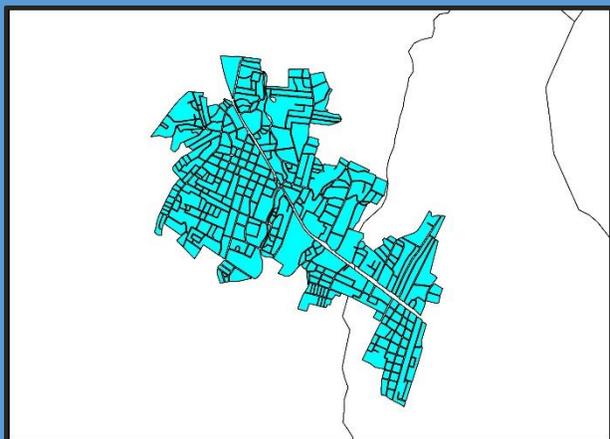
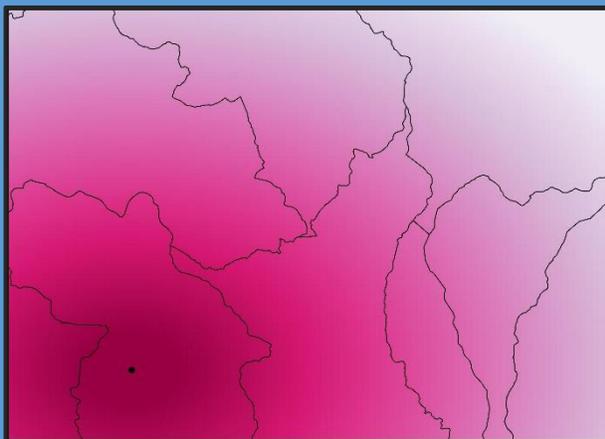
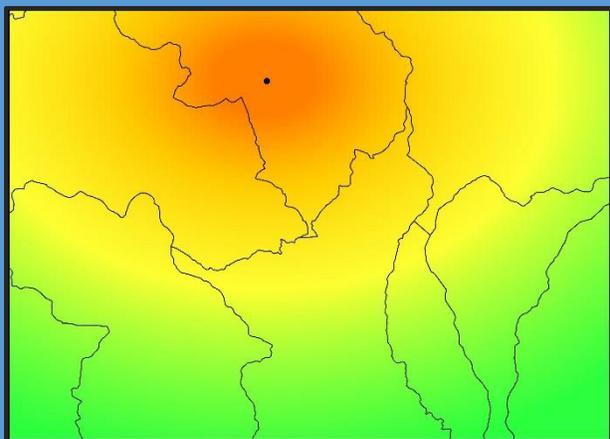
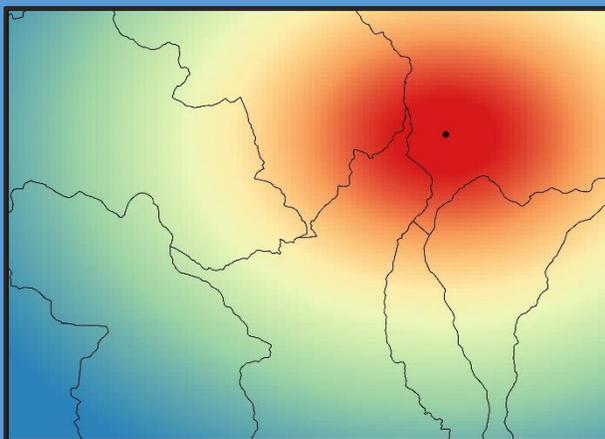


**EVALUACIÓN DE LA
VULNERABILIDAD SÍSMICA
PARA VIVIENDAS Y EDIFICIOS
COMERCIALES MENORES EN EL
ÁREA CENTRAL DE PÉREZ
ZELEDÓN, COSTA RICA.**



Abstract

The main purpose of this project is the realization of an engineering study that will serve to determine and publicize the seismic hazard in the canton of Pérez Zeledón, as well as the different levels of seismic vulnerability for certain buildings located in the southern part of our country, specifically of those located in Pérez Zeledón, in the province of San José.

To meet the project's objective a research was conducted, to observe and record the materials used in the construction of the buildings included in the study, the geometry of structural configurations, as well as the different techniques and methods of execution utilized in engineering projects developed in the region. Furthermore, it was necessary to obtain information on the magnitude, intensity and frequency of the seismic events that have affected the canton historically, to determine the impact of these events in the areas of analytical interest for the project and anticipate the characteristics of the earthquakes that could occur in the upcoming years. After establishing the seismic hazard of the region and the vulnerability of the analyzed buildings the study proceeds to estimate the probability of failure in each of the structural types, under varying levels of ground motion and considering the main factors involved in this phenomenon.

The project concludes with sufficient data to establish and report the degree of expected damage in residences and simple commercial buildings in the area of Perez Zeledón (specifically on the district of San Isidro de El General) for the most critical scenarios in terms of seismic activity expected to happen in this geographic region, given the reported potential for earthquakes of destructive magnitudes.

Keywords: vulnerability, structural types, seismic risk, Pérez Zeledón, San Isidro de El General.

Resumen

El fin principal de este proyecto es la realización de un estudio ingenieril que sirva para dar a conocer la amenaza sísmica del cantón de Pérez Zeledón, así como los distintos niveles de vulnerabilidad para ciertas edificaciones localizadas en la zona sur del país, específicamente de aquellas ubicadas en el cantón de Pérez Zeledón, en la provincia de San José.

Para cumplir con dicho objetivo se buscó averiguar y registrar los distintos materiales usados para la construcción, tipologías y configuraciones estructurales, así como las diferentes técnicas y métodos de ejecución presentes en las obras y proyectos constructivos desarrollados en la región. Así también, fue necesario obtener la información relativa a la intensidad y frecuencia de los eventos sísmológicos que afectan y han afectado al cantón históricamente, al igual que el impacto de estos mismos sobre las áreas de interés analítico para el proyecto. Lo anterior para calcular la probabilidad de falla de cada una de las tipologías estructurales analizadas bajo niveles variados de movimiento del terreno, considerando los factores involucrados en dicho fenómeno.

Se concluye con información actualizada y suficiente para establecer y reportar el grado de daño esperado para las viviendas y edificaciones comerciales simples en caso de que el área de Pérez Zeledón (específicamente la ciudad de San Isidro de El general) sea afectada por un sismo de gran magnitud.

Palabras clave: vulnerabilidad, tipologías estructurales, riesgo sísmico, Pérez Zeledón, San Isidro de El General.

Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas y edificios comerciales menores en el área central de Pérez Zeledón, Costa Rica.

FREDDIE ANTONIO VARGAS MENA.

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción.

Setiembre del 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	2
RESUMEN EJECUTIVO.....	4
INTRODUCCIÓN.....	9
MARCO TEÓRICO	13
METODOLOGÍA	32
RESULTADOS.....	115
ANÁLISIS DE RESULTADOS	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
APÉNDICES	151
ANEXOS	199
REFERENCIAS	217

Prefacio

Este estudio sobre la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de vivienda y comercio del cantón de Pérez Zeledón se ideó con el propósito de contribuir a solventar y reconocer un hecho problemático que enfrenta nuestro país en el campo de la ingeniería sísmica. Dicho hecho es el faltante de conocimiento integral y confiable sobre la respuesta estructural que presentarían las diversas edificaciones que son ocupadas constantemente por la población de las áreas urbanizadas ante la ocurrencia de terremotos de intensidades variables.

Alrededor del mundo existen gran cantidad de estudios de vulnerabilidad sísmica, en especial en países desarrollados. En Costa Rica existe la necesidad de equiparar nuestra información actual perteneciente a este tópico con aquella presente en otras locaciones del mundo, en términos de calidad y confiabilidad.

Con el surgimiento de recursos más eficaces que los existentes en décadas pasadas; y con la posibilidad de emplear estas nuevas tecnologías en aplicaciones para el campo de la ingeniería civil, es importante promover la evaluación de estructuras constructivas existentes y de las respectivas zonas geográficas sobre las cuales estas se encuentran localizadas. Esto con la intención de obtener datos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad sísmica, y así poder proyectar criterios de interés social como el daño sísmico probable de las edificaciones ante un evento sísmico, para con ello estar en capacidad de tomar las medidas adecuadas para reducir y manejar los daños potenciales de las mismas como miembros de las zonas urbanizadas y, por consiguiente, de las zonas urbanizadas como un todo.

El contar con información veraz, confiable y extensa en términos de vulnerabilidad sísmica no solamente nos ayudará a tener una comprensión mayor de la influencia que posee una región geográfica en el comportamiento mecánico de las edificaciones ahí construidas, sino también de la influencia y participación que tienen aspectos como los materiales (y la calidad de estos), la edad de la

construcción, los sistemas utilizados para ejecutar la obra, las tipologías usadas, etc.

Además, una aplicación indirecta de dicho conocimiento puede enfocarse en reconocer, entre otros aspectos, la importancia económica y social de las edificaciones, que son patrimonio de la sociedad y últimamente representan un indicador directo del desarrollo de esta, siendo además las bases que permiten el avance continuo de la misma.

Al reconocer dicha importancia y realizar un estudio que nos permita llevar a cabo la evaluación de las estructuras y determinar así la vulnerabilidad sísmica de estas obras ya ejecutadas, estaremos estableciendo los parámetros correctos para poder invertir recursos económicos de forma óptima en la prevención de los daños probables en caso de que se presenten desastres naturales en la región, e incluso también para poder mejorar el diseño tanto arquitectónico como estructural de los proyectos futuros cuyos materiales, propiedades mecánicas y características físicas sean equiparables con las de las obras incluidas en la investigación desarrollada.

En este estudio se consideran los sistemas constructivos más utilizados en el cantón de Pérez Zeledón, así como en el país en general; estos son: la mampostería, el concreto, el prefabricado, acero, madera, la construcción compuesta, entre otros.

En el estudio se pretende además, registrar e incluir dentro de la muestra de la zona, una gama de tipologías y sistemas constructivos que resulte representativa de la industria de la construcción en términos de vivienda y pequeños comercios (de alrededor de trecientos metros cuadrados), con el fin de que el rango de aplicación de los resultados de este estudio sea amplio, sabiendo de antemano, claro, que cada región sísmica del globo posee sus propias particularidades. Aun así, los fenómenos sísmicos presentan ciertas intensidades medibles y clasificables, los sistemas y métodos constructivos son reproducibles, y en muchas regiones hay tipos de suelos mecánicamente similares; por lo tanto, si bien los resultados de este estudio no pueden ser aplicados directamente a otros puntos del planeta, sí serán, al menos, una referencia útil para la toma

de decisiones en zonas fuera del cantón de Pérez Zeledón; y una herramienta primordial y necesaria para la prevención de riesgos, el mantenimiento y el diseño de estructuras para este.

Para desarrollar este proyecto se emplea información obtenida desde diversas fuentes, entre las cuales se encuentran instituciones como: la red sismológica nacional (RSN), el laboratorio de ingeniería sísmica de la universidad de Costa Rica (LIS), y el observatorio vulcanológico y sismológico de Costa Rica (OVSI-CORI).

También se cuenta con literatura de énfasis académico y/o social, como: libros sobre ingeniería sísmica, artículos científicos consultados desde la biblioteca institucional del instituto tecnológico de Costa Rica (Biblioteca José Figueres Ferrer); tesis y proyectos de investigación sobre la vulnerabilidad sísmica, para títulos de pregrado y postgrado; junto con estudios realizados por instituciones del estado sobre el mismo tema y en diferentes regiones.

Además se acude también a otras fuentes de información, para así complementar conceptos o expandirlos; mayormente con material encontrado en Internet.

Se hace uso, indispensablemente, de otras herramientas, como el software QGIS para mapeo

de la zona y, en general, la aplicación de sistemas de información geográfica.

Al final, el proyecto existe para determinar la vulnerabilidad sísmica de las viviendas y algunos comercios de la ciudad de San Isidro del General, y expandir los resultados a todo el cantón de Pérez Zeledón, para así poder evaluar el comportamiento sísmico de las edificaciones que están dentro del área de influencia de los sismos que se propondrán. Serán tres en total, en distintos puntos, para cubrir los escenarios más críticos esperables.

Agradecimientos para todas las personas e instituciones que hacen posible la realización de este estudio, especialmente a mi familia, quienes siempre me han brindado su apoyo y han estado pendientes de mi crecimiento como ser humano y profesional; al tecnológico de Costa Rica, la escuela de ingeniería en construcción y claro, a mi asesor, Gustavo Rojas Moya, por guiarme paso a paso a través del proceso necesario para completar este estudio. Finalmente, a Natalia, a quien admiro por todos los motivos posibles, por haber sido para mí una fuente constante de ánimo e inspiración... Por seguir siéndolo, y por recordarme la importancia de la confianza, la tolerancia y la comprensión entre dos seres humanos.

Resumen ejecutivo

Según reportes de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), Pérez Zeledón se localiza dentro de una región sísmica que ha sido llamada “Valles y Serranías del Interior del país”, la cual se caracteriza por la frecuente ocurrencia de sismos con hipocentros cercanos a la superficie y con magnitudes moderadas dentro de la escala Richter.

Pérez Zeledón se encuentra ubicado en el flanco pacífico de la cordillera de Talamanca, la cual es una formación geológica localizada al sur de Centroamérica que debe su origen al mismo proceso de subducción que es responsable por la ocurrencia sismos interplaca; en el caso de la cordillera de Talamanca, esta es parte del relieve orogénico que ha surgido debido a procesos asociados al levantamiento tectónico, que toman el material fracturado perteneciente a la placa de Cocos (material fracturado como consecuencia de esfuerzos de compresión y arrastre) y lo elevan.

Al pertenecer a esta región geológica, Pérez Zeledón se ve afectado por una gran cantidad de accidentes geográficos, ya que el relieve circundante a la cordillera de Talamanca varía notablemente a lo largo de toda la extensión de la misma, posee pendientes muy pronunciadas que van desde los quince grados hasta los cincuenta grados, y elevaciones montañosas que superan los tres mil metros sobre el nivel del mar en diversos puntos. Asimismo posee regiones con elevaciones más modestas que abarcan un rango entre los setecientos y mil trescientos metros sobre el nivel del mar, hecho que retrata las complejidades topográficas de la zona. Además, esta misma región es anfitriona de gran cantidad de cañones profundos, que se comportan como torrentes de montañas y han sido excavados por ríos y quebradas (Alvarado, et al., 2009).

Según Alvarado et al. (2009) los cuerpos intrusivos de la cordillera de Talamanca influyen también en la configuración tectónica del cantón, además de la condición de choque de las placas litosféricas en la Fosa Mesoamericana. Se pueden observar e identificar patrones de fallamiento con

diversas orientaciones, destacándose entre estas las NW-SE, NE-SW y NNE-SSW. Además, a través del estudio de aerofotos, y la realización de recorridos de campo, se ha determinado la existencia de tres sistemas de fallamiento principales en la región según Leandro; Alvarado y Denyer (como se citaron en Alvarado, et al., 2009). Los tres sistemas identificados son: el sistema N-S, el NE-SW y el NW-SE, los cuales pueden caracterizarse de la siguiente manera:

- **Sistema N-S:** identificado por el trazado rectilíneo de los cauces de los ríos San Ramón, Quebradas, Buena Vista y parte del río Blanco.
- **Sistema NE-SW:** este sistema controla el curso de los ríos y quebradas División y Páramo y la quebrada Blanca, entre otras.

Sistema NW-SE: al igual que en el caso del sistema anterior, este controla el curso de muchos ríos y quebradas en el cantón, tales como lo son los ríos Chimirol, Blanco y quebradas Boquete, Aristides y Seca.

Además de estos sistemas de fallamiento, existen otras estructuras geológicas a las cuales se les atribuyen eventos sísmicos de importancia en la región. En Pérez Zeledón, en las cercanías de San Isidro de El General, existe una fuente de actividad sísmica con el potencial para generar sismos de magnitudes de hasta $M_w = 6.3$ (asumiendo una longitud de falla $L = 11$ km). Esta fuente es la falla de Buenavista y, según varios autores, fue la responsable del terremoto que repercutió en la región en Julio de 1983, dejando a más de seiscientas personas afectadas y a una fallecida.

Referente al sismo de Buenavista, este, al igual que otros terremotos ocurridos en los alrededores de la región en estudio durante las últimas décadas, son los tomados como referencia para el diseño de escenarios desarrollados con el fin de evaluar la amenaza sísmica en el centro de Pérez Zeledón.

Amenaza sísmica

Para definir la amenaza sísmica en Pérez Zeledón, se utilizó un método de análisis determinístico, y se decidió ejecutar un análisis haciendo uso de tres escenarios sísmicos basados en la información registrada y las evidencias de actividad tectónica recolectadas sobre las condiciones geológicas y el potencial sísmico del sitio evaluado.

Dado el hecho de que la aceleración máxima es el parámetro de amplitud más documentado y utilizado alrededor del mundo para definir la intensidad de un sismo, y que se contó con referencias suficientes para trabajar con este, se escogió la aceleración máxima como parámetro para representar el movimiento del terreno en la determinación del peligro sísmico para la región central de Pérez Zeledón.

Conociendo el parámetro representativo del movimiento del terreno, se procedió a seleccionar una ecuación de atenuación que permitiera simular los escenarios sísmicos necesarios. La ecuación propuesta en Climent et al. (1994) resultó ser la más apropiada para implementarse en el desarrollo del proyecto.

$$\ln PGA = A + B + C$$

Con:

$$A = -1.687 + 0.553M$$

$$B = -0.537 \ln R - 0.00302R + 0.327S$$

$$C = \sigma_{PGA}$$

Donde:

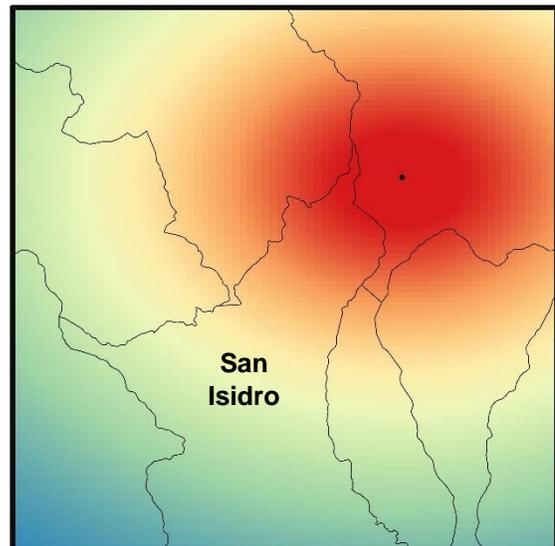
- PGA: siglas correspondientes a peak ground acceleration, término traducido como "aceleración pico del terreno". Se expresa en m/s^2 .
- M = Mw: magnitud de momento de un evento.
- R: distancia entre el sitio y la región hipocentral. Se expresa en km.
- S: parámetro indicativo de la geología propia de la zona en estudio. S = 0 en roca y S = 1 en suelo.
- σ_{PGA} : desviación estándar relacionada con el método de cálculo. Para esta expresión se considera $\sigma_{PGA} = 0.75$.

Con la metodología y la ecuación de atenuación seleccionadas, se procedió a proponer los eventos sísmicos hipotéticos que tuvieron como fin el evaluar la amenaza sísmica del área de estudio.

