozos secos y se pueden secar pozos existentes. En muchos casos cambia el caudal y el nivel de agua en los manantiales y pozos.

Grado IX

- a) Pánico general. La gente puede caer forzadamente. Se ven ondas en terreno suave (durante el sismo).
- b) Daños considerables en mobiliario. Muchos postes ladeados o caídos
- c) **Muchos edificios de tipo F sostienen daño de grado 5. Muchos edificios de tipo E sufren daño de grado 4; pocos de grado 5. Muchos edificios de tipo D sufren daño de grado 3; pocos de grado 4. Muchos edificios de tipo C sufren daño de grado 2; pocos de grado 3. Pocos edificios de tipo C sostienen daño de grado 2. Muchos monumentos, y postes se caen o tuercen. Daños considerables en depósitos de líquidos. Ruptura parcial de tuberías subterráneas. En pocos casos se deforman los rieles de ferrocarriles ligeramente, y carreteras quedan fuera de servicio.**
- d) Se observa con frecuencia que se producen extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados (evidencias de liquefacción). Se abren grietas en el terreno de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10 centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos. Aparecen además, numerosas grietas pequeñas en el suelo. Desprendimientos de rocas y aludes. Muchos deslizamientos de tierras. Grandes olas en lagos y embalses. Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes

Grado X

- c) **La mayoría de los edificios de tipo F y E sufren daño de grado 5. Muchos edificios de tipo D sufren daño de grado 4; pocos de grado 5. Muchos edificios de tipo C sufren daño de grado 3; pocos de grado 4. Muchos edificios de tipo B sufren daño de grado 2; pocos de grado 3. Pocos edificios de tipo A sufren daño de grado 2. Daños severos en represas y puentes. Rieles de ferrocarril deformados severamente. Grandes ondulaciones en el pavimento.**
- d) Deslizamientos de tierra, desbordamiento de ríos, lagos y embalses. Gran cantidad de evidencias de liquefacción. Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro. Se producen anchas grietas paralelas a los cursos de los ríos. Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes. Desplazamientos de arenas y fangos en las zonas litorales. Cambio del nivel de agua en los pozos. Se forman nuevos lagos.

Grado XI

- c) **La mayoría de los edificios de tipo E sostienen daño de grado 5. La mayoría de los edificios de tipo D sufren daño de grado 4; muchos de grado 5. Muchos edificios de tipo C sufren daño de grado 4; pocos de grado 5. Muchos edificios de tipo B sufren daño de grado 3; pocos de grado 4. Muchos edificios de tipo A sufren daño de grado 2; pocos de**

grado 3. Rieles de ferrocarriles deformados longitudinalmente. Ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio. Daños muy severos y colapso en puentes y represas.

- d) El terreno queda considerablemente deformado tanto por desplazamientos de terrenos y caídas de rocas. Se puede observar ruptura superficial de las fallas. Gran cantidad de evidencias de licuefacción.

Grado XII

(El sismo alcanza el máximo de efectos concebible)

c) Todos los edificios de tipo de tipo F, E y prácticamente todos los de tipo D son destruidos. La mayoría de los de tipo C, B y A son destruidos.

- d) La topografía cambia. Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y verticales. Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles, producidas en vastas extensiones. Se cierran valles y se transforman en lagos. Aparecen cascadas y se desvían los ríos.

4.4 Replanteo de los mapas de intensidad

Considerando los terremotos de: Cóbano (25/03/90), Alajuela (22/12/90) y Limón (22/04/91) y el replanteo de la escala de intensidad presentada en el apartado anterior, se presentan mapas de isosistas, que se definen como *líneas que encierran áreas de igual intensidad*. Para la realización de estos mapas es necesario llevar a cabo encuestas e inspecciones de campo para poder determinar las intensidades en las diferentes localidades en el área afectada por el sismo. También es de utilidad aprovechar la información brindada por los medios de prensa y por fotografías disponibles, tomadas a horas o a pocos días después de la ocurrencia del sismo.

El dibujo de las isosistas no es siempre directo ya que los valores de intensidad pueden estar mezclados, por lo que al definir las áreas de igual intensidad, debe considerarse la que resulte predominante. Es importante recordar que el replanteo de las escalas se hizo para valores de V en adelante, que corresponde a efectos evidentes en obras civiles.

En las figuras 2, 3 y 4 se pueden observar importantes diferencias entre los mapas obtenidos a partir de las intensidades reportadas a raíz de los terremotos de Cóbano, Alajuela y Limón por la Red Sismológica Nacional y los obtenidos a través de esta investigación, en la que se ha incluido los efectos en estructuras como un parámetro descrito en forma más detallada.

A continuación se señalan las diferencias más significativas.

- **Comparación para Cóbano (figura 2):** en ambos mapas se observa una intensidad máxima de VIII, pero en el propuesto por la Red Sismológica Nacional (RSN) se aprecian en círculos como "islas" al final de la Península de Nicoya, mientras que en el mapa propuesto por este Laboratorio (LIS) las zonas con esa intensidad son más grandes. Esto se puede deber a que por parte del LIS se hizo una mejor identificación de las estructuras dañadas según el archivo fotográfico existente, por lo tanto hubo una mejor asignación de este grado de intensidad. En el Valle Central ambos estudios asignan un mismo valor de intensidad: VI. En el mapa de la RSN la intensidad IV abarca un área mayor, sobretodo en la región Caribe. Asimismo, San Carlos muestra una intensidad un grado mayor que la que propone el LIS.

- **Comparación para Alajuela (figura 3):** en este caso, las isosistas tienen formas más circulares y concéntricas en el mapa de la RSN y en el que propone el LIS estas áreas son más bien elípticas, con un alargamiento en dirección norte-sur. En ambos casos la intensidad máxima es de VIII pero en el de la RSN se observan isosistas en forma de islas, tanto en la ciudad de Alajuela como en la zona epicentral, mientras que según el LIS el área que encierra la intensidad máxima es más grande y equivale a la intensidad VII del mapa de la RSN. En ambos casos la intensidad del Valle Central es de VI y la intensidad mínima es de II, en las zonas fronterizas del país con Panamá y Nicaragua.

- **Comparación para Limón (figura 4):** según el replanteo de las escalas y la evidencia encontrada, el sismo de Limón produjo intensidades de X (específicamente evidenciada por rieles de ferrocarril retorcidos, tal y como se vio en las fotos de la figura 1), en las cercanías del Valle de la Estrella. Volviendo a figura 4, se observa que al comparar los dos mapas, las intensidades varían en un grado: el propuesto por la RSN va de IV a IX y el propuesto en este proyecto de IV a X. Además, el de la RSN muestra las áreas como círculos más o menos concéntricos respecto a la zona epicentral, mientras que el presente estudio muestra estas áreas en forma de franjas más verticales hacia el centro del país, lo que implica que se estimaron valores de intensidad más altos para las regiones Pacífico Sur y Pacífico Central al considerar los efectos en las estructuras. En cuanto a semejanzas, el Valle Central presenta el mismo valor de intensidad en ambos mapas, que es igual a VI.