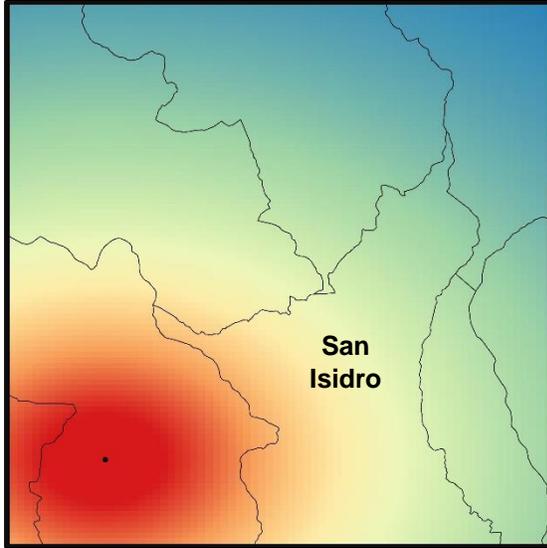
Los escenarios planteados son descritos por las siguientes características:

- Primer escenario: un sismo con el potencial máximo de la falla Buenavista, es decir Mw = 6.3. Este evento sismológico propuesto se ubicó hacia el noreste (NE) de la ciudad de San Isidro de El General. La profundidad del evento fue de 10 km y, sus coordenadas geográficas son: Y = 1044001.308 y X = 537130.104; en el sistema de referencia de coordenadas (SRC) de uso oficial en Costa Rica, el CRTM05.
- Segundo escenario: un evento de magnitud Mw = 5.3, y ubicado hacia el norte de Dominical, en el distrito de Platanares (dirección suroeste con respecto a la ciudad de San Isidro). La profundidad focal de 7.0 km. Las coordenadas geográficas para este escenario, fueron: Y = 1030337.125 y X = 518940.340.
- Tercer escenario: Este escenario contó con un sismo de magnitud de Mw = 5.0, un centro focal ubicado a 4.0 km bajo la superficie, y coordenadas geográficas iguales a: Y = 1047085.121 y X = 526711.422.

Después de haber modelado los sismos propuestos, los resultados asociados a estos se obtuvieron para un formato gráfico, y en términos de tres variables distintas: la aceleración en m/s^2 , la aceleración como porcentaje de la gravedad y la intensidad instrumental.

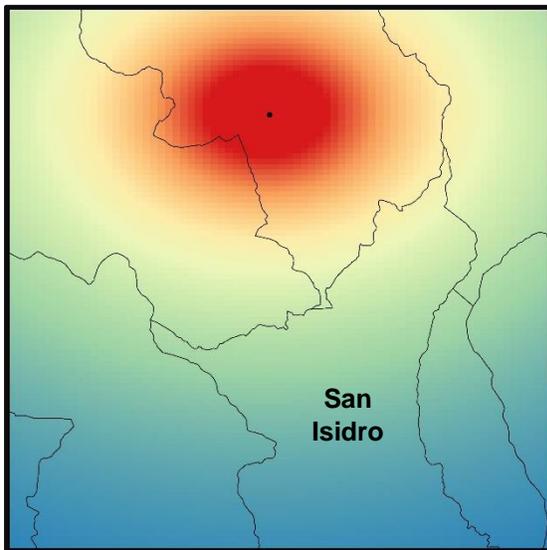


Mapa de amenaza sísmica para el primer escenario sísmico.
Fuente: QGIS 2.14.



Mapa de amenaza sísmica para el segundo escenario sísmico.

Fuente: QGIS 2.14.



Mapa de amenaza sísmica para el tercer escenario sísmico.

Fuente: QGIS 2.14.

Los resultados de amenaza sísmica para los escenarios planteados fueron los siguientes:

- escenario 1: aceleraciones pico del terreno: $180 \text{ cm/s}^2 - 352 \text{ cm/s}^2$. Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: $18.34\% - 35.87\%$. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: VI – VIII.

- escenario 2: aceleraciones pico del terreno: $95.46 \text{ cm/s}^2 - 242 \text{ cm/s}^2$. Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: $9.73\% - 24.71\%$. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: V – VII.
- escenario 3: aceleraciones pico del terreno: $89.37 \text{ cm/s}^2 - 261 \text{ cm/s}^2$. Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: $9.11\% - 26.61\%$. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: V – VII.

Vulnerabilidad sísmica

Una vez determinada la amenaza sísmica para la región en estudio se procedió a estimar la vulnerabilidad física de las edificaciones que allí se encuentran, considerando este parámetro, para los fines de este estudio, como un grado de fragilidad de las estructuras ante las cargas y efectos antepuestos por el movimiento de terreno emergente debido a las vibraciones ocasionadas por las ondas sísmicas.

Para determinar la vulnerabilidad del área de estudio se definió una muestra representativa de todas las edificaciones del centro urbano de Pérez Zeledón.

Se aplicaron 375 formularios de inspección a edificaciones distribuidas entre 44 lotes ubicados dentro del territorio definido como área de estudio.

Para cuantificar la vulnerabilidad sísmica tomaron los datos resultantes de las inspecciones y se les asignó valores de peso a los atributos críticos registrados. En este caso, se consideró que los atributos críticos correspondían a: edad (E), tipología constructiva (TC) y estado de conservación (EC).

El peso de cada atributo se determinó en función de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, evaluando no solo la importancia sismo-resistente de cada aspecto en términos individuales, sino también el comportamiento y la relevancia de cada uno de ellos desde un punto de vista comparativo entre las distintas tipologías.

Finalmente, teniendo los valores de los atributos y los resultados de las encuestas en las edificaciones, se realizaron los procedimientos

matemáticos necesarios para crear los mapas de vulnerabilidad sísmica (índice de vulnerabilidad) y vulnerabilidad sísmica regional (riesgo sísmico) utilizando el software QGIS. Para esto, fue necesario cuantificar los resultados de las inspecciones.

TIPO CONSTRUCTIVO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN INSPECCIONES		
Tipo constructivo (TC)	Cantidad	Porcentaje
Tugurio	2	0,53%
Muros de madera	80	21,33%
Mampostería simple	1	0,27%
Mampostería confinada	12	3,20%
Mampostería reforzada	241	64,27%
Pórticos de concreto	25	6,67%
Prefabricado	14	3,73%
TOTAL	375	100,00%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

EDAD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN INSPECCIONES		
Edad (E)	Cantidad	Porcentaje
Previo a 1974	49	13,07%
Entre 1974 y 2001	188	50,13%
Después de 2002	138	36,80%
TOTAL	375	100,00%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ESTADO DE CONSERVACIÓN PARA EL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN INSPECCIONES		
Estado de conservación (EC)	Cantidad	Porcentaje
Excelente	72	19,20%
Bueno	187	49,87%
Regular	79	21,07%
Pobre	37	9,87%
TOTAL	375	100,00%

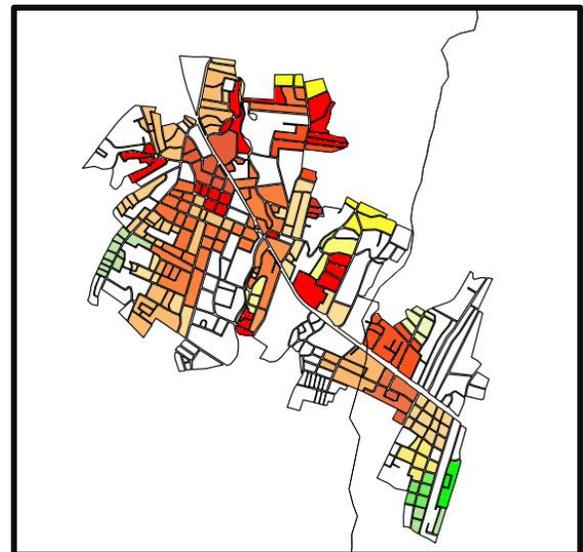
Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

Los resultados de riesgo sísmico fueron calculados y expresados en función de una escala de daño diseñada según las fuentes literarias y correlaciones ajustadas a este proyecto.

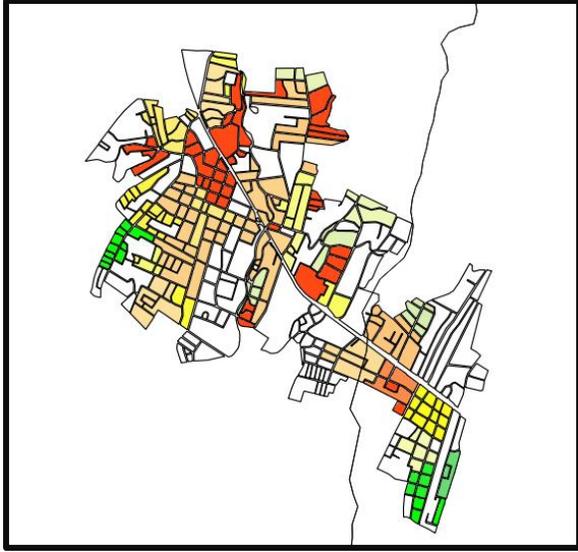
La escala utilizada, así como la representación gráfica del riesgo sísmico obtenida para cada uno de los escenarios de amenaza, se presentan a continuación.

PORCENTAJES DE DAÑO ESPERADOS SEGÚN INTENSIDAD E IDENTIFICADOR ASOCIADO			
Intensidad	Identificador	Daño menor	Daño mayor
Menor a V		0%	5%
V		5%	10%
Entre V y VI		10%	15%
V		15%	20%
Entre V y VII		20%	30%
VIII		30%	40%
Entre VIII y IX		40%	60%
X		60%	80%
X+		80%	100%

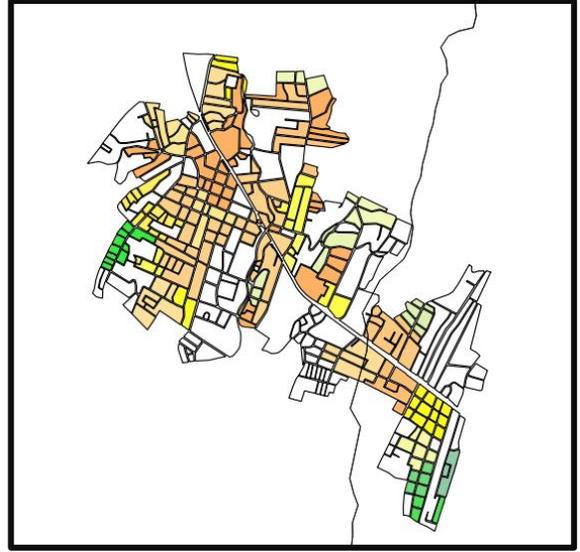
Fuente: Microsoft office; Excel 2013.



Mapa de riesgo sísmico para el primer escenario sísmico.
Fuente: QGIS 2.14.



Mapa de riesgo sísmico para el segundo escenario sísmico.
Fuente: QGIS 2.14.



Mapa de riesgo sísmico para el tercer escenario sísmico.
Fuente: QGIS 2.14.

Introducción

Se tiene certeza sobre el hecho de que Costa Rica se encuentra ubicado en una zona geográfica tectónicamente activa, lo cual le asegura ser un sector de alta sismicidad.

El cantón de Pérez Zeledón se encuentra localizado en la región pacífico sur del país, zona en la cual los eventos sísmicos son de ocurrencia constante e intensidades apreciables; siendo que con frecuencia gran parte de los habitantes del cantón son capaces de percibir los movimientos en el terreno, es apropiado aseverar que los eventos sismológicos de la región con relativa frecuencia pueden categorizarse al menos en un IV dentro de la escala de intensidad Mercalli Modificada (Grado moderado).

Es debido a lo anterior que se considera una labor de suma importancia el evaluar y determinar la potencial amenaza (o peligrosidad) que representan las estructuras geológicas sobre las cuales residen las edificaciones del cantón y de la ciudad de San Isidro de El General.

La severidad con la que pueden verse dañadas las edificaciones destinadas para uso de vivienda y comercio depende de las características destructivas de los eventos sísmicos provenientes de fuentes como las fallas geológicas ubicadas en las zonas sismo-tectónicas de la región. Estas estructuras, así como sus repercusiones históricas en el terreno superficial de Pérez Zeledón son estudiadas y caracterizadas a profundidad en el capítulo 3 de este informe, correspondiente a la metodología del proyecto; específicamente en la sección sobre tectónica y sismicidad.

Sismólogos, ingenieros y demás expertos han estudiado en el pasado el comportamiento de las estructuras en las cuales se generan los sismos, incluso llevando a cabo estudios de riesgo sísmico en Costa Rica, en ciudades clave como Cartago, San José, y Cañas. 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. (Climent, Salgado, Slob, van Westen, 2003). Es por esto que estimar el grado de vulnerabilidad estructural de las edificaciones del cantón de Pérez Zeledón es importante, porque vendrán a contribuir en la preparación de planes de contingencia contra la ocurrencia de ciertos fenómenos desastrosos, como lo son los terremotos; pero incluso es posible que a partir de resultados obtenidos en estudios de este tipo se puedan concluir consideraciones para hacer frente a otros desastres naturales.

Tener amplio conocimiento sobre el nivel potencial de exposición a sismos y la probabilidad de daño de las edificaciones a causa de estos permitirá dirigir la toma de medidas en una ruta adecuada para diseñadores estructurales y entes administrativos en una gran gama de tópicos, tales como el uso del suelo, los diseños estructurales y estéticos de las edificaciones, las normativas y las especificaciones a seguir en las construcciones a desarrollar, etc.; esto para tener certeza de lograr un comportamiento sísmico en las estructuras que sea óptimo para responder a catástrofes sísmicas de intensidades severas.

La forma de representar los resultados obtenidos, es decir, la vulnerabilidad y riesgo sísmico para el cantón de Pérez Zeledón, o de cualquier región de interés en general, debe ser tan simplificada y gráfica como sea posible, con el fin de que incluso personal no especializado en estudios de sismicidad y temáticas de ingeniería sísmica y sismología pueda obtener una noción válida y aprovechable a partir de los productos adquiridos gracias a un estudio de esta naturaleza, y que con ello pueda también formar un criterio razonable y lógico para la toma de decisiones administrativas referentes al desarrollo urbano, o de coordinación en proyectos constructivos. Es por esto que los resultados finales se proyectan en mapas de riesgo capaces de cuantificar, visual y numéricamente la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico

existentes en el área analizada. Se utilizan para este cometido herramientas de software, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los cuales se agiliza y se optimiza la realización de los análisis pertinentes, y el posterior despliegue de resultados en forma de mapas georreferenciados, que además de brindar respuestas basadas en la información disponible en el momento, puedan permitir la actualización los datos empleados, y la realización de nuevos cálculos entre distintos mapas.

La finalidad de facilitar la interpretación de los productos obtenidos en el estudio es muy simple: agilizar el proceso de la toma de decisiones. Ya que a través de los mapas digitales es posible puntuar y señalar en qué sitio se encuentra la mayor amenaza sísmica, en función de criterios como la ubicación del hipocentro y la magnitud del evento sísmico esperado (para cubrir las posibilidades más relevantes y críticas se realizan varios escenarios con sismos hipotéticos de magnitudes tan altas como el registro histórico de la zona indica, y se sitúan en distintos puntos del cantón, donde las posibilidades de causar grandes daños sean mayores). Esto permite determinar cuáles son los sitios en donde el riesgo sísmico es menor y la construcción de viviendas o estructuras de sistemas constructivos y materiales similares es admisible, considerando para esto, la vulnerabilidad de las posibles tipologías.

Para este estudio se utiliza el software QGIS, el cual es una plataforma de uso libre que permite la manipulación de información geográfica y la creación de mapas, entre otras funciones; en el cual se lleva a cabo la delimitación del mapa del área de estudio, la georreferenciación, y el uso de las bases de datos para contemplar todos los cálculos pertinentes en el proceso de estimar la vulnerabilidad sísmica del cantón.

Cabe resaltar, que en Pérez Zeledón, hasta el momento, no se han realizado estudios de vulnerabilidad como el presentado a continuación, por lo que los mapas que se obtienen representan, podría decirse, la primera aproximación precisa y válida para cuantificar los efectos que tendría sobre las estructuras del cantón, y principalmente en el distrito de San Isidro de El General, la ocurrencia de un sismo de magnitud severa, esto tomando en cuenta la posición probable de origen de dicho sismo. Eventualmente, por consiguiente, se podrán mejorar los resultados obtenidos en este estudio, ya que con mayores recursos y tiempo a disposición del investigador, es posible profundizar

con un mayor detalle en los aspectos físicos de las construcciones, así como en las caracterizaciones sísmológicas de la zona, y demás; siendo así posible aumentar la cantidad de información adquirida. Los mapas mostrados como resultado final en este estudio pueden, en consecuencia, ser actualizados y modificados para ajustarse a los requerimientos de exactitud que se consideren necesarios, y presentar así productos más fielmente apegados a la realidad física y mecánica de las edificaciones de vivienda y comercio presentes en Pérez Zeledón.

No obstante, el estudio no es el primero de su clase realizado en Costa Rica (como se indicó antes), al menos en lo referente a su naturaleza y objetivos, ya que se han realizado estudios previos referentes a la misma temática de vulnerabilidad de estructuras y amenaza sísmica de distintas áreas geográficas. En los últimos años se han generado avances, se han llevado a cabo estudios de vulnerabilidad en la ciudad de Cañas, Liberia; Cartago centro; San Isidro del Tejar; etc. Estos estudios precedentes, al igual que el presente, han buscado o buscan aplicar metodologías de para la evaluación de la vulnerabilidad en locaciones urbanas.

La forma de abordar el estudio se explicará de manera específica en el capítulo 3 del informe “Metodología para cumplir los objetivos del proyecto”.

En general, en este proyecto se pretende presentar los productos obtenidos a través de una secuencia lógica, de manera progresiva y coherente, abordando en un principio los aspectos teóricos más generales necesarios para dar un marco de referencia apropiado para facilite la comprensión de los contenidos del informe; siguiendo con la metodología del proyecto, un análisis del porqué de la escogencia de la zona en estudio, así como del marco tectónico responsable de la sismicidad del país y el marco tectónico local que representa al cantón de Pérez Zeledón; se estudia la sismicidad histórica y reciente con información adquirida desde las instituciones más capacitadas en el país para el registro de estos temas, y con base en los temas de sismicidad y tectónica de la región así como los registros de fenómenos sísmológicos más relevantes para el cantón de Pérez Zeledón (desde la perspectiva de la ingeniería en construcción, incluyendo por lo tanto aquellos sismos catastróficos que han generado los mayores daños materiales y monetarios) se determina la ame-

naza sísmica; posteriormente se presenta un resumen de los tipos de construcciones evaluadas y las características físicas de aquellas tomadas como muestra representativa al momento de llevar a cabo la investigación y evaluadas para poder establecer la vulnerabilidad sísmica de las construcciones de la región; a continuación se abordan finalmente los resultados conjuntos obtenidos a partir de la determinación del peligro sísmico y la vulnerabilidad de las estructuras, se procede a determinar la vulnerabilidad o riesgo sísmico de la zona. Al final del informe se redacta un capítulo para conclusiones y recomendaciones, y se proveen además los anexos y apéndices necesarios para fortalecer el contenido y permitir la aclaración de cualquier aspecto técnico incluido del informe.

Dentro de los antecedentes para el proyecto, se puede mencionar que debido a su ubicación geográfica Costa Rica es un país de alta actividad sísmica, y como tal, es indudablemente necesario tener un alto conocimiento sobre los aspectos de sismicidad en la nación, y cómo estos afectan a las edificaciones que ocupamos los seres humanos a lo largo de nuestro día a día.

Alrededor de todo el mundo, existen muchos estudios relacionados con la determinación de la vulnerabilidad sísmica en zonas altamente urbanizadas; sin embargo la información es considerablemente menor cuando se trata de ubicadas entre territorios rurales. En el caso del cantón de Pérez Zeledón, al día de hoy no se cuenta con un estudio apropiado que nos permita conocer cuál es la vulnerabilidad sísmica para las estructuras construidas en este sector de nuestro país, mucho menos el riesgo de la zona en general. Y si bien, Pérez Zeledón a manera global no es área cuenta completamente urbanizada, gran parte de los alrededores inmediatos a la ciudad de San Isidro de El General cuentan con un desarrollo considerable, así como la ciudad misma; el encontrarse inmersa entre territorio de menor desarrollo ha provocado que esta región se quede rezagada en estudios de riesgo como los llevados a cabo para ciudades pertenecientes al Gran Área Metropolitana (GAM), aun cuando un terremoto en Pérez Zeledón podría tener repercusiones considerables tanto a nivel social como económico. Además, se conoce que es un sitio afectado por actividad sísmica constantemente. Según datos consultados en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) ha habido reportes de sismos de entre 5,5 y 6,2 grados teniendo efecto sobre el sitio de forma directa, provenientes de regiones como Puntarenas y Talamanca.