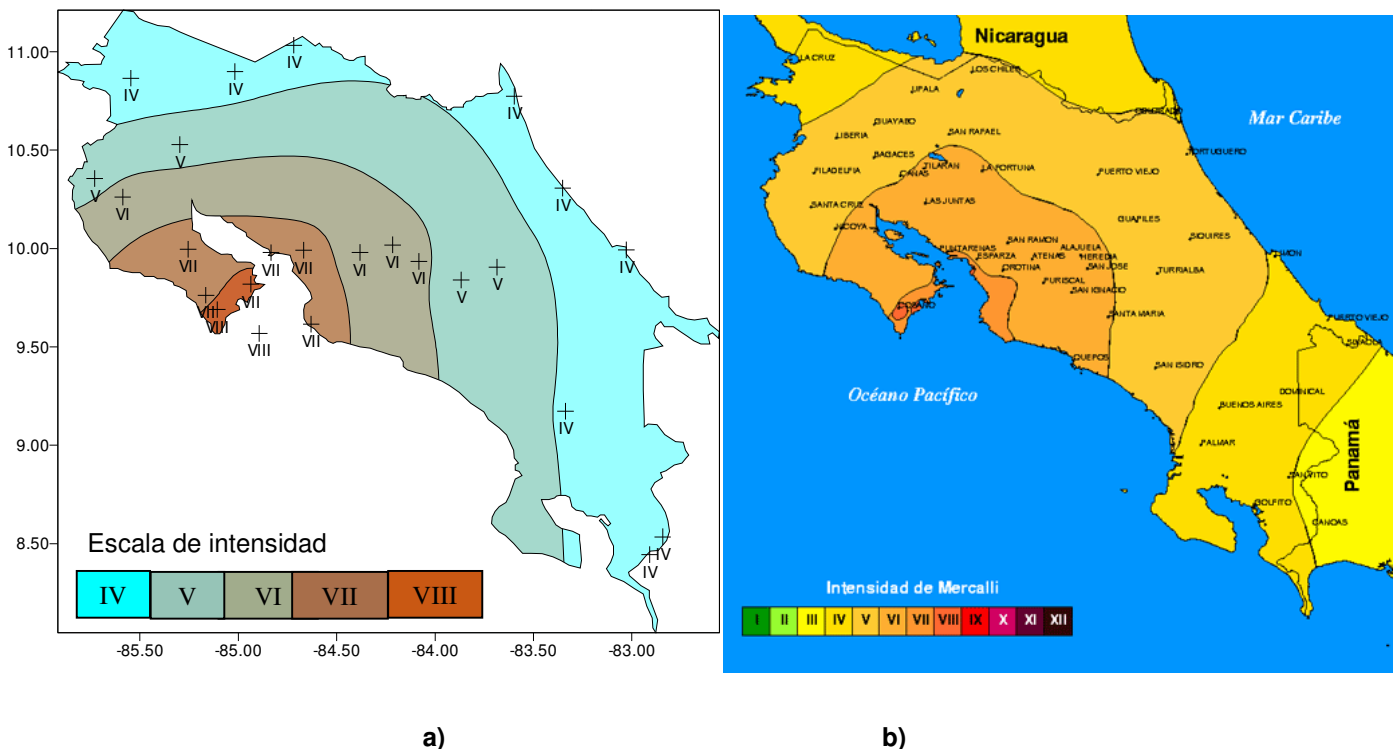
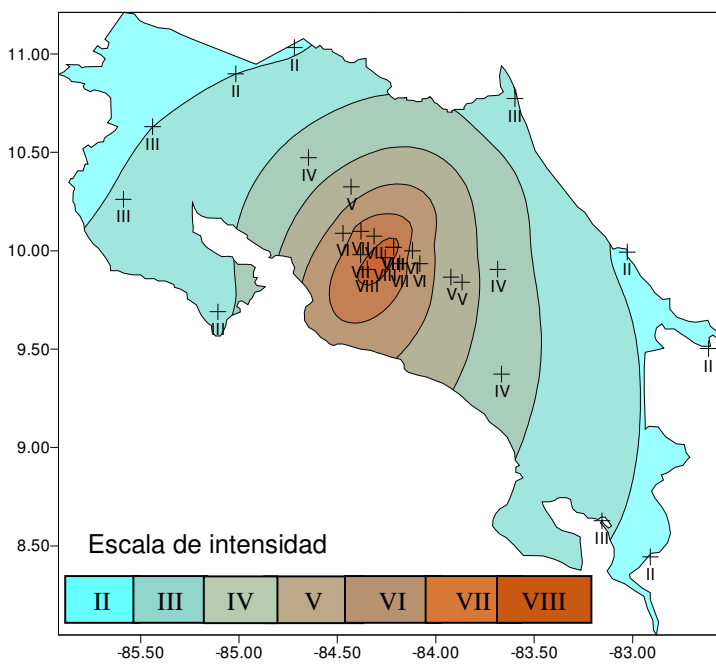
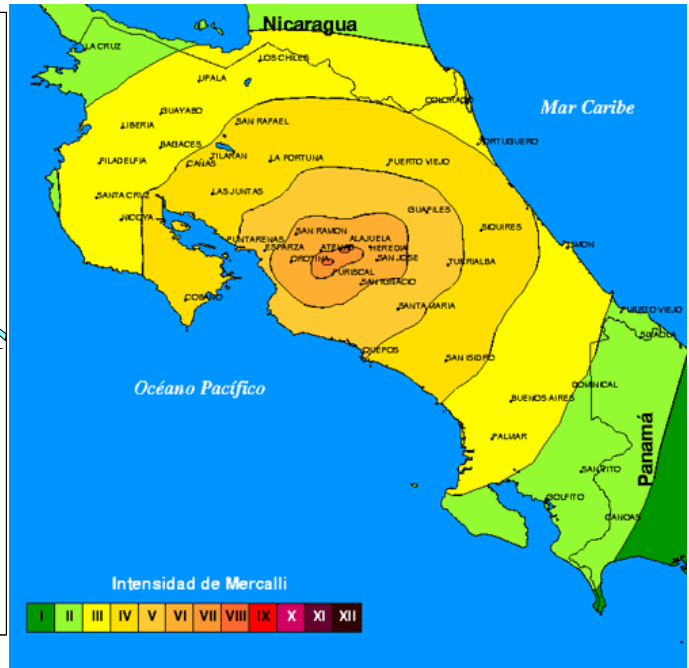


Figura 2. Comparación entre mapas de intensidad obtenidos para el sismo de Cóbano, según: a) esta investigación y b) Red Sismológica Nacional (RSN)

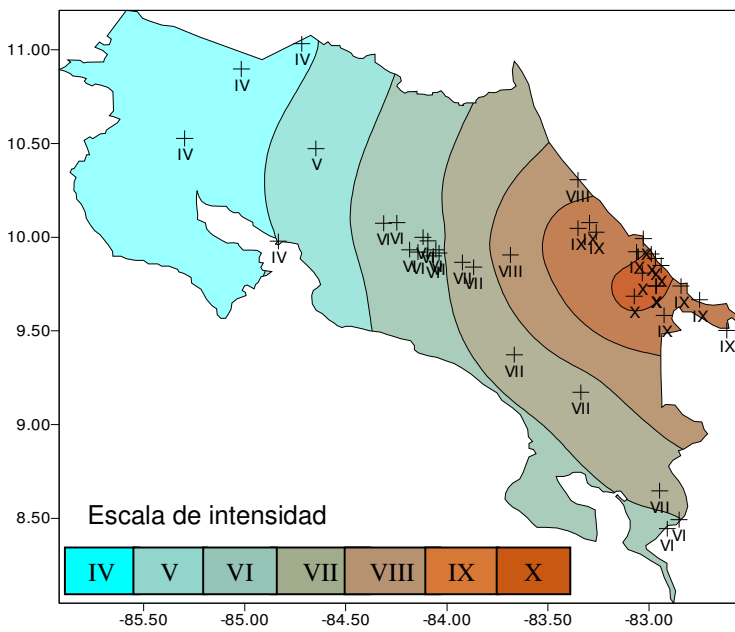


a)