Por otro lado, la red sísmológica nacional tiene registro de un terremoto ocurrido el 3 de Julio de 1983 en Buena Vista de Pérez Zeledón (a solo 14 km de la ciudad de San Isidro), en el cual hubo daños graves a considerar, como el colapso de casas en diversos poblados, daños de importancia en el hospital Fernando Escalante Pradilla, y daños en acueductos, cañerías, y en los kilómetros 110 y 119 de la carretera interamericana.

Así, siendo que en la zona sur se producen gran parte de los eventos sísmicos que sufre el país, y que ha sido afectada de gravedad en ocasiones recientes, es imperativo estar al tanto de los aspectos de vulnerabilidad, peligrosidad, riesgo y daño sísmico, ya que al contar con esta información como herramienta se podrán tomar medidas coherentes para la mitigación del riesgo en las estructuras, lo cual a largo plazo se traducirá en un bienestar económico para el lugar, así como también en un aporte científico y tecnológico de alta importancia. Esto debido a que con las medidas pertinentes, se podrá reducir el nivel de pérdidas esperadas y potenciales, monetarias y sociales; y también se tendrá un mayor conocimiento de las características de la zona geográfica, representando esto un aporte incluso a nivel ambiental.

En un nivel específico, este estudio busca abarcar y cumplir, de manera global, con el siguiente objetivo:

- Determinar la vulnerabilidad sísmica para la ciudad de San Isidro de El General y sus alrededores, en función de las estructuras diseñadas con propósitos habitacionales y comerciales en el cantón de Pérez Zeledón.

El objetivo principal puede también ser desglosado en criterios puntuales y más directos que explican más apropiadamente el procedimiento a seguir durante el desarrollo del proyecto. Esos criterios son los siguientes:

- Obtener una muestra territorial representativa del cantón de Pérez Zeledón, sobre la cual se determinará la vulnerabilidad sísmica de las viviendas.
- Clasificar las tipologías y los sistemas constructivos para viviendas y edificaciones comerciales más comúnmente empleados en el área de estudio, utilizando para ello formularios de caracterización.
- Investigar las fuentes de amenaza sísmica del cantón de Pérez Zeledón.

- Definir y diseñar tres sismos hipotéticos para evaluar la amenaza sísmica del área de análisis a través de estos.
- Aplicar una metodología apropiada para determinar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones ubicadas en el centro de Pérez Zeledón, según su sistema constructivo.
- Determinar al grado de daño esperado para las edificaciones de la ciudad de San Isidro de El General (muestra definida), en cada uno de los escenarios sísmicos propuestos.
- Aportar recomendaciones para mitigar el impacto de eventos sísmicos, reduciendo la vulnerabilidad de las edificaciones.

El estudio cubre la extensión de un área relativamente pequeña en comparación con las dimensiones del país, por lo tanto el tamaño de la muestra es una limitación, siendo que el área superficial del cantón de Pérez Zeledón en de unas 736 millas cuadradas (1906 kilómetros cuadrados aproximadamente) y no se realizará un barrido de toda la zona para censar cada edificación, sino que a través de la muestra tomada del área con mayor concentración poblacional y desarrollo urbano (el distrito de San Isidro de El General) se determinarán los datos pertinentes para el cantón en general, lo cual es aceptable desde un punto de vista estadístico, pero representa una limitante en términos de exactitud.

Lo anterior implica, claramente, que los resultados son aplicables de forma directa únicamente a esta zona (aunque pueden utilizarse como referencia a la hora de realizar una investigación en zonas con comportamiento tectónico similar).

La gran gama de estructuras y sistemas constructivos presentes en los distritos del cantón restan certeza a los resultados finales, ya que al seleccionar los tipos más representativos obligatoriamente se dejan otros de lado, lo cual impide que se abarque la totalidad de la información de la zona.

Las propiedades de los sismos propuestos no necesariamente reflejarán aquellas de los eventos sismológicos reales que puedan ocurrir en el futuro, ya que si bien es cierto están basados en los registros históricos y en la sismicidad del territorio analizado, no se puede esperar que un sismo

con magnitud e intensidad iguales a aquellas de uno anterior ocurra, la probabilidad de que acontezca un evento con un espectro de aceleraciones idéntico es infinitesimalmente pequeña; esto es importante porque, si bien no reduce la validez de los resultados sí tiene influencia en las medidas propuestas para mitigar los daños y reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, por lo que es posible cuestionar si las medidas propuestas son las más óptimas, tomando en cuenta claro, la diferencia entre efectividad teórica y lo que es concebible a nivel práctico.

No se aplican funciones de vulnerabilidad por cada tipo de sistema constructivo evaluado en el estudio. Esto quiere decir que utilizar y comparar diversos métodos de evaluación de la vulnerabilidad podría generar conclusiones más productivas.

Otro hecho que limita la exactitud de los resultados es la práctica constructiva. En Costa Rica, y en la industria de la construcción en general, es usual que haya detalles que pasan desapercibidos por la supervisión, así como variaciones en términos de la calidad y homogeneidad de los materiales usados en las obras, es virtualmente imposible que las propiedades teóricas esperadas y las reales sean idénticas; es por ello que a la hora de realizar la clasificación de los tipos de sistemas constructivos se debe tener en cuenta que algunos detalles están siendo asumidos y no reflejan en un cien por ciento la realidad de las construcciones físicas. Y al suponer ciertos aspectos para beneficiar el desarrollo práctico del estudio, se debe estar al tanto de que hay un grado de divergencia entre la información que nos brindan los cálculos y lo que ha sido construido en campo; lo cual es determinante para emitir un criterio respecto al comportamiento sísmico de las estructuras incluidas en este estudio.

Finalmente la incertidumbre del fenómeno sísmico y la falta de conocimiento de su influencia real sobre todas las edificaciones, es una limitante más; una que, se asume y se cubre mediante el uso de registros históricos y datos empíricos, datos con los cuales se proyectan los sismos probables para momentos futuros y se estiman los posibles efectos que estos tendrán con base en los daños estructurales y consecuencias monetarias causadas por los eventos sismológicos previos sobre las edificaciones de la zona.

Marco teórico

Según el diccionario de la Real Academia Española (RAE) se considera vulnerable todo aquello “que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente”, y por consiguiente, la vulnerabilidad es la “cualidad de ser vulnerable” de un objeto o persona física. Estas definiciones son directas y concisas, sin embargo no reflejan la naturaleza de lo que se busca explicar cuando se menciona la vulnerabilidad sísmica de las estructuras construidas.

Cuando se hace referencia al término de vulnerabilidad sísmica de edificaciones civiles este debe ser entendido como el grado de daño probable que puede sufrir una estructura como respuesta y secuela o derivación de la ocurrencia de un fenómeno sísmico de características determinadas, observables, registrables y clasificables, tanto desde un punto de vista cualitativo como cuantitativo; que finalmente influye en las propiedades físicas de varias estructuras, así como en las características socioeconómicas de la región en donde ocurre.

La vulnerabilidad para las edificaciones de una región geográfica es estimable mediante la previa determinación de la amenaza sísmica de la zona estudiada y la aplicación de formularios para analizar el comportamiento en los edificios de aquellos parámetros que controlan el daño estructural al momento de la ocurrencia de los terremotos.

Se entiende, entonces, que antes de poder determinar la vulnerabilidad de los edificios de un territorio se requiere cumplir con antelación ciertas condiciones, determinar la vulnerabilidad de cada edificación y luego usar esos datos para representar la realidad de toda la zona. Una parte importante de este proceso es el estimar la amenaza sísmica de la región, la cual mientras que es ciertamente un área a ser estudiada en sí misma, también forma parte de estudios de riesgo sísmico, mismo que se interesan por posturas tanto ingenieriles como administrativas y económicas.

Sabiendo lo anterior, es importante dar un marco referencial de información relacionada al

tema en estudio, para lograr cubrir y poder despejar todos los cuestionamientos que puedan surgir respecto a la metodología y resultados de este estudio, así como a la utilidad y aplicaciones futuras de estos.

A continuación se abordan una serie de conceptos, mismos que irán brindando una idea más integral del trasfondo de los estudios de vulnerabilidad, de forma clara y abogando por la sencillez; podría decirse que siguiendo un modo de presentación escalonado. Y con dicho propósito en mente, se inicia con el punto de partida más básico y por el cual se requieren los estudios de amenaza y vulnerabilidad en primer lugar: el fenómeno de los sismos.

Sismos

Un sismo es un movimiento brusco y repentino de la corteza terrestre, que se siente en forma de vibraciones en distintas direcciones en la superficie, por el efecto de las ondas sísmicas a través de las cuales se expresa la liberación de energía anteriormente acumulada en las capas internas de la corteza del planeta tierra.

Son fenómenos naturales que pueden ser provocados por un gran número de razones, siendo la principal la actividad tectónica del planeta tierra, debido principalmente a procesos de origen tectónico, como el desplazamiento entre bloques rígidos (que generan planos de deslizamiento llamados fallas en los cuales se reúne energía hasta que la misma es expulsada en un evento sísmico); aunque también pueden generarse sismos como consecuencia de actividad volcánica, cuando se presenta una erupción de grandes magnitudes se generan vibraciones en los alrededores, mismas que pueden sacudir edificaciones y causar daños; sin embargo a diferencia de los sismos de origen tectónico, los causados por erupciones son de un alcance muy reducido en un nivel comparativo.

La acción erosiva de aguas subterráneas también puede ser provocadora de eventos sísmicos, ya que al desarrollarse este proceso se generan espacios vacíos a nivel interno y con el paso del tiempo la masa de estratos superiores termina por caer sobre los vacíos debido a la acción de la gravedad, y cuando esto pasa se producen vibraciones y lo que puede ser descrito como actividad sísmica.

Existen otras causas para los terremotos, podrían mencionarse incluso las pruebas nucleares. No obstante, casos como estos, así como los de las erupciones y la acción erosiva de líquidos subterráneos, palidecen en relevancia contra la causa más importante y notoria: la dinámica tectónica. La extensión de los terremotos causados por actividad volcánica o por la erosión interna en sectores de la corteza es pequeña y, además, los sismos gestados a través de estos medios son poco frecuentes y representan menores pérdidas en infraestructura productiva y propiedades residenciales debido a su ámbito reducido.

Considerando las condiciones geológicas y las características físicas del área en estudio (mismas que serán detalladas en el Capítulo 3, en la sección sobre el marco tectónico local de Pérez Zeledón), así como el hecho de que la causa principal para el acontecimiento de terremotos se encuentra en la tectónica de placas, se da énfasis al tema de la generación de eventos sismológicos desde esta perspectiva que engloba los aspectos más generales de estos sucesos naturales.

Fallas geológicas y generación de sismos

La superficie terrestre no es perfecta y de hecho cuenta con una serie de fracturaciones, es sabido que se encuentra dividida en diecisiete placas tectónicas que como conjunto conforman una capa sólida de espesor variable a lo largo del planeta (puede ir desde cincuenta hasta trescientos kilómetros), cuyo borde superior concuerda con la superficie de la tierra: la litósfera. Es en esta capa fragmentada es en donde se originan los eventos geológicos que llegan a ser percibidos.

La sismicidad es uno de los fenómenos de los cuales son responsables las placas litosféricas, aunque la conexión directa entre los eventos sísmicos y la tectónica de placas no fue visualizada sino hasta después de 1906, cuando se estableció

la relación cercana entre ambas circunstancias debido a observaciones hechas en torno al gran sismo de San Francisco, California.

Los sismos son entonces la consecuencia directa de las fracturas en el material de la litósfera, aun así debe tenerse claro que los fenómenos sísmicos no solamente ocurren en la zona de contacto entre dos o más placas adyacentes, existen eventos que son conocidos como “sismos intraplaca”, los cuales son el producto de geología local dentro de una misma placa tectónica, aunque es verdad que el movimiento relativo de las placas y la interacción entre ellas son hechos que afectan el comportamiento local y por ende la actividad sísmica que pueda desarrollarse dentro de cada una.

Las placas tectónicas están en constante movimiento, y se desplazan de manera que las rocas de la corteza terrestre se fracturan, se pliegan y sufren de deformaciones; las fuerzas que actúan sobre las rocas y que son generadas por el desplazamiento de las placas afectan toda la geología del planeta y no solo la de aquellos puntos en donde se encuentran los bordes de las placas, justo como se aclaró con anterioridad. Los estratos rocosos, son así, sometidos a grandes esfuerzos de tensión y compresión en distintos puntos, formándose dislocaciones, las cuales son las responsables de la creación de las estructuras geológicas y de la ocurrencia de los sismos. Es todo originado a razón de los efectos que tiene el movimiento relativo de las placas litosféricas y las interacciones de estas.

La generación de sismos, específicamente, es un proceso explicado por la teoría del rebote elástico, la cual de un modo simplificado aborda el tema y nos dice que, la litósfera es una capa compuesta por rocas de alta dureza y rigidez, capaces de almacenar grandes cantidades de energía de deformación, y con una resistencia a los esfuerzos determinada para ciertas condiciones tal como es el caso de cualquier otro material natural o artificial. Entre mayor es la profundidad menor es la capacidad que tienen las rocas para deformarse elásticamente, ya que se vuelven un material más dúctil y menos resistente debido al aumento de la temperatura; esta sección dúctil de la litósfera llega hasta “el fondo” de la misma, y se desliza a razón de unos cuantos centímetros al año. El desplazamiento de la sección profunda causa que en la sección de mayor rigidez, la superior y que llega hasta la superficie, se produzca una deformación elástica progresiva. Se estima que esta deformación elástica se concentra en un

ancho equivalente a la profundidad de la sección rígida de la litósfera, a ambos lados de la falla.

El proceso de deformación elástica está relacionado con la producción gradual de esfuerzos a partir del mismo, y con la acumulación de energía elástica de deformación en enormes cantidades. El proceso de acumulación continúa hasta que, por supuesto, el material que compone a la corteza alcanza su límite de resistencia, o si no, hasta que se sobrepasan las fuerzas de fricción que mantienen a los bloques adyacentes fijados entre sí; es entonces cuando se da la ruptura en la zona de mayor concentración de esfuerzos, o en el punto en donde se encuentre la roca de menor resistencia. Al fracturarse la roca se da un rebote elástico que cubre una extensión determinada en ambos lados de la falla.

El rebote elástico, es la causa primordial de los sismos, que se dan en el instante en que se libera la energía elástica acumulada en la roca. Sin embargo, es importante aclarar que el sismo no representa la liberación completa de la energía; gran parte de esta es liberada en forma de calor. La parte que no es liberada de esta forma se expresa como ondas que hacen vibrar el terreno, y son estas las que percibimos como terremotos, las llamadas ondas sísmicas que viajan en todas direcciones.

Un apunte necesario a realizar, es que en algunas fallas el desplazamiento de la sección profunda no desencadena ruptura de la roca superior, y más bien, en estas, el movimiento relativo de los bloques adyacentes es un proceso constante; tal escenario se conoce bajo el nombre de “desplazamiento asísmico” y podría estar ligado a la existencia de rocas internas que se comportan como lubricantes del sistema, evitando que los esfuerzos máximos se alcancen.

Respecto a las fallas como tales, estas son los planos de deslizamiento que se forman al desplazarse los bloques de materiales rígidos de la litósfera, y no obedecen a una sola configuración específica sino que existen de varios tipos. Tres categorías han sido establecidas para clasificar los tipos de fallas existentes a lo largo de la litósfera y estas son: fallas normales (o gravitacionales), fallas inversas, y fallas por deslizamiento lateral (transcurrente).

La caracterización básica de cada tipo de falla se presenta a continuación en la figura 1.0.

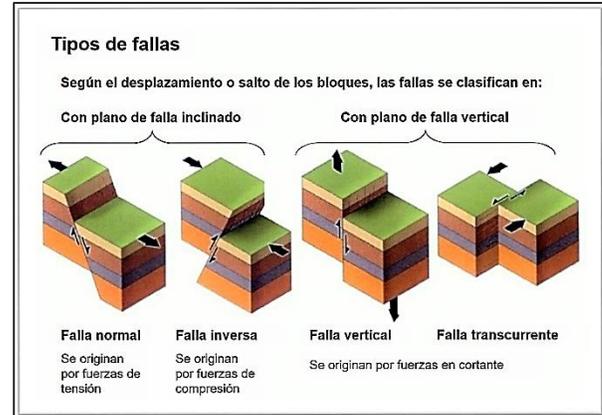


Figura 1.0. Tipos de fallas geológicas.
Fuente: Google imágenes.

Como se aprecia en la figura, se pueden clasificar las fallas en función del tipo de esfuerzo que las originan, y también en función de las propiedades finales que tiene el plano de desplazamiento, el modo de inclinación y la dirección del movimiento relativo entre bloques. Así, es posible describir cada una de los tipos de fallas como:

Falla normal: en este tipo de falla el plano entre los bloques adyacentes se encuentra inclinado, oblicuo con respecto al horizonte. Se crean cuando uno de los bloques (el superior) se comienza a deslizar hacia abajo con respecto al otro (el inferior). Debido a ese patrón de movimiento, en la falla se producen esfuerzos de tensión.

Falla inversa: como su nombre lo indica es un tipo de falla que ocurre en modo contrario a la falla normal. En esta se presentan esfuerzos de compresión perpendiculares al plano y el bloque inferior es el que desciende en relación con el superior, ya que este último se desliza hacia arriba.

Falla transcurrente: los bloques adyacentes se desplazan en sentidos contrarios, no con tendencia vertical sino horizontal. Dependiendo del sentido relativo en que sea medido el movimiento entre los bloques se puede tener una falla “transcurrente lateral derecha” o “transcurrente lateral izquierda” según sea la tendencia seguida por el bloque opuesto al de medida. Debido a que el plano es desplazamiento es vertical (aunque no así el movimiento) se tiene que los esfuerzos que dan origen a este tipo de falla son de tipo cortante.

Falla vertical: posee también un plano de desplazamiento vertical, sin embargo a diferencia de la falla transcurrente, en la falla vertical la dirección del movimiento es “hacia arriba” en un bloque y “hacia abajo” en el otro. Es también originada por

esfuerzos cortantes, y puede decirse que es una clase particular de las fallas inversa y/o normal.

Como dato adicional, en algunos casos la ubicación y dislocación de las fallas es observable a simple vista, sin embargo, la mayoría de las fallas geológicas se encuentran a una profundidad inaccesible para la percepción general, cubiertas por grandes estratos de sedimentos o también por masas de agua.

Además, es importante aclarar que existen otras clasificaciones válidas y complementarias para las fallas, para así tener un conocimiento más extenso de las mismas.

Puede hacerse mención a otro tipo de clasificación importante para las fallas geológicas, el cual no está función de la inclinación de estas o de los esfuerzos que las generan, sino en actividad o no de las mismas. Las fallas pueden encasillarse en "activas" o "no activas", dependiendo de las evidencias que se tengan sobre desplazamientos ocurridos en estas. Múltiples desplazamientos en un período de hasta quinientos mil años equivale a evidencia suficiente para considerar que una falla se halla activa. También puede considerarse que una falla está activa si se tiene certeza de al menos un solo desplazamiento ocurrido entre los últimos treinta y cinco mil años.