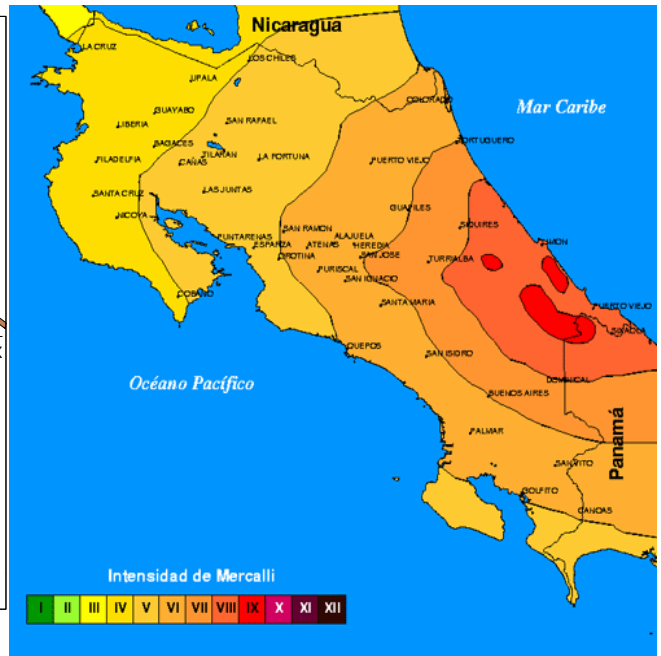


b)

Figura 3. Comparación entre mapas de intensidad obtenidos para el sismo de Alajuela, según: a) esta investigación y b) Red Sismológica Nacional (RSN)



a)



b)

Figura 4. Comparación entre mapas de intensidad obtenidos para el sismo de Limón, según: a) esta investigación y b) Red Sismológica Nacional (RSN)

4.5 Correlaciones sugeridas

Las figuras 5 a), b) y c) muestra los mapas de intensidades replanteados para los tres sismos en estudio, superpuestos a las líneas de isoaceleraciones interpoladas a partir de valores registrados en distintas estaciones. Se observa que para cada grado de intensidad existe un rango de aceleraciones, por ejemplo, en el caso del sismo de Limón, para intensidad VII los valores de aceleración varían en un rango de 0,1g a 0,25g, lo que era de esperarse ya que de acuerdo con estudios previos, no existe una relación uno a uno entre cada valor de aceleración y uno específico de intensidad.

La figura 6 ejemplifica esta afirmación, y en ella se muestra una curva (línea recta en gráfico logarítmico-lineal), que permite correlacionar ambas variables. Obsérvese que para las intensidades VI a IX hay un rango de valores para el PGA asociado equivalente. Sin embargo, al trasladarlo a escala lineal este rango realmente aumenta con la intensidad. Por ejemplo, para la intensidad VI los posibles valores de PGA van de 0,08 g a 0,25 g, mientras que para intensidad IX, el rango va de 0,2 g a 0,55 g.

La ecuación que se obtuvo como línea de mejor ajuste entre el PGA y la intensidad es:

$$\log(a) = 0.1795 \cdot I - 2.0866$$

Donde:

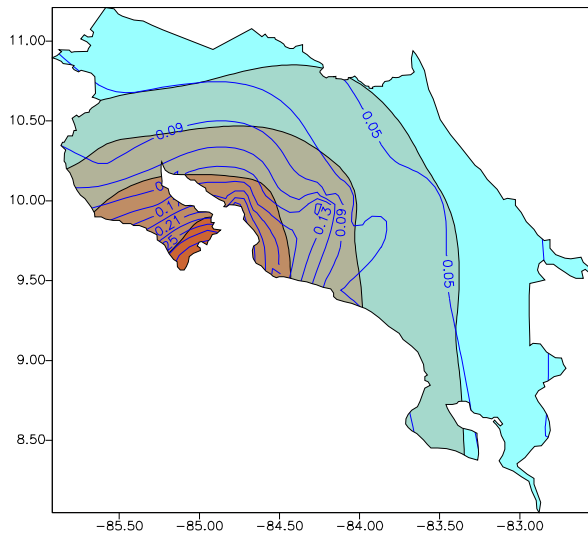
a: Aceleración pico en g.

I: Intensidad MM adaptada

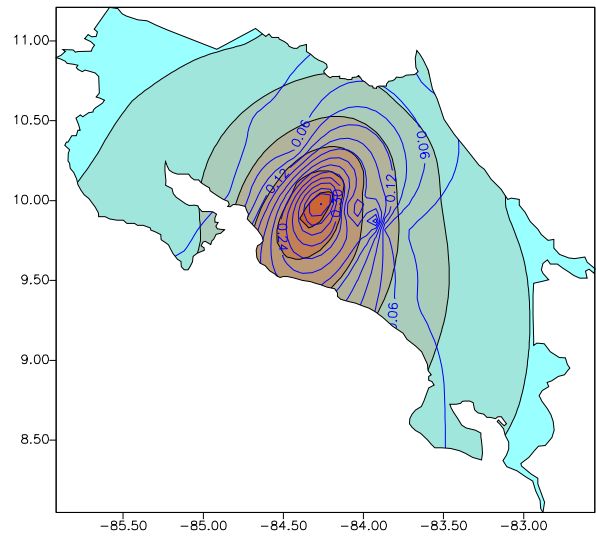
Esta misma ecuación se graficó para compararla con otras estimaciones hechas por autores de otras partes del mundo, y se obtuvo el gráfico de la figura 7.

En él se observa que hasta una intensidad de VI, la relación propuesta en este estudio estima valores de PGA mayores respecto a las demás relaciones. Justo para el valor de VI se predice un valor de PGA muy semejante a cualquiera de las demás ecuaciones y para intensidades mayores, con la ecuación local se obtienen valores inferiores que las demás. Lo anterior se debe probablemente a la falta de valores de aceleraciones altas registradas en este país, ya que el máximo valor es de apenas 0,46 g y corresponde al terremoto de Alajuela.

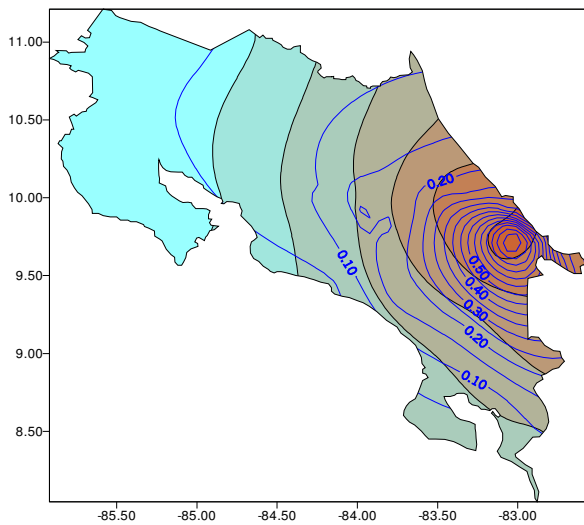
Por lo tanto, será necesario revisar la ecuación planteada en caso de que ocurra un sismo que genere PGA altos, que además tendrá probablemente asociadas intensidades altas también.



a)



b)



c)

Escala de intensidad



Figura 5. Mapas donde se superponen las isosistas con las isoaceleraciones, obtenidas a partir de la interpolación entre valores de aceleraciones registradas para los sismos de a) Cubano, b) Alajuela y c) Limón