Estos criterios pueden tomarse como válidos para realizar la determinación de la actividad de una falla y los procesos que se llevan a cabo al interior de esta, pero hasta cierto punto, puede decirse que son conservadores, ya que el criterio para determinar la actividad o inactividad de una falla no es universal.

Cabe resaltar que muchos expertos, entre ellos geofísicos, discrepan en cuanto a los períodos para definir la inactividad de una falla, ya que algunos de estos expertos en el campo consideran que diez mil años sin actividad es un lapso suficiente para declarar una falla como inactiva.

Naturaleza del movimiento sísmico

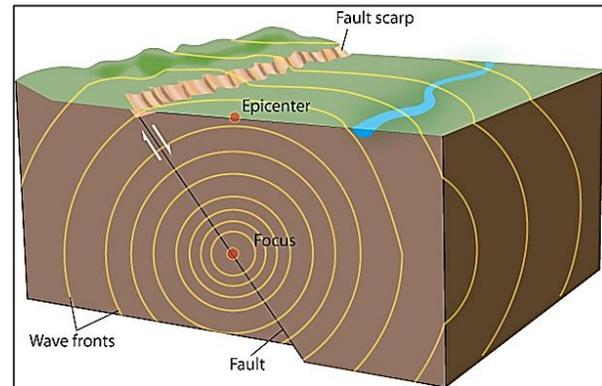


Figura 2.0. Representación gráfica de los componentes y dinámica de un sismo.
Fuente: Google imágenes.

Tras comprender cómo y por qué se originan los sismos y en qué sitios se desarrollan los procesos que dan origen a los mismos, es necesario aproximarse a otro tópico, la caracterización de estos, de sus parámetros físicos y de la forma en que se propagan las ondas vibratorias que los componen.

Antes de ir a los parámetros medibles por medio de los cuales se identifican las características individuales de cada evento sísmico, se debe tener entendimiento sobre la fuente de la cual proviene cada uno de estos aspectos individuales, el origen del sismo en sí mismo, es decir, de las ondas sísmicas que lo componen.

La energía liberada por la ruptura de la roca rígida, con motivo de deformación de la corteza, es disipada en forma de calor principalmente; sin embargo, un porcentaje considerable es irradiado en forma de vibraciones, vibraciones que son llamadas ondas sísmicas, y que obedecen los principios físicos básicos de las ondas mecánicas, como la necesidad de un medio para propagarse. En el caso de las ondas sísmicas, el medio de propagación es la tierra sólida, la cual rodea en todas las direcciones al punto del que emergen estas ondas (el punto de ruptura, conocido como foco o hipocentro) que en la superficie percibimos como sismos o terremotos.

Existen dos tipos principales de ondas sísmicas, aquellas que se transmiten a través del medio sólido de la tierra, y aquellas que se transmiten sobre el área superficial terrestre; ondas internas

(también llamadas profundas o de cuerpo) y ondas superficiales, respectivamente.

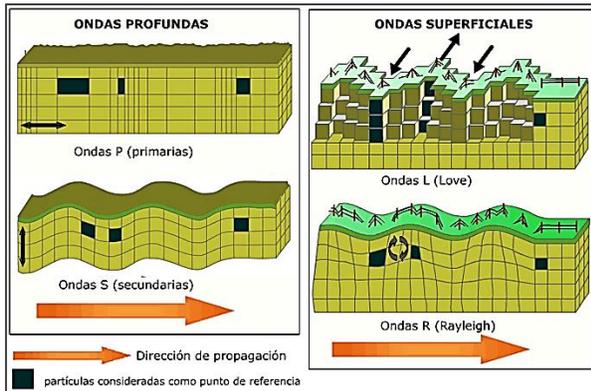


Figura 3.0. Tipos de ondas sísmicas.
Fuente: Google imágenes.

Los tipos de onda sísmica están a su vez subdivididos en categorías que reconocen el comportamiento de las ondas y no solo el medio de transmisión, tal y como puede apreciarse en la figura representativa 3.0.

Dentro de las ondas profundas o de cuerpo se encuentran las ondas primarias (P) y las secundarias (S). Las ondas P son aquellas que hacen vibrar a las partículas en el sentido de la propagación de las ondas; en su accionar comprimen y dilatan al medio sólido por el cual viajan, y es por esa razón que también se les puede llamar ondas longitudinales o de compresión. Por su parte, las ondas S le imponen a las partículas un movimiento perpendicular con respecto al sentido de propagación de las ondas a partir del hipocentro, lo cual ocasiona en el medio sólido la aparición de esfuerzos de cortante, razón por la cual a este tipo de ondas se le conoce también como ondas de cortante o transversales.

En el caso de las ondas superficiales, dentro de esta categoría se encuentran las ondas Rayleigh (R) y las ondas Love (L). Las ondas R son aquellas que hacen vibrar a las partículas en un sentido elíptico, siguiendo así trayectorias verticales y horizontales simultáneamente; moviéndolas además sobre un plano que avanza en la dirección de propagación de las ondas. En contraste, las ondas L siguen un patrón similar al de las ondas S, ya que hacen vibrar a las partículas en sentido perpendicular a la dirección de propagación de las ondas, sin embargo, ya que actúan sobre un plano superficial, la vibración es horizontal.

Cada uno de los tipos de onda sísmica es diferente al resto en cuanto a comportamiento, las ondas P son más rápidas que las ondas S, así como las ondas L son más veloces que las R. No obstante, las ondas S contienen mayor cantidad de energía que las P y además poseen una mayor amplitud de onda.

En general las ondas profundas presentan mayor velocidad que las ondas superficiales, y la velocidad de las primeras es más alta en función de la profundidad a la que se halle el hipocentro del sismo; a mayor profundidad, mayor velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

Las propiedades físicas de las ondas dependen de los materiales por los cuales se propagan y viajan, así que cuando las ondas sísmicas son reflejadas y refractadas por las distintas rocas de la corteza y pasan a través de materiales con distintas densidades sus características se ven modificadas, su velocidad cambia, y la trayectoria que siguen es desviada. Incluso ocurre que al pasar por estratos rocosos, parte de una onda puede pasar a ser de otro tipo, por ejemplo cuando una onda P toca el fondo de estratos de sedimentos aluviales parte de esta pasa a ser onda S, aquella que no viaja hasta la superficie.

En general, las ondas sísmicas no solo nos permiten conocer los parámetros relevantes para analizar los sismos que componen, sino que también, gracias a la detección de cambios discretos en las propiedades de las ondas se puede determinar que hay discontinuidad entre los estratos geológicos, lo cual nos permite obtener información sobre la estructuración de las capas internas de nuestro planeta. Todo esto al evaluar las interacciones de estas vibraciones con los medios sólidos que atraviesan, al obtener valores de velocidad y trayectoria con instrumentos de medición y registro de actividad de las capas litosféricas. De la misma forma se precisan los valores descriptivos de los movimientos sísmicos; los parámetros que los definen.

Parámetros del movimiento sísmico

Cada sismo es único, un evento sísmico es virtualmente irrepetible desde un punto de vista probabilístico. Las condiciones ambientales, de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones, así como las condiciones de los estratos de roca y sedimento

de la zona en que ha ocurrido un sismo, son individuales para cada temblor o terremoto, al menos desde un punto de vista teórico. Sin embargo, a nivel práctico, aunque sigue siendo verdad la individualidad y unicidad de cada evento sísmológico, también es verdad que distintos sismos pueden ser comparables y entrar en la misma categoría o división tras analizar el tamaño, alcance y fuerza de los mismos.

Para medir el tamaño y la fuerza de estos fenómenos naturales, se han establecido parámetros para cuantificar y cualificar sus características físicas y su efecto sobre el entorno natural y urbano. La magnitud de un sismo es el parámetro por medio del cual se establece el tamaño del evento, utilizando instrumentos de medición, y registro cualitativo de las consecuencias del sismo; se relaciona con la cantidad de energía que es liberada al momento de la fracturación de la roca en la falla. Por otro lado, la intensidad es la medida de la fuerza con la que se mueve el terreno durante el suceso, así como de los daños estructurales que cause el sismo.

Siendo que la intensidad es una medida del grado de vibración del terreno, en función a la distancia entre el punto de medida y el punto epicentral el valor de la fuerza varía y disminuye entre más lejos se haga la medición relativa al área epicentral.

La magnitud no está atada a trabajar en función de una variable como la distancia, y eso la vuelve más sencilla de determinar, ya que para cada evento sísmico, se considera que la magnitud es una constante única y cuantitativa que se asigna sin depender del sitio de observación.

Para asignar a un sismo su magnitud se toma la amplitud de onda más grande registrada en el sismograma y se mide.

Existen sin embargo, varios métodos para medir el tamaño del sismo, dependiendo de en qué onda se base la medición de la amplitud. La escala de magnitud Richer (también conocida como escala de magnitud local), desarrollada por Charles Richter en 1935, la cual es la más famosa y la primera en ser implementada, y está definida como la resta en escala logarítmica de la máxima amplitud de las ondas registradas en el sismómetro — medidas desde un punto a cierta distancia del foco— para el evento dado y la amplitud de un evento normalizado y tomado como patrón.

El rango de aplicación de la escala Richter es relativamente amplio, siendo que se utiliza para medir magnitudes que van desde 2.0 hasta los 6.9

y con hipocentros que pueden estar próximos a la superficie o hasta a cuatrocientos kilómetros de profundidad.

CUADRO 1.0. EFECTOS ESPERADOS PARA SISMOS DE MAGNITUDES TÍPICAS		
Magnitud	Efectos de un sismo	Frecuencia de ocurrencia
Menos de 2,0 (micro-sismos)	Se conocen como microsismos y no son perceptibles.	Aprox. 8000 por día
2,0-2,9 (sismos menores)	Generalmente no son perceptibles.	Aprox. 1000 por día
3,0-3,9 (sismos menores)	Perceptibles frecuentemente, pero no provocan daños.	49 000 por año.
4,0-4,9 (sismos ligeros)	Se mueven objetos no fijos, produciendo ruido. Sismos perceptibles pero que no generan daño.	6 200 por año.
5,0-5,9 (sismos moderados)	Causan daños importantes en edificaciones débiles. En edificaciones bien diseñadas y construidas los daños son leves.	800 por año.
6,0-6,9 (sismos fuertes)	Pueden causar daños graves en zonas urbanas, en una extensión de hasta 160 kilómetros a la redonda.	120 por año.
7,0-7,9 (sismos mayores)	Pueden provocar daños graves en zonas extensas.	18 por año.
8,0-8,9 (sismos grandes)	Pueden provocar daños graves en cientos de kilómetros a la redonda.	1-3 por año.
9,0-9,9 (sismos grandes)	Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros.	1-2 en 20 años.
10,0+ (sismos épicos)	Nunca registrado.	No reportada.

Fuente: USGS; realizado en Microsoft Excel 2013.

Es necesario recalcar que los daños y períodos de ocurrencia entre eventos son estimaciones basadas en registros previos, que si bien son confiables no deben asumirse como inamovibles y determinantes, ya que, especialmente en el caso de los efectos sobre las edificaciones, los daños no dependerán únicamente de la magnitud registrada sino también de otras variables como: las condiciones geológicas de la zona, ubicación del epicentro, profundidad del hipocentro, el diseño estructural de los proyectos ingenieriles, su proceso constructivo, etc.

Debe considerarse también, que los sismos con magnitudes superiores a 7.0 no deben medirse por medio de la escala Richter, y hablar de un sismo de una magnitud mayor a 6.9 en esta escala se considera un error. Lo anterior se da debido a que si bien las medidas empíricas de las amplitudes de ondas sísmicas han permitido desarrollar las escalas de magnitud gracias a la comparación cualitativa del tamaño de los eventos, esa magnitud definida a través de procesos empíricos no permite definir los eventos en términos del proceso de ruptura de la roca y dislocación.

Para poder lidiar con el problema de la inaplicabilidad de las escalas de medida para magnitudes muy altas existe la escala sismológica de magnitud de momento, la cual surge en 1979, tras la introducción de un concepto para designar el tamaño de un sismo en función de las propiedades físicas y mecánicas de la roca y del área de ruptura al instante de ocurrencia: el momento sísmico; este, al ser una medida física refleja con mayor precisión la fuerza de un sismo, además de que puede ser interpretado en términos de la energía que es liberada durante un evento.

La energía sísmica irradiada durante los fenómenos sismológicos es un aspecto esencial del estudio de estos, y del campo de la geofísica. La energía, como se ha mencionado previamente, es liberada en el momento en que se da la fractura de la roca rígida en la litósfera, emergiendo como calor y ondas sísmicas. Esta energía irradiada puede ser directamente relacionada con la magnitud de los sismos. A mayor área de ruptura corresponde mayor energía liberada, y a su vez el área afectada está relacionada con el tamaño del sismo, a mayor energía mayor tamaño y destrucción. Asimismo, la intensidad depende de la distancia a la cual el sismo sea percibido y observado, por lo que si se tiene mayor energía liberada y un sismo de mayor envergadura, se podrán experimentar distintas intensidades, en más puntos

de observación, lo cual significa que la energía también influye sobre el parámetro de la intensidad.

La intensidad mide el grado de vibración percibido en un punto o localidad determinados, por lo que no es un valor único que pueda asignarse a un evento sísmico, sino uno que depende del sector en el que sea registrado. Existen dos formas básicas de medir la intensidad de un temblor o un terremoto, las cuales son: la apreciación subjetiva y la medición instrumental.

La apreciación subjetiva mide los efectos aparentes de un sismo determinado en un sitio dado, no utiliza instrumentos y se basa en asignar grados a las diferentes formas en que se siente la vibración de un terreno, así como a las repercusiones estéticas y estructurales que pueda tener el movimiento de la tierra sobre las construcciones.

La medición instrumental es un método más racional y lógico para cuantificar la intensidad de un evento sísmico. Este procedimiento es una medida de la amplitud del movimiento del terreno, basado en el uso de parámetros como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, obtenidos de instrumentos como los acelerógrafos.

La aceleración es a su vez expresada como un cierto porcentaje de la gravedad terrestre y es la medida instrumental más utilizada y general, así como una de los aspectos a considerar para determinar el efecto de los terremotos sobre las estructuras existentes, empleándose para calcular las fuerzas sísmicas que actúan sobre estas.

Al igual que en el caso de la magnitud, para calificar la intensidad de los sismos se cuenta con escalas de clasificación, mismas que proveen un encasillado para el evento, dependiendo de los grados de destrucción establecidos según sea el escenario. Existen diversas escalas que son de uso común alrededor de los diferentes sectores del mundo, tales como: la Rossi-Forel, la Mendredev-Sponheuer-Karnik (MSK), la escala japonesa, la escala Mercalli Modificada (la más empleada en el continente americano), etc.

La escala Mercalli Modificada posee una configuración escalonada, subdividida en niveles, que van desde el I hasta el XII; estos niveles representan la asignación determinística para un sismo que pueda ocurrir en un sitio factible. Los niveles se basan, en un principio, en la posibilidad, facilidad y forma en que los movimientos del terreno son percibidos por los seres humanos y, en la cantidad y gravedad de las consecuencias estructurales sufridas por las edificaciones que se

encuentren dentro del ámbito de acción del sismo, para los niveles medios y en adelante, hasta el más alto.

CUADRO 2.0. ESCALA DE INTENSIDAD SÍSMICA MERCALLI MODIFICADA	
Grado	Descripción
I - Muy débil.	Imperceptible para la mayoría bajo condiciones normales; perceptible en condiciones favorables.
II - Débil.	Perceptible solamente por algunas personas en reposo, particularmente por aquellas que se encuentran ubicadas en niveles superiores de edificios altos. Los objetos colgantes pueden oscilar.
III - Leve.	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en niveles altos de los mismos. Muchas personas no lo perciben como un terremoto. Los automóviles en reposo se mueven ligeramente; sensación pasiva pero perceptible, similar al paso de un camión pequeño.
IV - Moderado.	Perceptible durante el día por la mayoría de personas que se encuentran en el interior de edificios; por pocas personas en el exterior de los mismos. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbaciones en cerámica, puertas y ventanas producto de las vibraciones. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación similar al paso de un camión grande.
V - Poco fuerte.	Sacudida sentida casi por todo un país o zona geográfica. Algunas piezas de vajilla, cerámica y/o cristales de ventanas se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos

	altos. Se detienen los relojes de péndulo. Si es de noche, muchas personas despiertan.
VI - Fuerte.	Sacudida sentida por todo el país o zona geográfica. Algunos muebles pesados se mueven, cambian de sitio y al hacerlo causan daños leves, en especial en viviendas de material ligero. Puede presentarse temor, y las personas salen de los interiores hacia espacios abiertos debido a esto.
VII - Muy fuerte.	Ponerse de pie es difícil. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños de leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables en estructuras pobremente construidas. Perceptible por personas que van en vehículos en movimiento. Las personas huyen a zonas abiertas.
VIII - Destructivo.	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles derrumbes. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Muebles completamente sacados de lugar por la vibración. La conducción de vehículos se dificulta.
IX - Muy destructivo.	Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes desaplomadas. Grandes daños en importantes edificios, con derrumbes parciales. Edificios desplazados fuera de los cimientos. Grietas en el terreno. Daño de fundaciones.
X - Desastroso.	Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. Puentes destruidos; represas dañadas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Vías ferroviarias dobladas. Tuberías subterráneas

	destruidas. Grandes deslizamientos de tierra. El agua rebasa el borde de los ríos.
XI - Muy desastroso.	Pocas estructuras de mampostería, si las hubiera, permanecen en pie. Puentes destruidos. Rieles de los ferrocarriles dañados severamente. Ruptura de tuberías grandes.
XII - Catastrófico.	Destrucción total con pocos supervivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados. Grandes masas de roca desplazadas.

Fuente: USGS; realizado en Microsoft Excel 2013.

Como se ha mostrado, la energía irradiada por el fenómeno de la ruptura, influencia y delimita el alcance de parámetros como la magnitud y la intensidad. Y cabe resaltar, que estos dos parámetros característicos de los sismos pueden ser analizados a partir de correlaciones, y con base en uno estimar el otro. Esto gracias a las observaciones empíricas efectuadas respecto a los efectos sobre las edificaciones y las reacciones en los seres humanos a la hora de la ocurrencia de una ruptura.

CUADRO 3.0 COMPARACIÓN ENTRE INTENSIDAD Y MAGNITUD	
Magnitud (escala Richter)	Intensidad máxima (escala Mercalli Modificada)
1.0 - 3.0	I
3.0 - 3.9	II – III
4.0 - 4.9	IV – V
5.0 - 5.9	VI – VII
6.0 - 6.9	VII – IX
7.0 o más alto.	VIII o más alto

Fuente: USGS; realizado en Microsoft Excel 2013.

Fenómenos de amplificación

A pesar de ser las cualidades esenciales para definir los efectos de los sismos en las zonas geográficas en que ocurren, los daños y consecuencias negativas de los eventos sismológicos no dependen únicamente de la magnitud y la intensidad de los mismos. A la hora de analizar en qué grado se ha visto perturbada una población concreta después de enfrentar un temblor (sismo que no produce daños) o un terremoto (sismo que sí produce daños) se debe considerar, además de los atributos físicos y propios del evento causado por la liberación de energía acumulada en una falla, las condiciones circundantes del territorio en el cual se encuentra dicha falla y por ende el hipocentro del sismo.

La amplitud de las ondas sísmicas puede ser afectada por una gran cantidad de variables ajenas al movimiento del terreno, principalmente ligadas a aspectos del entorno, tales como: la topografía del terreno y las condiciones geológicas del subsuelo; así como la direccionalidad del terremoto y su mecanismo de generación.

Las condiciones geológicas del subsuelo son un aspecto que puede contribuir a extender o reducir la amplitud de las ondas sísmicas según sea la configuración de estratos que compongan el terreno. Se tiene que si las ondas sísmicas pasan de un medio (estrato) rígido a uno blando la velocidad de las ondas sísmicas se verá afectada, disminuyendo. La disminución en la velocidad se debe a la ley de la conservación de la energía, principio a partir del cual se ha concluido, teóricamente, que el desplazamiento de las partículas del suelo debe incrementarse al pasar de un cuerpo de propagación rocoso a uno con menor densidad. Así, se ha determinado que la aceleración asociada a las ondas sísmicas aumenta en la superficie, cuando se pasa de un estrato rígido a uno blando, influyendo así sobre la intensidad del sismo sin que la locación de observación sea la variable determinante, causando mayores destrozos y afectaciones; esto demuestra que la intensidad no solo puede ser afectada por la distancia entre un punto cualquiera y el foco del sismo sino también por las condiciones locales del subsuelo.

La topografía es otro factor que puede amplificar o atenuar la intensidad de movimiento provocada por las ondas sísmicas, ya que el ángulo con el que inciden las ondas sobre la superficie terrestre, así como la dirección de las mismas, son ambos aspectos que pueden elevar el grado

de vibración. En general, las irregularidades topográficas tienden a aumentar la intensidad del sismo, cuando se trata de colinas o bordes de valles, hasta en un 50%. No obstante, cuando se está en sitios llanos, las repercusiones negativas sobre las estructuras construidas, así como la aceleración máxima del terreno, decrecen notablemente, siendo que según estudios realizados la aceleración en el terreno puede bajar hasta en un 65%.

La direccionalidad de las ondas sísmicas es otro distintivo a tomar en cuenta, ya que generalmente provoca un incremento en la amplitud de las ondas, en la dirección en que se propaga la ruptura de la roca en la falla geológica. En sitios ubicados en una posición opuesta a la dirección de propagación de la ruptura se han registrado intensidades menores y con frecuencias más bajas. El efecto se debe a la polarización de las ondas en los puntos en que se expande y viaja la ruptura, y demuestra, en conjunto con los demás hechos expuestos, que la intensidad del movimiento sísmico varía, además de por la posición y distancia de la región en relación con el epicentro del terremoto, por las condiciones topográficas, la configuración y composición local del subsuelo y por la locación azimutal del sitio con respecto a la dirección en que se desarrolla la ruptura.

Riesgo sísmico y zonificación

El planeta está conformado por diecisiete placas litosféricas según se ha mencionado antes, la actividad tectónica es constante, y como consecuencia de ese hecho existen estructuras geológicas, parte de las cuales son fallas en las que existe el potencial para la ocurrencia de sismos de magnitudes e intensidades variables. Es una condición natural e intrínseca del globo, por lo cual es necesario adaptarse a esta a la hora de pensar en el desarrollo social de nuestra especie.

Es por esta razón que a la hora de diseñar proyectos de ingeniería civil se vuelve indispensable el estimar la intensidad máxima de una sacudida del terreno, al igual que los daños probables que puedan ser causados sobre las edificaciones y obras civiles en el futuro, a razón de un evento sísmico.

Para poder estimar la intensidad máxima del movimiento del terreno, se utilizan modelos de riesgo sísmico, en los cuales se toma a la aceleración máxima del terreno como medida válida de la

intensidad, ya que este es un parámetro razonable (aunque no único) para determinar el riesgo sísmico y poder realizar mapas de zonificación sísmica.

En los estudios de riesgo se consideran dos conceptos relacionados en origen pero no iguales; uno de ellos es la amenaza sísmica, concepto que se cual se refiere a la cuantificación de los eventos sísmicos futuros, así como las acciones que puedan surgir de estos y que puedan tener efectos perjudiciales para las actividades humanas.

La amenaza sísmica es un parámetro que pretende predecir la probabilidad de que un cierto valor de intensidad sísmica (comúnmente determinada a través de la aceleración del terreno medida instrumentalmente) sea superado en un período de tiempo predeterminado. El riesgo sísmico, por su parte, lo que busca es reflejar la probabilidad de que para un sitio específico, las afectaciones económicas y materiales, así como los efectos de aceleración del terreno, posean valores mayores a los prefijados para estos parámetros dentro de un lapso consolidado.

Debido a que los procesos tectónicos toman miles de millones de años en mostrar rasgos reconocibles a gran escala a pesar de que ocurren de forma continua, y además, los estudios en geofísica, el funcionamiento de las fallas y origen de los sismos, son todas áreas que comenzaron a ser estudiadas por medio de instrumentos y observaciones de campo pertinentes hasta hace poco más de un siglo, el nivel de comprensión con el que se cuenta en la actualidad sobre estos fenómenos es limitado, ya que no tenemos acceso a miles de años de información que podría haber sido registrada para contribuir a un entendimiento más detallado de la tectónica de placas y los eventos sísmológicos.

Es por restricciones como esa, y por la falta de un método teórico avanzado, que hasta el día de hoy no se tiene un modo determinista de predecir los eventos sísmicos, y es por ello que se acude a modelos basados en análisis probabilísticos para poder anticipar la actividad sísmológica futura. En 1968 Carl Allin Cornell propuso una metodología probabilística para evaluar la amenaza y el riesgo sísmico de una cierta región. Su propuesta fue ampliada y trabajada en mayor extensión por Sylvester Theodore Algermissen en 1972.

El riesgo sísmico de una región está en función de la actividad sísmica de la región, la cual

si bien no puede ser calculada con exactitud debido al corto período de recolección de datos con el que contamos en comparación con la edad geológica de la tierra, si puede ser aproximada desde un punto de vista práctico gracias a la extrapolación que puede realizarse utilizando los registros y principios teóricos establecidos. La aproximación y su funcionalidad dependen de la cantidad y calidad de datos con que se cuente.

La información necesaria para poder evaluar el riesgo sísmico debe incluir:

- La tectónica regional del sitio evaluado.
- La geología local.
- Registros históricos sobre eventos destructivos ocurridos en la región.
- Información sismológica, proveniente de medidas instrumentales.
- Estadísticas.
- Mapas de localización de eventos sísmicos, e información sobre las fuentes de estos.
- Condiciones locales del subsuelo.

Con base en esta información reunida se debe llevar a cabo el estudio de amenaza sísmica para el sitio, y asimismo integrarse a la estimación del riesgo sísmico para la misma región, con el fin de obtener resultados que abarquen las preocupaciones monetarias, sociales, y los aspectos geofísicos más relevantes.

Tras ejecutar un análisis sísmico deben reportarse los resultados del mismo. La forma más práctica, sencilla y efectiva de hacerlo es a través de la confección de mapas de isoaceleración, los cuales son mapas de la zona estudiada, en los que a través de las líneas de isoaceleración se definen áreas dentro de la zona, a las cuales les corresponde una misma amenaza sísmica, siendo que estas líneas están definidas por la trayectoria de los puntos que presentan igual aceleración del terreno. Es así, por medio de la definición de subáreas con amenaza sísmica equivalente dentro del área de estudio, que se logra estructurar y producir una zonificación sísmica.



Figura 4.0. Mapa de zonificación en términos de isoaceleraciones para Costa Rica, para representar la amenaza sísmica en considerando un período de retorno de 100 años (las áreas púrpura y naranja son en las que se pueden generar mayores aceleraciones).

Fuente: Atlas de Costa Rica, versión 2014; proyecto RESIS II.

Dado que el riesgo sísmico representa la probabilidad de que, para un período de tiempo establecido, se sobrepasen ciertos números de pérdida económica y sociales con motivo de la ocurrencia de un sismo con la intensidad suficiente para causarlos, se deduce simplemente que antes de conocer el riesgo sísmico de un área geográfica como tal, se debe determinar la amenaza o peligrosidad para esa región. Esto debido a que la amenaza sísmica es la probabilidad de que dicho evento —o eventos— de intensidad suficiente para impactar las actividades humanas se dé.

Además del cálculo de la amenaza sísmica, la cual incluye la evaluación del fenómeno que podría causar pérdidas, existe otro detonante potencial de pérdidas que debe estudiarse: el estado y las propiedades estructurales de las edificaciones y proyectos constructivos realizados. Así, el riesgo sísmico es al final una probabilidad combinada entre dos parámetros: la amenaza sísmica de la zona y la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Metodologías para determinar la amenaza sísmica

Para calcular la amenaza sísmica de una zona en estudio se debe hacer uso de las definiciones presentadas anteriormente, la magnitud, distancia al hipocentro e intensidad, son parámetros importantes a la hora de evaluar y cuantificar la probabilidad de ocurrencia de un sismo para un lapso determinado, considerando la influencia de la actividad sísmica de los sitios de ruptura adyacentes que se encuentren identificados.

Los sismólogos, geofísicos y demás expertos relacionados han procurado desarrollar metodologías efectivas para el señalamiento técnico y preciso del comportamiento de las fuentes, de las ondas sísmicas al transitar por medio de lechos rocosos y/o blandos, el comportamiento mecánico de los distintos suelos al experimentar la incidencia de las ondas, y la predicción de los sismos para cumplir con el propósito de advertir a la población y tomar medidas para reducir la pérdida de vidas y los daños a las áreas urbanas.

Es a través de estos esfuerzos acumulados, estudios realizados en diferentes puntos del planeta y el trabajo matemático y teórico para dar una explicación razonable a las observaciones, que se han llegado a definir dos metodologías principales para la evaluación de la amenaza sísmica.

La primera metodología es la del “Análisis Determinístico de la Amenaza Sísmica” (ADAS, o DSHA por sus siglas en inglés), la cual se basa en la estimación del movimiento del terreno y los efectos secundarios relacionados con dicho movimiento. Esta metodología requiere de la definición de un área de estudio y un escenario o escenarios necesarios, sean varios o uno único, se definen utilizando sismos de magnitud conocida con ocurrencia en ciertos puntos en específico.

Los pasos necesarios a seguir para realizar un DSHA, según el informe ERN-CAPRA-T1-3, se pueden resumir en:

- Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis. Se requiere definir cada fuente en términos de su geometría y sismicidad.
- Selección de la distancia de la fuente al sitio. Generalmente se toma la menor distancia existente entre la fuente y el lugar de análisis.

- Selección del sismo de análisis, el cual representa de la mejor manera el potencial sísmico de la fuente en consideración, en términos de la intensidad en el sitio bajo estudio. Se debe escoger a partir de comparación de los niveles de intensidad generados por sismos históricos de la región, o de otras regiones con características neotectónicas similares, de tal manera que sea posible definir una magnitud del sismo de análisis para las distancias anteriormente definidas.
- Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de diversos parámetros como la aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, o cualquier otro parámetro.

Con el DSHA se aplica un evento sísmico de magnitud conocida en un punto conocido del área estudiada (o próximo a esta, siempre y cuando influya sobre la misma) y se plantea así el peor caso posible para las edificaciones, imponiendo sobre estas las sollicitaciones más altas a las que se pueden ver sometidas según el registro histórico sismológico de la región. Este método determinístico para obtener la amenaza sísmica es bastante práctico y directo, no obstante, cuenta con limitantes, como el hecho de que no se están considerando las condiciones del territorio o de la fuente al momento en que se realiza el análisis, sino que solo se toma en cuenta la intensidad histórica más relevante; no se busca un proceso óptimo de selección para el escenario, ya que no se calcula la probabilidad de que un evento con los parámetros seleccionados pueda ocurrir a corto, medio o largo plazo; y finalmente, no se estudian las variables que influyen sobre la fuente, el comportamiento de esta dentro del rango temporal para el cual se realiza la determinación de la amenaza es ignorado.

La segunda metodología, que ha venido siendo implementada en las últimas décadas y ha buscado resolver de alguna manera las limitantes de la aproximación determinista, es aquella que se basa en analizar de forma pertinente la incertidumbre asociada a aspectos como la frecuencia de ocurrencia de sismos con igual intensidad en la región en estudio; la probabilidad de que un sismo de determinadas características pueda o no ocurrir

en ciertos sectores incluidos en el análisis de peligrosidad sísmica; la probabilidad de que las intensidades más altas registradas para eventos pasados puedan ser superadas; entre otras. Esta metodología para el Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica (APAS, o PSHA por sus iniciales en lenguaje anglosajón) es más recomendada que la DSHA como herramienta definitiva para el estudio de la peligrosidad sísmica (siempre y cuando se cuente con los recursos para aplicarla) y, según el informe ERN-CAPRA-T1-3, es posible resumirla mediante los siguientes pasos:

- Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de puntos de inicio de la ruptura en el área de falla definida. Es usual asumir una distribución de probabilidad uniforme, lo cual implica que la ocurrencia de sismos se espera con igual probabilidad en cualquier lugar de la geometría de fuente definida.
- Determinación de la sismicidad de las fuentes consideradas, a partir del registro histórico de eventos ocurridos sobre la geometría anteriormente definida (catálogo sísmico), y de información y estudios de neotectónica y paleosismología para la fuente. La sismicidad se establece por medio de una curva de recurrencia de magnitudes, la cual es una relación específica para cada fuente, que indica cual es la tasa de excedencia de una magnitud sísmica particular.
- Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de diversos parámetros como la aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, etc. Debe involucrarse la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros, generalmente indicada en cada modelo de atenuación.
- Finalmente se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtiene una curva de amenaza, la cual indica la probabilidad que una intensidad específica sea igualada o excedida en un periodo de tiempo determinado.

Tipos de vulnerabilidad

La otra parte importante para poder estudiar y concluir el riesgo sísmico de una región es la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones construidas por los seres humanos, la cual, como se mencionó en un inicio, es definida mediante la evaluación del daño probable que sufrirán las distintas estructuras ubicadas dentro del área de influencia de un cierto evento sísmico.

A través de décadas de observación y estudios se ha podido determinar que incluso estructuras que pertenecen a la misma tipología no necesariamente sufren el mismo daño, a pesar de ubicarse en el mismo sector relativamente hablando. Esto se debe a que muchos factores se ven envueltos en la construcción de una obra civil, la calidad de los materiales, la coordinación, los procesos constructivos seguidos, así como la mano de obra y la supervisión técnica, son todos factores que pueden llegar a influir negativamente en la vulnerabilidad sísmica de una estructura, volviéndola mayor al no asegurarse, aplicarse o seguirse de la manera adecuada aquello que sea especificado para la correcta elaboración de los proyectos constructivos. Esto quiere decir, además, que la vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de cada estructura, que si bien depende de cuestiones como la tipología y demás, no es arbitraria o generalizable para ningún tipo de construcción. Y como aclaración extra, cabe resaltar que bajo ese mismo hecho, se puede afirmar que la vulnerabilidad sísmica es independiente de la amenaza de una determinada zona geográfica, lo cual quiere decir que una estructura puede ser muy vulnerable sin necesariamente estar en riesgo, ya que para que exista riesgo debe cumplirse con la combinación de peligro y vulnerabilidad. De igual forma, una estructura podría tener una baja vulnerabilidad sísmica, pero encontrarse en una zona de alta amenaza, son aspectos independientes, a pesar de que las condiciones geológicas de un terreno pueden influenciar sobre los tipos de cimentación escogidos para los proyectos y aspectos relacionados, por lo que la conexión no es nula, sin embargo, en primera instancia no es determinante.

Siendo que la vulnerabilidad es una característica propia de las estructuras, se debe tener claro qué clase de vulnerabilidades hay. Si bien es cierto, ante el acontecimiento de un sismo cuyas intensidades sean tan elevadas como para alterar

el desarrollo momentáneo de actividades humanas o influir en el desempeño de las personas que ejecutan las mismas, se espera que existan daños o consecuencias sobre las estructuras ocupadas por dichos ciudadanos, no es posible considerar todas las consecuencias como equivalentes en su naturaleza ni en su grado de impacto sobre las edificaciones.

Debido a que existen consecuencias únicas y particularidades para diferenciar los daños sufridos luego de un temblor o terremoto, es necesario contar con una clasificación para los tipos de vulnerabilidad a los que están expuestas las estructuras, ya que no todas cuentan con el mismo diseño y/o proceso de confección; así que los aspectos en los que son más vulnerables no tienen por qué concordar. Se distinguen así tres tipos básicos de vulnerabilidad ante la ocurrencia de sismos: la vulnerabilidad estructural, la no estructural, y la funcional.

La vulnerabilidad estructural es aquella que se refiere a la facilidad con que se puede perjudicar la integridad de los elementos sismo-resistentes de una estructura durante un evento sísmológico, a causa del mismo. Los elementos sismo-resistentes, son a su vez, aquellos encargados de recibir, resistir, y transmitir a la cimentación de la estructura aquellas las cargas a las cuales esta se ve expuesta; cargas que pueden ser de tipo temporal, permanente, de sismo, empuje o ambientales. Este tipo de vulnerabilidad es el de mayor relevancia desde el punto de vista de un diseñador estructural, ya que se trata de la ocurrencia de fallas en resistencia de miembros de la estructura sin los cuales está no puede mantenerse en pie. La vulnerabilidad estructural alta de un edificio indica que probablemente este colapsará durante un sismo, al estar expuesto a la vibración del terreno y una sacudida más fuerte de lo que está preparado para asimilar.

Los miembros sismo-resistentes que deben ser evaluados dentro de esta categoría incluyen a: las vigas, columnas, entrepisos, muros en cortante, etc.



Figura 5.0. Vivienda con daños en miembros estructurales tras un sismo de 7.2 grados en Baja California, México.
Fuente: Google imágenes.

La vulnerabilidad no estructural también puede considerarse como la susceptibilidad de los miembros de una edificación a fallar por resistencia durante un sismo, es decir, a que las solicitaciones del ambiente circundante terminen por ser mayores que los esfuerzos máximos que puedan resistir dichos miembros. La diferencia entre la vulnerabilidad estructural y la no estructural es que en esta última los elementos sujetos a daños considerables no son indispensables para que la obra se mantenga estable. Sin embargo, lo anterior no significa que una edificación no pueda quedar inhabilitada debido a consecuencias de la vulnerabilidad no estructural, en muchos casos el colapso de equipos mecánicos y elementos arquitectónicos, así como de componentes no fijos de la estructura, pueden dejar a la misma fuera de condiciones admisibles para seguir operando, por lo que la evacuación sería prioritaria. Casos en los que la vulnerabilidad no estructural pesa tanto o más que la estructural pueden encontrarse en hospitales, clínicas, fábricas y demás.



Figura 6.0. Santuario en Pencahue, Talca, con daños menores y no estructurales tras el sismo de 8.8 grados ocurrido en 2010 en el mar de Chile, frente a las localidades de Curanipe y Cobquecura.

Fuente: Google imágenes.

Como último tipo de vulnerabilidad sísmica se tiene la vulnerabilidad funcional. La vulnerabilidad funcional de una estructura, contrario a las dos previamente mencionadas, no denota fallas por resistencia de los materiales al momento del sismo, sino que más bien lleva a fallas por servicio, lo cual quiere decir que tras el evento sísmico es posible que la edificación ya no pueda cumplir de manera satisfactoria con las demandas de aquellos aspectos básicos para considerarla utilizable a razón de ser vulnerable en esta casilla. Incluye aspectos como el funcionamiento de las tuberías y las conexiones eléctricas, el funcionamiento de los servicios sanitarios y demás; también incluye los pasillos y las áreas externas inmediatas al edificio. Para este tipo de vulnerabilidad el análisis no se concentra en determinar si la estructura podrá o no seguir de pie tras la ocurrencia de un sismo o a cuáles daños está expuesta y cuáles probablemente experimentará, sino que se analiza si la edificación podrá, tras el terremoto, brindar el servicio para el cual está capacitada originalmente.

En general, los tres tipos de vulnerabilidad son conceptos derivados de la definición global, y

la componen a la hora de realizar un estudio. Lo anterior quiere decir que al estudiar la vulnerabilidad sísmica de una o más edificaciones, se debe estudiar cada uno de los tipos de vulnerabilidad, ya que conforman la medida completa y deben abordarse en orden de prioridad, primero la vulnerabilidad estructural, seguida de la no estructural y la funcional.