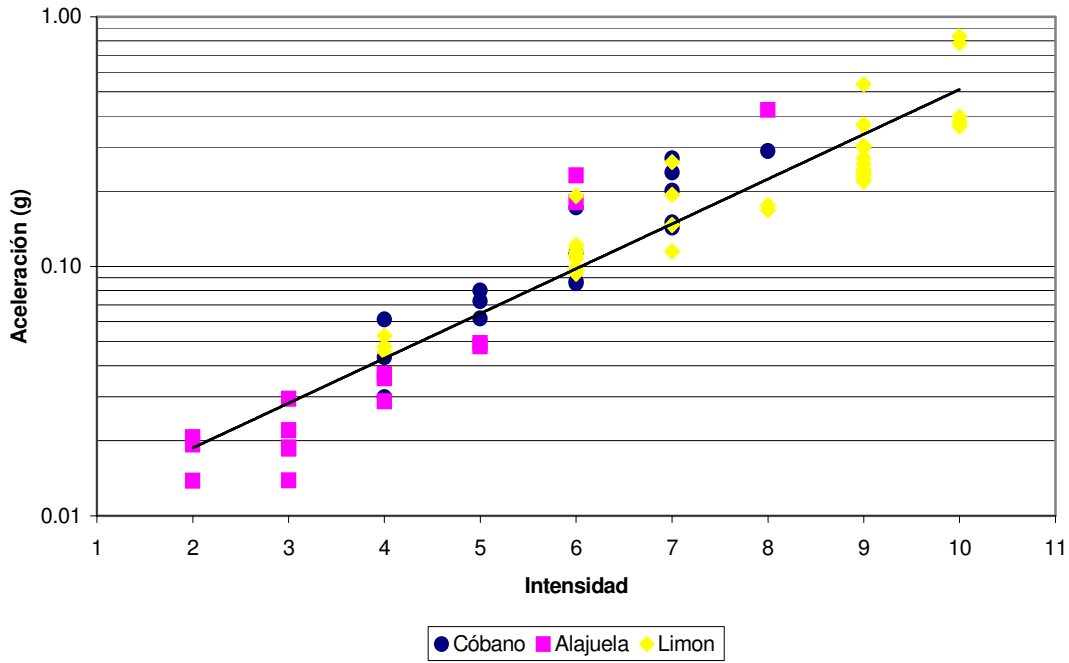


Figura 6. Correlación obtenida entre la aceleración (PGA) y la intensidad a partir de la escala replanteada

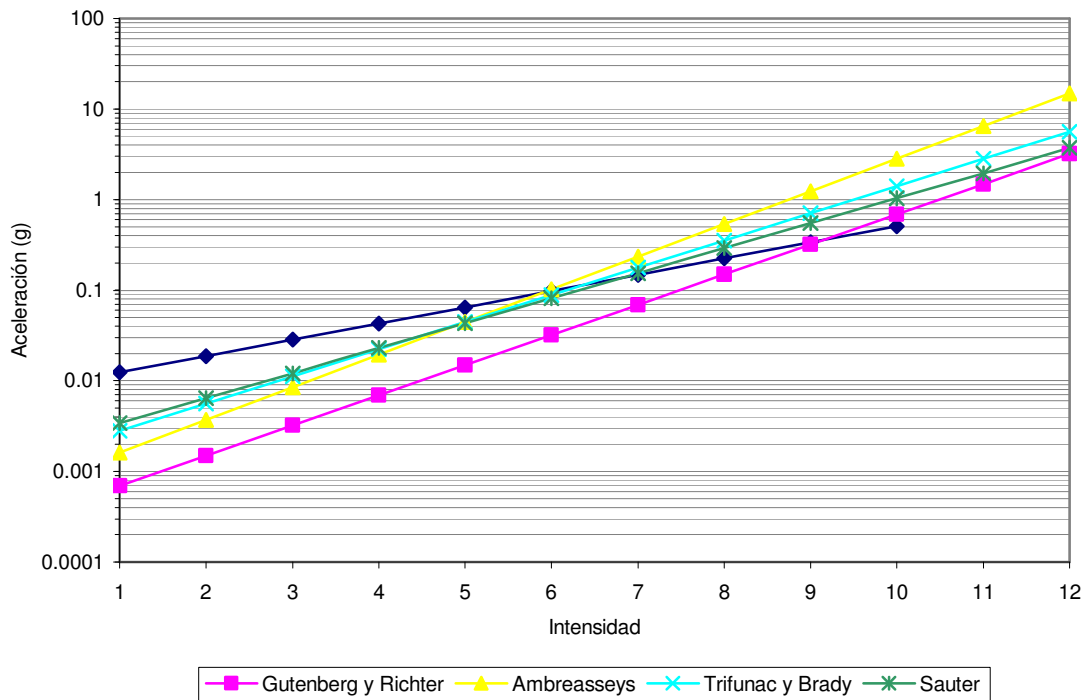


Figura 7. Comparación entre la correlación obtenida (línea azul) y las propuestas por otros autores

5. Conclusiones

En el presente estudio se logró correlacionar en forma preliminar el daño estructural observado y la aceleración pico del terreno, con los niveles de intensidad de la escala Mercalli Modificada.