En teoría, ninguna condición de una estructura debe pasarse por alto al momento de evaluar la vulnerabilidad sísmica de esta, y para ello se elaboran formularios que permitan una revisión tan integral y sencilla como sea posible, y con la cual se obtenga toda la información necesaria para la evaluación.

Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad

Tras conocer las clases de vulnerabilidad que se consideran a la hora de englobar el término “vulnerabilidad sísmica” es obligatorio describir brevemente los métodos existentes para llevar a cabo la evaluación de esta propiedad de las edificaciones.

Para la determinación de la vulnerabilidad sísmica de una estructura existente hay procedimientos y sistemas de diversas naturalezas, existen métodos cualitativos y experimentales, así como también los hay analíticos o cuantitativos. Los modelos de evaluación pueden variar en cuanto a complejidad y detalle según obedezcan a un alcance previamente definido, y vayan en concordancia con el objetivo por el cual se busca determinar la vulnerabilidad.

Los métodos cualitativos se limitan a evaluar de manera rápida un grupo de edificaciones variadas y, con base en los resultados de este primer análisis, seleccionar aquellas construcciones que requieren de un mayor escrutinio. Estos métodos son muy útiles en zonas donde la proporción de estructuras es muy grande en comparación con la cantidad de territorio que ocupan, y en las cuales no resulta práctico realizar un análisis detallado para cada una de las obras, siendo que ciertos grupos cuentan con una vulnerabilidad menor y estimable de manera válida a partir del análisis cualitativo. A su vez, los estudios basados en sistemas cualitativos son útiles porque funcionan como referencia para futuras evaluaciones, es decir, las edificaciones que requieran de evaluaciones más detalladas toman los resultados de estos

análisis y trabajan a partir de las conclusiones de estos, que pueden tomarse como datos de entrada.

Algunos métodos cualitativos corresponden a las primeras fases de estudios analíticos, como es el caso del método japonés. También puede hacerse referencia a otras metodologías de este tipo, y que son ampliamente utilizadas, provechosas y rentables para gran cantidad de escenarios, tales como: el método FEMA 154 (también ATC-21), el NAVFAC, el ISTC y el método del índice de vulnerabilidad, entre otros.

El método ATC-21 o procedimiento de investigación visual rápida (RVS por sus siglas en inglés) es un procedimiento para la determinación de la vulnerabilidad sísmica, desarrollado por la Federación de Manejo de Desastres de Estados Unidos (Federal Emergency Management Agency, FEMA), de aplicación sencilla en el cual se le asigna una calificación inicial a la edificación en estudio, tomando como criterio la sismicidad de la zona en que se encuentre, y conforme se avanza con la revisión de la misma, se le pueden agregar o sustraer puntos a la calificación inicial dada. A medida que se realiza el estudio se van filtrando aspectos estructurales de la obra, y por lo tanto, este método depende del tipo de estructura y del sistema sismo-resistente que se emplee en el mismo.

El ATC-21 es un nivel básico de evaluación, que hace diferencia entre tres zonas sísmicas estándar, estableciéndolas con sismicidades entre baja, media y alta. Así, el primer paso es ubicar la sismicidad de la zona en la que se encuentre la edificación sometida a la evaluación. Luego se procede como se aclaró antes, se determina el valor inicial para la estructura, tras reconocer el sistema estructural empleado para resistir cargas laterales, así como identificar los aspectos de la construcción que puedan afectar el comportamiento sísmico de esta.

El método considera varios parámetros para sumar o restar puntos a la calificación del principio, por ejemplo: la altura del edificio, las irregularidades geométricas, flexibilidad de los pisos, etc. Haciendo uso de estos parámetros se puede modificar el valor inicial, concluyendo en una clasificación final que puede ir de 0 a 6, y que en caso de ser menor a 2 se interpreta, al concluir la evaluación, que la edificación no es segura y que posiblemente tiene una alta vulnerabilidad sísmica. En todo caso, es válido considerar este análisis una evaluación preliminar, principalmente en el

caso de que la estructura resulte insegura, en cuyo escenario se deberá hacer otro tipo de análisis más detallados.

El método NAVFAC determina un índice de daños para la estructura, basándose en aquellas consecuencias negativas que puede causar un sismo determinado en esta, evaluando, para llegar a dicha determinación, aspectos como el cortante basal, el período fundamental y el desplazamiento entre plantas, o derivas relativas. Si el índice de daño es superior a un 60% entonces la estructura es probablemente insegura y se debe proceder a la realización de evaluaciones más detalladas.

El método que ha sido desarrollado por el Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni (ISTC) consiste en la determinación de la capacidad resistente de un edificio, evaluando su vulnerabilidad sísmica por medio del cálculo de dos parámetros iniciales, los índices I_1 e I_2 , que representan los dos modos de rotura que pueden presentarse en los muros de la edificación. Este procedimiento es aplicable para el análisis de la vulnerabilidad de grupos de edificios cuya estructura principal es soportada por muros de mampostería de tipologías y características constructivas semejantes y asociables. Una vez que se cuenta con los índices I_1 e I_2 se procede al cálculo del índice I_3 , el cual, en conjunto con los otros dos, permite la determinación de la vulnerabilidad sísmica, tomando como base una función de vulnerabilidad propuesta por el mismo ISTC.

Otro de estos procedimientos, considerado como uno de los métodos cualitativos más conocidos y empleados, es el del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984), el cual, podría argumentarse, cuenta con algunas ventajas por encima de los métodos mencionados previamente, ya que busca identificar los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios ante el impacto de los terremotos, y es más elaborado. Este método es más preciso que otros porque busca distinguir aspectos diversos y únicos de cada edificio, apelando a encontrar la diferencia entre construcciones de una misma tipología y/o procesos constructivos aplicados, para así registrar las repercusiones de estas diferencias. La metodología considera aspectos tales como el tipo de suelo sobre el cual se hace la cimentación de la estructura, la inclinación de las fundaciones, la configuración en planta y en elevación de la edificación, el tipo de sistema sismo-resistente empleado y cómo este está unido, el modo para resistir cargas sísmicas, etc. En total se evalúan

once aspectos, a cada uno de ellos se les da su respectiva posición e importancia y, al final, el valor de cada uno se multiplica por un coeficiente de peso, individual para cada uno de los aspectos; se realiza un sumatorio del producto de los once parámetros y sus coeficientes, el cual representa se considera como el índice de vulnerabilidad. Entre mayor sea el índice de vulnerabilidad, más vulnerable se considera la estructura estudiada.

Los métodos experimentales, por otra parte, son aquellos en los que se establece una correlación entre las características de los eventos sísmicos esperados y las del terreno de cimentación, los daños, los tipos y las configuraciones estructurales. Los resultados que se proveen a través de estos análisis son valores en promedio genéricos y con un grado de incertidumbre elevada.

Los métodos analíticos o cuantitativos son utilizados para obtener un mayor grado de detalle en el estudio de la vulnerabilidad de una obra constructiva ante sismos de diferente orden de magnitud, así como intensidad también. Tienen su fundamentación en un modelo calibrado que requiere de procesos más exhaustivos, ya que considera el análisis dinámico de los edificios evaluados, lo cual permite conocer parte por parte el proceso de plastificación y posterior colapso de una estructura estudiada. Sus resultados son sumamente precisos, sin embargo, se ha discutido la utilidad de los mismos, ya que los modelos de análisis son demasiado complejos, requieren de demasiado tiempo y datos para ser aplicados y, debido a esto, algunos expertos han concluido que el mayor detalle no justifica los contratiempos y dificultades que tienen estos métodos en contraste con los cualitativos. Entre los más usados están: el NSR-98, el FEMA-178 y el FEMA-273; así como el ATC-14.

Criterios de estructuración a considerar al evaluar la vulnerabilidad

La vulnerabilidad sísmica está en función de los materiales y de los procedimientos constructivos utilizados en la ejecución de una determinada obra; pero también depende del diseño estructural y arquitectónico de dicha obra. Esto quiere decir que aun si los métodos constructivos son aplicados correctamente y la calidad de los materiales

es la más alta, si el diseño de la edificación no fomenta un comportamiento óptimo contra los fenómenos sísmicos entonces el daño probable puede seguir siendo alto. Por lo tanto, el equilibrio entre todos los aspectos es lo que permitirá mitigar el efecto de las cargas de sismo en las estructuras.

A pesar de que el diseño es generalmente una etapa previa a la construcción y por tanto su revisión no aplica a edificaciones ya existentes, operativas y con años de funcionamiento, sí debe ser considerado en edificios ya inaugurados. Cuando una edificación ya ha pasado por el proceso de ser erigida, lo que resta es calificar las deficiencias de estructuración mediante evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica.

Los criterios básicos de estructuración que deben revisarse, según indican Bazán y Meli (1998), son los siguientes:

- El edificio debe poseer una configuración de elementos estructurales que le confiera resistencia y rigidez a cargas laterales en cualquier dirección. Esto se logra proporcionando sistemas resistentes en las 2 direcciones ortogonales.
- La configuración de los elementos estructurales debe permitir un flujo continuo, regular y eficiente de las fuerzas sísmicas desde el punto en que estas se generan (o sea de todo punto donde haya una masa que produzca fuerzas de inercia) hasta el terreno.
- Hay que evitar las amplificaciones de las vibraciones, las concentraciones de sollicitaciones y las vibraciones torsionales que pueden producirse por la distribución irregular de las masas o rigideces en planta o en elevación. Para tal fin conviene que la estructura sea lo más posible: sencilla, regular, simétrica y continua.
- Los sistemas estructurales deben disponer de redundancia y de capacidad de deformación inelástica que les permitan disipar la energía introducida por los sismos de excepcional intensidad, mediante elevado amortiguamiento inelástico y sin la presencia de fallas frágiles locales y globales.

Si estos criterios no son aplicados y por consiguiente no están presentes en la edificación, los daños motivados por la fuerza sísmica tendrán una probabilidad mayor de ser catastróficos y resultar en colapsos seguros o inhabilidad para la estructura de mantenerse en funcionamiento y

cumplir con el propósito para el cual fue diseñada y construida.

A modo general, a la hora de realizar la evaluación de la vulnerabilidad, se deben revisar aspectos que debieron ser establecidos durante el proceso de diseño, tales como: la configuración geométrica, lo cual incluye analizar problemas con la configuración en planta, verificar si es regular o irregular, si los espacios están bien distribuidos y si la ubicación de los miembros rígidos es la adecuada, si existe concentración de esfuerzos en puntos clave, si la configuración en elevación es apta para resistir fuerzas inducidas por sismos, etc.; además debe considerarse la configuración estructural, la distribución y funcionalidad de columnas y vigas, diafragmas y elementos de disipación de esfuerzos, la flexibilidad de estos mismos elementos, la susceptibilidad a la torsión, flexión, corte, etc.

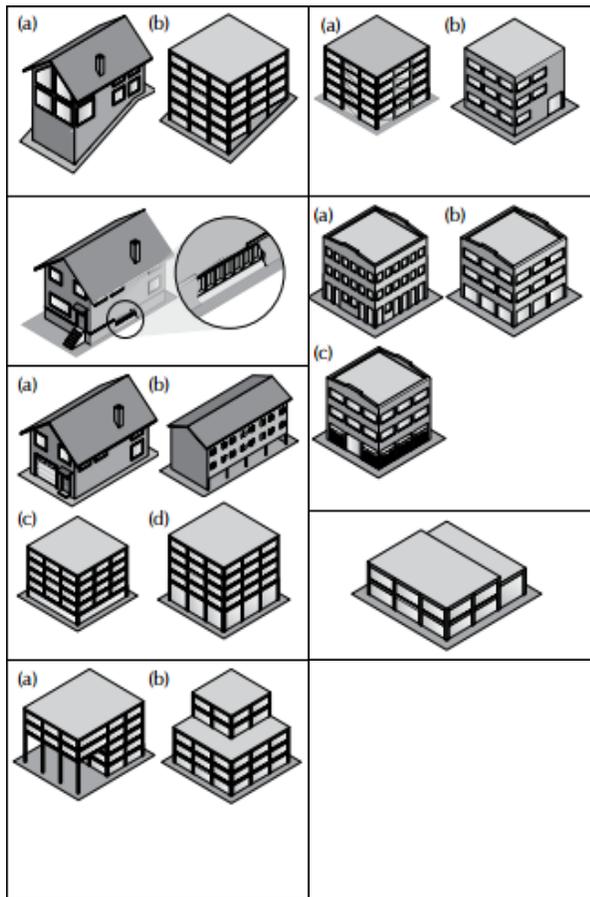


Figura 7.0. Tipos de irregularidad vertical en edificaciones a considerar al realizar evaluaciones de vulnerabilidad sísmica. Fuente: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A handbook.

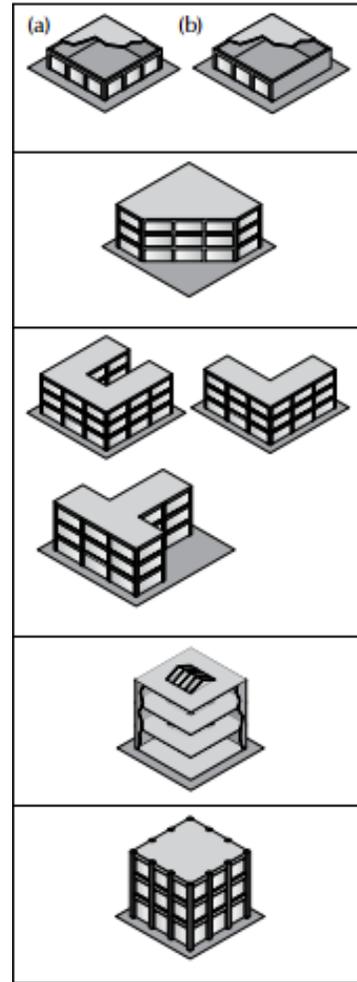


Figura 8.0. Tipos de irregularidad en planta en edificaciones a considerar al realizar evaluaciones de vulnerabilidad sísmica. Fuente: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A handbook.

Las observaciones no necesariamente deben ser exhaustivas, a menos de que sea ese el objetivo del análisis de vulnerabilidad. No se recomienda un escrutinio profundo en estudios de magnitud extensa, es decir, que busquen determinar la vulnerabilidad para toda una región geográfica y no solo de un edificio puntual, esto porque los recursos económicos y el tiempo invertido deben optimizarse al máximo. Por otro lado, si el estudio de vulnerabilidad es para una edificación de índole y uso especial, entonces la revisión debe ser más intensa de lo que sería para un grupo o grupos de estructuras.

Daños en edificaciones

El propósito último de las evaluaciones de vulnerabilidad es predecir los daños que sufrirán las estructuras debido a los terremotos. Cuando se estudia la vulnerabilidad realmente se busca tener un indicador de la fragilidad de las edificaciones.

El daño va directamente relacionado a la vulnerabilidad, ya que en función de la vulnerabilidad y la amenaza sísmica está el daño. La palabra daño es ampliamente utilizada para describir una gran gama de distintos fenómenos que puedan ser ocasionados por los efectos de las sacudidas sísmicas, principalmente aquellas ligadas al deterioro físico.

En edificaciones, el daño es un fenómeno problemático, ya que es difícil de modelar en plataformas de software o reproducir a través de pruebas de laboratorio. No obstante, es posible clasificar el daño en ciertos grupos para organizar y simplificar su comprensión. En términos generales, para el daño sufrido por los edificios ante terremotos, es posible reconocer tres grupos principales, que en cierta medida mantienen una relación de analogía con los tipos de vulnerabilidad ya mencionados anteriormente. A grandes rasgos, los tipos de daño reconocidos son: el daño estructural, el daño no estructural, y el daño económico.

El daño estructural es el más determinante, ya que puede ocasionar el colapso de una estructura, y también es el que normalmente va a requerir una inversión monetaria mayor para asumir las reparaciones (aunque en edificaciones como hospitales o clínicas el costo de equipos dañados puede ser más elevado que el de los daños en miembros sísmo-resistentes de la estructura).

El daño estructural depende del comportamiento de los miembros que deben responder a las sollicitaciones de carga, vigas, columnas, muros de carga, etc. La gravedad del daño estructural sufrido después de un sismo es, claramente, una función dependiente de la vulnerabilidad estructural, por lo que las consideraciones apuntadas en secciones anteriores aplican, siendo que el daño será mayor en edificios con materiales de baja calidad, tipos de sistema resistente inadecuados,

configuraciones arquitectónicas establecidas sin considerar algún criterio técnico sobre comportamiento sísmico, y demás.

El daño no estructural es aquel que no compromete el funcionamiento de la estructura, pero de todas maneras puede poner en peligro la integridad de quienes estén en el interior de la misma, ya que se refiere a los perjuicios padecidos por los elementos complementarios, como ventanales, divisiones livianas, revestimientos, puertas, etc. Además de representar un peligro potencial para ocupantes, el daño no estructural también tiene un impacto económico, ya que los acabados de una construcción generalmente tienen un costo elevado sobre el total del proyecto, porcentualmente hablando. Este tipo de daño se puede evaluar en los edificios mediante las deformaciones absolutas, las grietas, las derivas relativas, y también rasgos notables a simple vista.

El daño económico no es un parámetro aparte de los anteriores, sino que es simplemente el daño general sufrido por una estructura (es decir, tanto estructural como no estructural) expuesto desde una perspectiva financiera, al hacer una suma ponderada de todos los costos parciales de reparación que refleje las repercusiones monetarias de un determinado sismo. La forma de reducirlo es por supuesto mediante el diseño de edificaciones con buenos criterios anti-sísmicos, para proyectos nuevos, o la toma de medidas para la mitigación de la vulnerabilidad en edificaciones existentes.

Cuantificar los daños a raíz de un terremoto no es una tarea sencilla. Una forma aceptable para poder determinar el deterioro es mediante la aplicación del concepto del índice de daño, en el cual se aplica un indicador para normalizar las características de la destrucción sufrida por los miembros de la edificación hasta que dicho indicador alcanza un valor de uno, en cuyo caso el miembro —o miembros— evaluado se considera como fallado. Sin embargo, la cuantificación de las características necesarias para definir el daño sigue siendo un proceso complejo, razón por la cual no existe de momento un criterio universal para la definición del daño.

Metodología

Selección de la zona de estudio

Después de definir los conceptos generales implicados en el desarrollo de este estudio y tener un marco referencial apropiado, el paso siguiente es describir el área a la cual está dirigida esta investigación referente a vulnerabilidad sísmica, justificando el porqué de su escogencia y aplicando las consideraciones expuestas con antelación a la región en cuestión, de una forma más desarrollada y específica para lograr los objetivos deseados en este análisis de las amenazas geológicas y la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del cantón de Pérez Zeledón.

A lo largo de la historia, el territorio que hoy en día se conoce como Costa Rica se ha visto afectado por una enorme cantidad de eventos sísmológicos, tanto destructivos como inofensivos, y esto se debe principalmente a que el territorio costarricense es de una edad relativa sumamente baja en comparación con las demás zonas geográficas del planeta, siendo que apenas hace unos ciento cincuenta millones de años el mismo no existía. Su origen es reciente, y su constante evolución se encuentra sujeta a la del orógeno sur centroamericano, principalmente a la actividad tectónica que tiene lugar entre las placas Cocos y Caribe, en donde la primera se halla en proceso de subducción bajo la segunda y la micro-placa de Panamá. Además la zona sur es de especial consideración dentro del territorio, ya que es afectada también por la placa de Nazca, lo cual contribuye a que esta sección del país posea una alta sismicidad.