La relación entre daño estructural y la intensidad se analizó al revisar la documentación fotográfica disponible en el LIS, referente a daños en estructuras debidos a sismos fuertes ocurridos en el país durante la década pasada. Se revisaron específicamente los sismos de Cóbano, Alajuela y Limón.

Al considerarse los daños en estructuras como sensor determinante a la hora de asignar un valor de intensidad, el replanteo de esta escala se llevó a cabo tomando en cuenta la Macrosísmica Europea (EMS-98), debido a que en ella sí hay una descripción detallada acerca de los niveles de daño para cada tipo estructural, a diferencia de la escala comúnmente utilizada en Costa Rica, la Mercalli Modificada. Con base en esto, se incorporaron descripciones adaptadas a la escala vigente en Costa Rica, tomando en cuenta además criterios de clasificación del Código Sísmico de Costa Rica 2002.

Una vez llevadas a cabo las etapas anteriores, se replantearon algunos mapas de intensidad disponibles, específicamente se trabajó en los correspondientes a los tres sismos mencionados, que son de los que se tiene una mayor cantidad de fotografías disponibles.

Se observaron diferencias significativas, como la aparición del grado de intensidad X en las cercanías de la zona epicentral para el terremoto de Limón, así como formas de isosistas distintas. Por ejemplo, en el caso de Alajuela el mapa propuesto por la RSN muestra áreas circulares y concéntricas, mientras que el propuesto por el LIS las presenta más bien alargadas en dirección norte-sur.

En las zonas de intensidad máxima, el presente estudio muestra áreas más grandes que el de la RSN, aún cuando los valores son los mismos.

Respecto al Valle Central, en los tres casos analizados se observan las mismas intensidades entre los mapas que se compararon.

Finalmente, se obtuvo una correlación entre las aceleraciones pico (PGA) y las intensidades, cuya ecuación de mejor ajuste resultó ser:

$$\log(a) = 0.1795 \cdot I - 2.0866$$

Al comparar el gráfico que se obtiene con esta ecuación respecto a otros propuestos por distintos autores a nivel mundial, se predicen valores semejantes para intensidad VI. Sin embargo, el presente estudio sobreestima los valores de aceleración para intensidades inferiores.

Será importante en el futuro, revisar y recalcular esta ecuación sobretodo cuando se registren sismos con valores de aceleración altos (superiores que 0,5 g), que es de lo que carece la base de datos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica actualmente.

6. Referencias bibliográficas

Bolt. B.A. (1981) Terremotos. Barcelona, España; Editorial Reverté.

FEMA. (1988) Rapid Visual Screening of buildings for Potential Seismic Hazards (Boletín ATC-21) Redwood City California; FEMA editorial.

Krinitzky. E, Chang. F (1987) Parameters for specifying intensity related earthquake ground motions. Washington DC, Army Corps editorial.

Sauter. F. (1989). Introducción a la Sismología Costa Rica; Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Cruz. M, Infante. E, Schmidt. V. (1991) "*Evaluación del potencial daño de sismos recientes en Costa Rica*" en Memorias Congreso de Ingeniería Sísmica. Costa Rica.

Schmidt. V, Climent. A, Dale. A, Bungum. H (1998). Relaciones espectrales de atenuación para América Central y para Costa Rica. Costa Rica.

<http://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/mercalli.htm>

<http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projekt/ems/index.html>

<http://www.gsrq.nmh.ac.uk/hazard/histint.htm>

<http://geology.about.com/library/bl/blmagtable.htm>

<http://www.ugr.es/~iag/divulgacion.html>

<http://www.proteccioncivil.org/vademecum/vdm009.htm>

<http://www.quakes.bgs.ac.uk>

<http://www.serviziosismico.it>