La interacción entre las placas tectónicas brinda una explicación factible sobre el origen y la evolución geológica del territorio costarricense y, plantea además, las bases para comprender el porqué de la alta peligrosidad sísmica con que cuenta el país, así como la vulnerabilidad frente a sucesos tectónicos, sísmicos y volcánicos; pues

como se mencionó antes, la principal causa de los temblores y terremotos es la tectónica continental. Esa misma interacción explica también la existencia de un vasto y complejo sistema de fallas locales que va de extremo a extremo en el país, y que ha originado importantes sacudidas y enjambres sísmicos a través del tiempo, producto de la liberación de la energía elástica que, siguiendo el proceso continuo de desplazamiento entre bordes adyacentes, se ha acumulado en ellas.

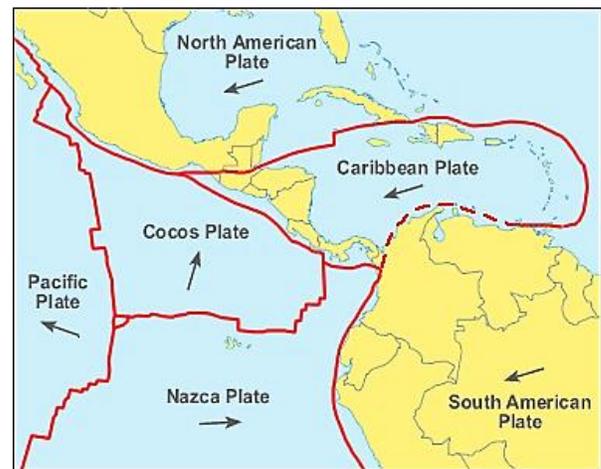


Figura 9.0. Configuración tectónica responsable por la alta sismicidad en Costa Rica.
Fuente: Google imágenes.

En Costa Rica no se cuenta con registro alguno de sismos asociados a pérdidas humanas o de importancia económica elevada antes del siglo XVII, sino que más bien, aunque es un hecho que ocurrieron temblores en épocas previas, se tiene una alta certeza de que en términos de los daños ocasionados por cataclismos de tipo sísmológico, el país fue afortunado, ya que no albergó una sacudida lo bastante fuerte como para perjudicar el curso de las actividades humanas en esos años. Sin embargo, para períodos incluidos dentro de la primera mitad del siglo XVII y en adelante, según documentación recopilada en González Víquez (1994), sí se presentaron terremotos con perjuicios

atribuidos, ya que en información de los años 1638 y 1640 se da constancia de reparaciones hechas en iglesias indígenas y de la provincia de Cartago a razón de reparar el daño causado por sismos ocurridos en algún punto previo a esas fechas. También se mencionan, posteriormente, terremotos causados por una fuerte erupción volcánica acontecida en el volcán Irazú, en 1723, y se especifica que la actividad sísmica no cesó sino hasta transcurrido el lapso entre Septiembre de 1723 y Febrero de 1724. Más eventos sísmicos fueron registrados en nuestro país durante los años previos a la implementación de instrumentos para medir las propiedades de las sacudidas de terreno originadas, ya sea por el proceso de subducción (actividad interplaca), o bien, por el fenómeno local de fallamiento superficial (actividad intraplaca); y los mismos fueron inventariados principalmente por medio del criterio de aquellos que los percibieron, por lo que se desconocen parámetros como la magnitud, la intensidad, la ubicación de epicentro y la profundidad del hipocentro, así como las características físicas del subsuelo y la topografía de los sitios de origen. No obstante, los registros tomados permiten tener una noción sobre las consecuencias de los desastres, los cuales incluyeron daños de diversos tipos y gravedad a viviendas; también daños a edificaciones comunes o de tránsito público; la pérdida de vidas humanas, etc.

Tras la llegada del siglo XX la época de pre-instrumentalización de registros sísmicos llegó a su fin, comenzando en 1904 el período instrumentado. Finalmente, la época pre-instrumentalización está definida entre los años 1638 y 1903, mientras que la época instrumentada va desde 1904 hasta 1988.

A partir de 1904 recolectar y organizar la información relacionada con la sismicidad en el territorio costarricense se volvió un proceso más efectivo, y los resultados recopilados se volvieron también más exactos y útiles, al ser posible describir las propiedades de los eventos sísmológicos individuales y no solo las repercusiones de estos en las construcciones humanas, lo cual no brindaba datos de peso sobre la fuente de los fenómenos, sino solamente sobre sus consecuencias. Y con el progreso del tiempo y la tecnología la información adquirida ha avanzado hasta ser sumamente concisa y detallada, en un proceso minucioso de obtención de datos que se basa en el monitoreo continuo y en tiempo real de puntos clave del país.

Actualmente, en Costa Rica, la Red Sismológica Nacional está compuesta por cuarenta y siete estaciones que registran y transmiten los datos al laboratorio de sismología de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR); mientras que el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) cuenta con ciento cuatro estaciones acelerográficas activas, instaladas a lo largo del país. Todo esto, en conjunto con a las actividades de otras instituciones como el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), permite un seguimiento eficiente de los fenómenos asociados a la sismicidad de la región.

A continuación se muestra, en el cuadro 4.0., una lista con los sismos de mayor importancia, intensidad y magnitud, registrados a lo largo de la historia dentro de los límites del país.

CUADRO 4.0. SISMOS HISTÓRICOS REGISTRADOS EN COSTA RICA, Y SUS EFECTOS.

Año	Fecha	Región epicentral	Magnitud	Efectos
1756	14-Jul	NO UBICADA	-	Sentido con gran duración en Cartago
1798	21-Feb	NO UBICADA	-	Fuerte oleaje y muchos sismos sentidos en Barra de Matina.
1803	27-Dic	NO UBICADA	-	Iglesia de Boruca arruinada, daños en Cartago
1821	10-Abr	NO UBICADA	-	Tsunami y licuefacción en Barra de Matina, daños en Cartago y San José
1822	07-May	Litoral Atlántico	-	Tsunami y licuefacción en Barra de Matina, daños en Cartago y San José
1827	03-Abr	Guanacaste	-	Iglesia de Nicoya arruinada
1841	02-Sept	Cartago	-	Primera destrucción de Cartago, 38 muertos
1842	21-Mar	Sur de San José	-	Daños en Alajuelita y otras poblaciones de San José
1851	18-Mar	Norte de Alajuela y Heredia	-	Daños en Alajuela, Heredia y San José
1853	24-Ago	Cañas, Guanacaste	-	Daños en Cañas, deslizamientos en la Cordillera de Guanacaste
1853	08-Sept	Guanacaste	-	Daños en Santa Cruz y Filadelfia
1882	03-Mar	NO UBICADA	-	Sentido en todo el país, daños en el Valle Central y Puntarenas
1888	30-Dic	Fraijanes, Alajuela	-	Destrucción en Fraijanes, daños en Alajuela, Heredia y San José, deslizamientos en las laderas del Volcán Poás, 6 muertos
1904	20-Dic	NO UBICADA	7.8	Área cubierta se extendió más allá de los límites del país, aparentemente más fuerte en el Litoral Atlántico
1905	20-Ene	Pacífico Central	-	Sentido desde Nicaragua hasta Panamá, daños al sur de Puntarenas y en el Valle Central
1910	13-Abr	Sur Este de San José. (Tablazo)	-	Daños en San José
1910	04-May	Cartago	-	Segunda destrucción de Cartago, entre 400 y 700 muertos
1911	10-Oct	Guatuso, Alajuela	-	Deslizamientos y grietas en el suelo en zona epicentral
1912	12-Feb	Tres Ríos	-	Daños en Tres Ríos
1912	06-Jun	Sarchí, Toro Amarillo	-	Daños en la zona de Sarchí y Toro Amarillo, deslizamientos, avalanchas, 7 muertos
1916	27-Feb	Noroeste de Costa Rica	7.6	Daños en Santa Cruz
1916	24-Abr	Litoral Atlántico	7.6	Daños menores en el Valle Central

1916	26-Abr	Litoral Atlántico	7.3	Pánico en el Valle Central
1924	04-Mar	Orotina	7.0	Daños en toda la región occidental del Valle Central, más de 70 muertos
1935	01-Ago	Bagaces, Guanacaste	-	Daños en Bagaces
1939	18-Jun	NO UBICADA	6.5	Daños en el Valle Central
1939	21-Dic	Entrada al Golfo de Nicoya	7.3	Daños en el Valle Central, 2 muertos
1939	22-Dic	Entrada al Golfo de Nicoya	6.8	Réplica del anterior
1941	05-Dic	Península de Osa	7.5	Daños en la frontera con Panamá y en el Valle Central
1948	19-Nov	Región Central	7.0	Daños leves en el Valle Central
1950	05-Oct	Península de Nicoya	7.7	Daños en Puntarenas y Valle Central
1951	22-Ago	Sur de Cartago	-	Destrucción en Paraíso y Orosi, daños en San José
1952	13-May	Oeste del Valle Central	6.9	-
1952	30-Dic	Noroeste del Volcán Irazú	-	Deslizamientos en las faldas del Volcán Irazú, 21 muertos
1953	07-Ene	Limón	-	Daños en Limón
1955	01-Sept	Toro Amarillo - Zarcero	-	Daños en Toro Amarillo y Norte de Alajuela, 10 muertos
1956	19-Jul	Valle Central	6.2	Intensidad VI en el Valle Central
1959	13-Ene	Pacífico Central	-	Intensidad VI en el Sector Este del Valle Central
1962	12-Mar	Pacífico Sur	6.8	Intensidad V en Golfito y Coto 47
1966	09-Abr	Pacífico Central	5.7	Intensidad VI en San Isidro del General
1973	14-Abr	Tilarán	6.5	Daños en Tilarán, deslizamientos, 23 muertos
1978	22-Ago	Sámara	7.0	Intensidad IV en el Valle Central
1978	23-Ago	Sámara	7.0	Réplica del anterior
1979	01-Jul	Punta Burica	6.5	Intensidad VI en Paso Canoas
1983	02-Abr	Golfito	7.3	Daños en Golfito, Zona Sur y Valle Central, 1 muerto
1983	03-Jul	Pérez Zeledón	6.1	Daños al Norte de San Isidro del General, deslizamientos, 1 muerto
1989	26-Feb	Los Santos	4.7	Daños y deslizamientos en Acosta, San José
1990	25-Mar	Entrada al Golfo de Nicoya	7.0	Daños en Península de Nicoya, Puntarenas y Valle Central, 1 muerto
1990	May-Jun	Puriscal	4.5/5.0	Enjambre sísmico en la zona de Puriscal. Daños en Puriscal, deslizamientos en Fila de Picagres
1990	22-Dic	Puriscal	5.7	Daños en el Valle Central, especialmente en el sector oeste (Alajuela, La Guácima,

				Atenas, Ciudad Colón, Turrucare, Puriscal), 1 muerto
1991	22-Abr	Limón	7.5	Daños en todo el litoral atlántico, desde Bocas del Toro. Panamá, hasta Batán y Turrialba, deslizamientos en la Cordillera de Talamanca, daños menores en el Valle Central, 50 muertos
1991	08-Ago	Los Santos	4.9	Daños en Frailes de Desamparados, San Pablo de León Cortés y Corralillo de Cartago
1992	06-Mar	1.5 km Sur Este de Naranjo	6.0	Daños en la zona epicentral
1993	10-Jul	12 km Sur de Turrialba	5.0	Daños en la zona epicentral y Turrialba
2009	08-Ene	1 km Sur de Cinchona, Alajuela	6.2	27 muertos, cambios topográficos en Cinchona e isla Bonitade, 90% de destrucción en casas, escuelas, etc.
2012	05-Set	24 km al sur-suroeste de Sámara, frente a la Península de Nicoya	7.6	Daños en Nicoya, Santa Cruz, Nandayure y Sámara. En Puntarenas se reportaron daños en el hospital y la municipalidad. En Grecia y Naranjo también hubo daños importantes.

Fuente: Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI); realizado en Microsoft Excel 2013.

Como se anotó anteriormente, la zona sur del país es una de alta sismicidad debido al punto en el que convergen las placas Cocos, Caribe y la microplaca de Panamá, así como la región al sureste del estado que se conoce como punto triple, donde las placas de principal influencia sobre el territorio se encuentran con la placa de Nazca.

Consecuencias a la alta sismicidad de la región sur del país son apreciables en el registro parcial de los terremotos históricos, en donde se puede apreciar que, por ejemplo, en 1941 la península de Osa fue afectada por un sismo de $M_s = 7.5$; en 1962 en el pacífico sur ocurrió un evento de $M_s = 6.8$; y en 1983 fue el cantón de Pérez Zeledón el que sufrió por los efectos de una sacudida de $M_s = 6.1$, acontecimiento en el cual una persona resultó fallecida.

Se puede decir que la zona sur de Costa Rica en general, así como el cantón de Pérez Zeledón a nivel puntual, están bajo una alta amenaza sísmica, ya que los procesos tectónicos de las placas litosféricas y los deslizamientos entre bloques adyacentes que se desplazan sobre planos de falla, son fenómenos que no pueden, al menos actualmente, ser controlados; y si en el pasado se han producido liberaciones de energía elástica en

eventos locales o intraplaca, nada garantiza que este no sea el caso en años por venir.

Es por este motivo que se considera de interés prioritario el evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del cantón de Pérez Zeledón, ya que a partir de los resultados obtenidos se pueden satisfacer necesidades relacionadas con esta temática, como por ejemplo la toma de decisiones para la prevención de daños y la atenuación de los impactos negativos en las estructuras, así como la elaboración de planes de contingencia para enfrentar un evento sísmico de proporciones destructivas. Todo esto contando con fundamentos teórico-práctico para contribuir a la formación de un criterio que garantice seguir el proceso más eficaz para el desarrollo e implementación de soluciones ante emergencias y condiciones de vulnerabilidad.

Pérez Zeledón es el cantón número diecinueve de los veinte con conforman a la provincia de San José, Costa Rica. Pérez Zeledón se encuentra ubicado en la región Brunca, al sur del país y su distrito principal es el de San Isidro del General, que cuenta con la ciudad referencial y con la mayor concentración demográfica del cantón.



Figura 10.0. Ubicación del cantón de Pérez Zeledón en Costa Rica.
Fuente: Google imágenes.



Figura 11.0. Segregación territorial del cantón de Pérez Zeledón; distritos del cantón.
Fuente: Google imágenes.

Como consecuencia de lo anterior, el área fundamental para realizar el estudio de la vulnerabilidad sísmica de la región es la comprendida por el distrito de San Isidro de El General, aunque también se incluye el territorio perteneciente al distrito de Daniel Flores. Las razones consideradas para enfocarse en esta región son varias, destacándose entre estas la concentración de habitantes, así como el grado de desarrollo urbano de la zona.

Según los datos recolectados por Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el año

2011, los distritos de San Isidro y Daniel Flores son los que se cuentan con mayor población dentro del cantón, así como los que poseen mayor cantidad de habitantes en territorio urbanizado, siendo que en los demás distritos no hay gran número de personas, y el desarrollo urbano es escaso, tal como se muestra en el cuadro 5.0 a continuación.

CUADRO 5.0. POBLACIÓN TOTAL DEL CANTÓN DE PÉREZ ZELEDÓN									
Distrito	Población en área urbana			Población en área rural			Población total		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
San Isidro de El General	33820	15747	18073	11507	5611	5896	45327	21358	23969
El General	-	-	-	6373	3137	3236	6373	3137	3236
Daniel Flores	28693	13755	14938	4844	2393	2451	33537	16148	17389
Rivas	-	-	-	6591	3306	3285	6591	3306	3285
San Pedro	-	-	-	9102	4487	4615	9102	4487	4615
Platanares	-	-	-	7203	3665	3538	7203	3665	3538
Pejibaye	1053	520	533	6942	3518	3424	7995	4038	3957
Cajón	1689	796	893	6853	3433	3420	8542	4229	4313
Barú	-	-	-	2393	1212	1181	2393	1212	1181
Río Nuevo	-	-	-	3061	1574	1487	3061	1574	1487
Páramo	-	-	-	4410	2235	2175	4410	2235	2175
TOTAL	65255	30818	34437	69279	34571	34708	134534	65389	69145

Fuente: INEC; realizado en Microsoft Excel 2013.

El que en San Isidro se concentre el más alto número de individuos de la región, así como las obras de infraestructura e ingeniería más importantes de la zona, significa que en caso de que ocurra un terremoto de magnitudes catastróficas la mayor cantidad de pérdidas, tanto humanas como económicas tendrán lugar en este distrito, el cual es un punto clave para el desarrollo de este sector del país. Se puede apreciar además, que más de un cincuenta por ciento de los distritos no cuentan con áreas urbanizadas en la cual residan sus habitantes, por lo que se justifica el enfocarse en la zona que tendrá más peso y significancia en caso de una sacudida de terreno; esto porque la vulnerabilidad sísmica evalúa aspectos tanto estructurales como de repercusiones financieras, como se mencionó en secciones anteriores.

Siguiendo ese mismo razonamiento, entre San Isidro de El General y Daniel Flores se distribuyen la mayoría de viviendas del cantón (alrededor de setenta viviendas por kilómetro cuadrado

para San Isidro y ciento cincuenta y cinco para Daniel Flores, que posee menor área superficial), lo cual es un indicador directo de su relevancia en investigaciones sobre temas como la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y los impactos de posibles amenazas naturales, siendo que el daño potencial como consecuencia de un sismo (a nivel de vivienda e infraestructura) no representa un valor determinante en las zonas rurales cuando este entra en comparación con el que se puede manifestar en los sitios donde se concentra la mayor densidad poblacional. Sin embargo, a pesar de este un hecho, no se pretende inducir a pensar que las zonas rurales no merecen o califican para la realización de un estudio de vulnerabilidad o de riesgo sísmico, sino que ante limitantes de tiempo y recursos a disposición, es preferible enfocarse en un área más representativa de la región completa, cuya realidad ante la ocurrencia de un sismo definiría la estabilidad o no estabilidad del sistema socioeconómico de todo el cantón.

Se determina de esta manera, que con el fin de alcanzar los objetivos antepuestos al proyecto, el

área a considerar para realizar el estudio de vulnerabilidad sísmica es principalmente la correspondiente al distrito de San Isidro de El general.

CUADRO 6.0. DISTRIBUCIÓN DE TERRITORIO, VIVIENDA Y POBLACIÓN EN EL CANTÓN DE PÉREZ ZELEDÓN.						
Cantón	Distrito	Territorio (km²)	Viviendas	Ocupantes	Vivienda/km²	Habitantes/km²
PÉREZ ZELEDÓN	San Isidro de El General	196,89	13499	45327	68,56	230,21
	El General	78,90	1809	6373	22,93	80,77
	Daniel Flores	62,11	9596	33537	154,50	539,96
	Rivas	307,85	1829	6591	5,94	21,41
	San Pedro	209,31	2521	9102	12,04	43,49
	Platanares	90,13	1971	7203	21,87	79,92
	Pejibaye	206,10	2222	7995	10,78	38,79
	Cajón	118,15	2354	8542	19,92	72,30
	Barú	189,08	734	2393	3,88	12,66
	Río Nuevo	240,10	794	3061	3,31	12,75
Páramo	206,89	1203	4410	5,81	21,32	
TOTALES		1905,51	38532	134534	20,22	70,60

Fuente: INEC; realizado en Microsoft Excel 2013.

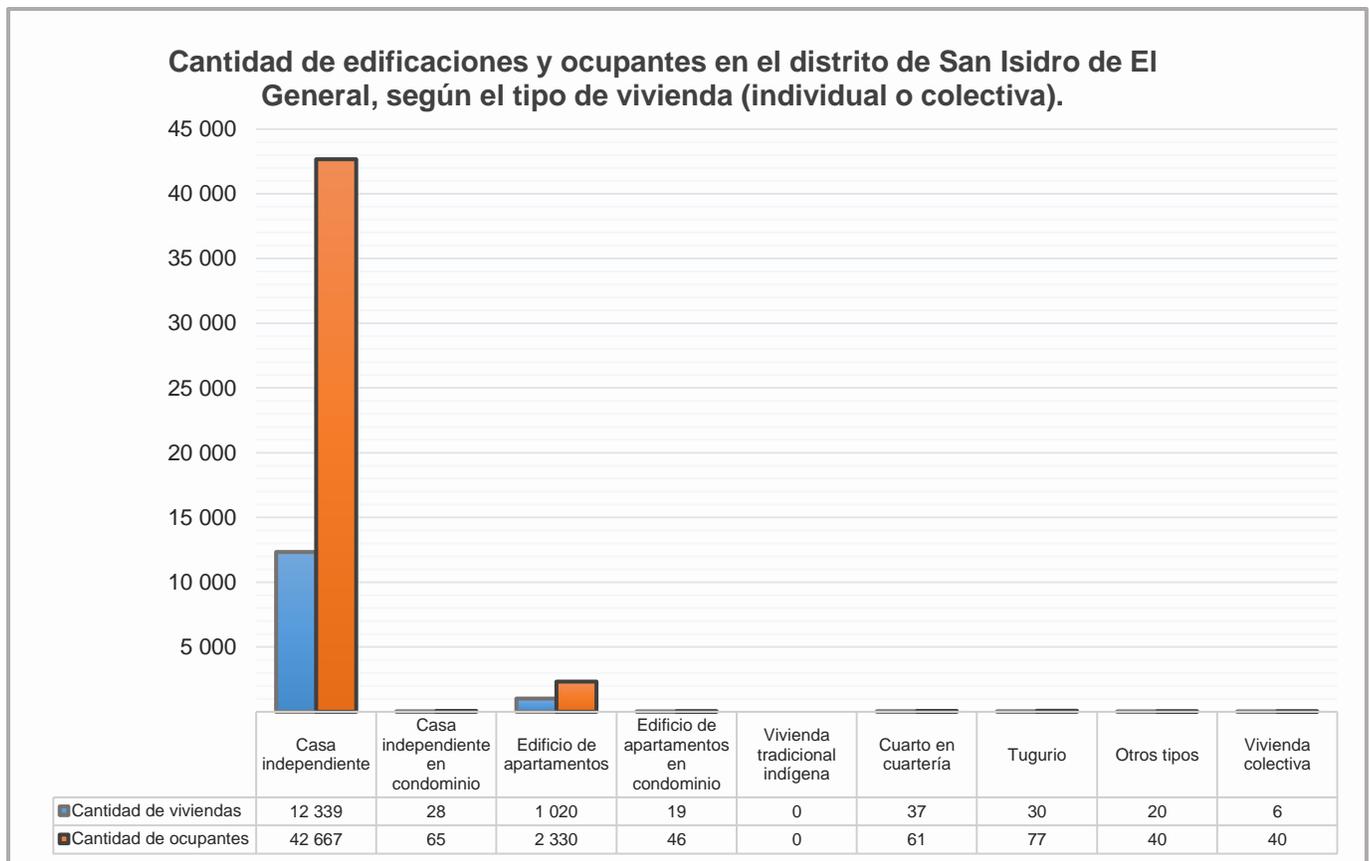


Gráfico 1.0. Número de viviendas y habitantes en el distrito de San Isidro de El General
Fuente: INEC; realizado en Microsoft Excel 2013.

Tectónica y sismicidad

Con la zona de estudio definida y caracterizada superficialmente, se procede en este apartado a profundizar en las características geofísicas del territorio para el cual se desarrolla este proyecto, partiendo de una visión amplia que nos permita comprender lo relacionado con la tectónica regional (Costa Rica) hasta poder alcanzar, seguidamente, un enfoque más puntual, dirigido hacia el entendimiento de la estructuración geológica del área local (Pérez Zeledón) y su actividad sísmica, con el propósito de exponer la información requerida para poder analizar el comportamiento natural de esta zona y aportar los datos necesarios para, consecuentemente, calcular la amenaza sísmica.

Marco tectónico regional

Al definir la zona de estudio, se describió, preliminarmente, el proceso mediante el cual nuestra región fue originada, mismo por el que evoluciona geológicamente hablando, y por el que es anfitriona de una enorme cantidad de eventos sísmológicos, debido al enorme potencial que tiene para la generación de actividad de este tipo.

El proceso mencionado es el de subducción, el cual es el fenómeno tectónico responsable directa e indirectamente del mayor porcentaje de actividad sísmica que afecta a nuestro país, tanto en referencia a eventos de baja intensidad como de carácter catastrófico, y por lo tanto es un tema que es necesario esclarecer en una extensión razonable, para poder estar en capacidad de analizar el porqué de la alta sismicidad histórica y reciente del país.

La subducción es el proceso mediante el cual un sector de la corteza oceánica, independiente pero yacente sobre una placa litosférica, se induce bajo otra placa perteneciente a la litósfera pero que funge como elemento continental y no oceánico. Ambas placas comienzan a deslizarse, una respecto a la otra, se separan y se aproximan como consecuencia de las corrientes que se forman en la zona de subducción, en las cuales se ve envuelto en fenómeno de convección siendo que el fluido que se está “introduciendo” desde la corteza oceánica hasta “debajo” de la placa continental posee una temperatura distinta a la del material rocoso que ahí reside. Este proceso, desde la perspectiva de la tectónica de placas, genera la fusión de la corteza en el punto en que se encuentran los bordes adyacentes que se ven envueltos en el mecanismo entre placas y que son afectados por este, mismos bordes que reciben el nombre de “bordes destructivos” por esta razón precisamente. Aun así, la fusión de la corteza no es igual en cada caso de subducción, o incluso en cada sector de un mismo caso, ya que depende, claramente, de ciertas variables, de entre las que se destaca el ángulo de incidencia con el que la placa que se subduce penetra bajo la otra. No obstante, en cualquier escenario, los procesos envueltos son los mismos aunque el tiempo de fundición y los productos generados a partir de la subducción puedan variar en presencia y/o cantidad.

En general, en las zonas de profundidad media, la fricción entre placas es lo que provoca la fusión de los materiales que se hallan por encima de aquella que se subduce, y debido a la diferencia de temperaturas entre ambas secciones, la corteza oceánica hidratada e incidente tiende a fundirse, evento que sucede a temperaturas relativamente bajas, lo cual desencadena la formación de magmas a poca profundidad, así como la aparición de cadenas volcánicas en las proximidades de las áreas de subducción; para áreas en profundidades mayores, la placa que se subduce termina por fundirse del todo, con lo cual termina por generar un efecto de arrastre que contribuye al deslizamiento de las placas. Además, debido a esta colisión “abrupta” entre las placas tectónicas, se producen fosas oceánicas extensas, que son depresiones hondas y perceptibles en la superficie oceánica, causadas por el deslizamiento de una placa debajo de la otra, y que se localizan justo sobre la zona de subducción.

Los procesos metamórficos, igualmente, se ven influenciados por la esta dinámica entre

placas litosféricas, ya que las condiciones variantes de temperatura y presión condicionan y en muchas ocasiones favorecen estos procesos a nivel regional.

Asimismo, al fenómeno de subducción se le atribuyen eventos sísmicos con potencial de alcanzar magnitudes grandes (superiores a 6.9 en la escala Richter) e intensidades destructivas, siendo estos sismos generados por actividad interplaca. Los movimientos sísmicos causados por este proceso se deben principalmente a la liberación de energía acumulada por la constante aplicación de esfuerzos de tensión, congruentes con la sucesión y el curso evolutivo de la subducción entre placas. Los terremotos que ocurren no obedecen a un punto específico de profundidad para el hipocentro, o siquiera un rango limitado y único. Más bien, los terremotos pueden situarse a casi cualquier profundidad sobre el plano de Benioff, concepto del plano de fricción sobre el cual una de las placas se desliza (subduce) debajo de la otra. Así, es posible clasificar los sismos ocurridos en zonas de subducción según la profundidad a la que ocurren, la cual está estrechamente relacionada con la razón de origen de los mismos.

Los sismos cuyo hipocentro se ubica a poca profundidad encuentran su origen entrelazado al del inicio de la subducción, y se dan por la disminución de la tensión que se produce cuando la placa litosférica que se subduce se curva; los sismos cuya fuente se halla a profundidad media están directamente vinculados con la liberación de tensiones acumuladas por motivo de la fricción entre las placas; y finalmente, aquellos sismos que se consideran profundos, se atribuyen al proceso de contracción que se dispara como respuesta a la rápida aparición de estructuras cristalinas compactas en dichas regiones de elevada temperatura y enorme presión.

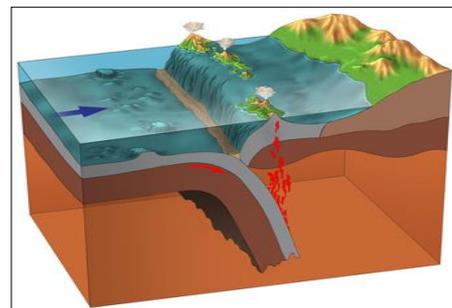


Figura 12.0. Representación gráfica del proceso de subducción.

Fuente: Google imágenes.

Costa Rica está ubicada dentro de los límites tectónicos establecidos por las placas del Caribe, de Cocos, y de Nazca; y parte de su territorio se encuentra sobre la micro-placa de Panamá, que es realmente el resultado de una fracturación en la placa Caribe, en su extremo suroeste, causado por las condiciones de esfuerzos tectónicos presentes.

Cada uno de los grandes bloques de material rocoso (placas litosféricas) son los que controlan en mayor o menor medida el comportamiento geofísico de la zona, ya sea mediante actividad directa de sus colisiones (interplaca) o mediante actividad indirecta, a través de la estimulación de puntos internos de la región geográfica como consecuencia de sus colisiones (intraplaca); es decir, influyendo sobre los planos de desplazamiento entre bloques y contribuyendo así a la generación de esfuerzos por fricción, la acumulación de energía y la posterior fracturación de las rocas internas, aportando así a la ocurrencia de sismos por fallamiento local.

En Centroamérica, y por consiguiente en Costa Rica, la sismicidad está controlada principalmente por las placas de Cocos y Caribe, las cuales interactúan continuamente y protagonizan, para nuestra región, el proceso antes descrito como subducción. En nuestro marco tectónico, las placas litosféricas colisionan a lo largo de la Fosa Mesoamericana, con velocidades variables que pueden ir desde los 70 mm anuales frente al territorio guatemalteco, hasta poco más de 90 mm en el extremo sur del territorio costarricense, en la península de Osa (Protti, Güendell, Malavassi, 2001). Esto genera, a lo largo del borde de las placas, la mayor parte de la actividad sísmológica que afectan a Costa Rica, tanto respecto a los temblores y terremotos superficiales como a aquellos ocurridos a profundidad. "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 Cocos y Caribe, dando lugar a complejos sistemas de fallas al interior del país" (Climent et al., 2003).

Montero (como se citó en Climent, Rojas, Alvarado, Benito, 2008) afirma que el país se puede dividir en dos provincias sísmo-tectónicas: la noroeste, que se encuentra localizada dentro de la placa Caribe; y la sureste, que se ubica dentro de la micro-placa de Panamá. La frontera tectónica entre ambas placas, es decir, el límite en que convergen el bloque de Panamá y la placa del Caribe,

es un margen que pasa por la región caribe del país y que se denomina Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP; sistema asociado a la ocurrencia del sismo de Limón en 1991); para luego atravesar la región central y norte de nuestra nación. Ambos cinturones de fallas son fuente de sismos superficiales, que pueden resultar destructivos cuando se alcanzan magnitudes mayores a $M_s = 5.0$.

Hacia el noroeste, el contacto entre el bloque de Panamá y la placa del Caribe consiste en una zona difusa de fallamiento de corrimiento lateral izquierdo, que corre desde Limón hasta la Fosa Mesoamericana a través de la parte central de Costa Rica... Al sur de la Península de Burica se encuentra la zona de fracturas de Panamá. Este sistema de fallas de corrimiento lateral derecho constituye el límite entre las placas de Cocos y de Nazca. Al oeste de la zona de fracturas de Panamá se encuentra la cordillera submarina de Cocos la cual se subduce bajo la Península de Osa. La cordillera o dorsal asimétrica de Cocos, es la traza o cicatriz formada en la placa de Cocos como resultado de su paso sobre el punto caliente de las islas Galápagos. (Protti et al., 2001, p.27-29)

Al sureste del país, la subducción de la placa de Cocos culmina en el punto llamado punto triple, el cual recibe su nombre debido a que es un lugar en el cual las placas de Nazca, del Caribe y de Cocos interactúan, aunque la sección del caribe corresponde realmente a la micro-placa de Panamá. Siguiendo sobre esa línea se encuentra el límite entre las placas de Cocos y Nazca, al cual se le conoce como Zona de Fractura de Panamá (ZFP), y es una región ubicada en la costa pacífica (sistema responsable por terremotos como el de Burica en 2002, y el de puerto Armuelles en 2003), que según Fernández (1996) está compuesta por fallas transcurrentes que tienen orientación N-S.

Las peculiaridades en la configuración del sistema conformado por las estructuras litosféricas que definen la actividad tectónica de la nación, representan la existencia de diversas tendencias en cuanto al comportamiento de las zona diferenciables dentro del sistema mismo, que, como se ha establecido a través de evidencias geológicas, son dos grandes bloques: el bloque norte y el sur. Este conocimiento permite el renombramiento del sistema de fallas que atraviesa el centro de nuestro

país, el cual según Montero (2001) debe ser identificado como Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR), y divide al país en dos sectores con sismicidades y características distintas si se estudian como regímenes separados.

Estas peculiaridades también se extienden al tipo de topografía encontrada en la parte norte y la parte sur, que últimamente, termina siendo producto de la dinámica continental. La parte sur de nuestro país es un sistema montañoso submarino, conocido como Cresta de Cocos, que se sumerge bajo la placa del Caribe. Como repercusión a este hecho, es observable que al moverse en sentido Norte-Sur dentro de los límites del territorio costarricense, desde la Península de Nicoya hacia la Península de Osa, la Fosa Mesoamericana pierde profundidad conforme se avanza, lo cual se traduce en un situación particular para la placa de Cocos, ya que debido a esto su ángulo de inclinación es más alto bajo la zona norte del país, y menor bajo la zona sur; el ángulo de inclinación decrece entre menor es la profundidad.

Una particularidad más que merece ser mencionada debido a su relación con aspectos sísmológicos, es la existencia de montículos en la

placa de Cocos. La placa posee rugosidades que repercutirán en el comportamiento geológico de la región más adelante. Al presentar un movimiento continuo de subducción bajo la placa del Caribe los montículos que están esparcidos en toda su extensión irán introduciéndose bajo el territorio comprendido por Costa Rica y sus alrededores; y con esto, eventualmente, estas rugosidades y discontinuidades formarán atascamientos, retrasando el proceso normal de subducción y causando así que la energía se concentre alrededor de los montículos, incrementándose con esto la presión sobre esos sectores reducidos hasta que los mismos no puedan resistir más y se produzca un terremoto.

Sin embargo, no todos los terremotos que ocurren por subducción son debido a este mecanismo, que si bien resulta lógico, no es el principal modo por el cual se producen los sismos. El fenómeno de rotura es más complejo, y tendrían que pasar millones de años para que los montículos presentes experimenten la acumulación de las condiciones necesarias para generar terremotos (Laboratorio de Ingeniería Sísmica, [LIS], 2011).

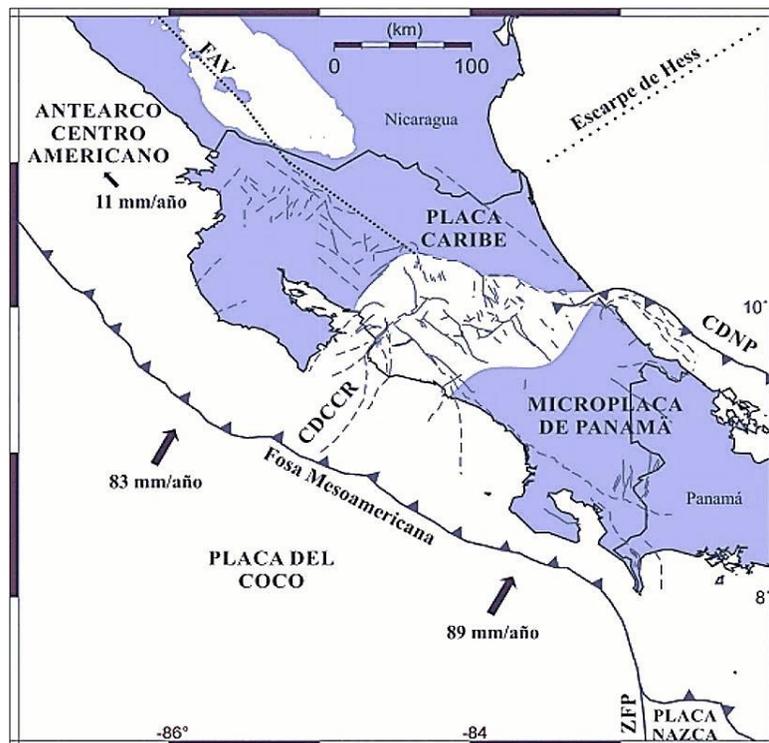


Figura 13.0. Marco tectónico de Costa Rica y sus alrededores.
Fuente: Linkimer y Alvarado (2014); editado en Photoshop.

Es apreciable, que el ambiente tectónico regional hace de Costa Rica un país sometido a constante y diversa actividad sísmica, con eventos y sacudidas que pueden encontrar su origen en distintos fenómenos naturales y ubicarse en profundidades impredecibles y variadas.

En el país, en cualquier momento del año, es posible percibir movimientos sísmicos superficiales, es decir, con hipocentros localizados a profundidades iguales o menores a cuarenta kilómetros, que según Protti-Quesada (1994) pueden deber su comienzo a fenómenos asociados, por ejemplo, los siguientes:

- La subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe y la microplaca de Panamá.
- La longitud de la zona de fracturas de Panamá.
- El fallamiento intraplaca dentro de cualquiera de los tres bloques tectónicos (Placas de Cocos, Caribe, y microplaca de Panamá).
- A la actividad interplaca entre el bloque de Panamá y la placa del Caribe, tanto a lo largo del CDNP como a lo largo de la zona de fallas que atraviesa la parte central de Costa Rica y;
- Al arco volcánico.

Los sismos de profundidad intermedia, descritos como aquellos con focos hallados dentro del rango de los cuarenta kilómetros hasta los ciento veinte kilómetros, ocurren como consecuencia de la deformación interna de la porción subducida de la placa del Cocos.

La sismicidad por debajo de Costa Rica a profundidades intermedias revela otra particularidad de la placa de Cocos, la existencia de una rasgadura por debajo de la parte central del país, misma que es detectable a profundidades superiores a setenta kilómetros. Al noroeste de esta rasgadura, la placa de Cocos presenta una inclinación de hasta ochenta grados y alcanza profundidades que varían entre los doscientos veinte kilómetros por debajo de la frontera del territorio costarricense con el nicaragüense, hasta cerca de ciento treinta y cinco kilómetros justo sobre la rasgadura. Hacia el sureste de la rasgadura la placa de Cocos presenta una inclinación menor, no mayor a unos sesenta grados, y la sismicidad no se extiende a más de ciento veinticinco kilómetros de profundidad detrás del arco volcánico, ni a más de cincuenta kilómetros de profundidad al noreste de Quepos, aproximadamente (Protti et al., 2001).

Las diferencias entre los sismos de poca profundidad y profundidad intermedia nos brindan una noción sobre cuáles son los mecanismos probables que determinan la ocurrencia de los sismos en nuestro país, que en términos específicos son dos: el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe y, el sistema de fallamiento local existente el interior del país y dentro de la corteza continental.

La zona en que se desarrolla la sismicidad generada por la introducción de la placa de Cocos se conoce como "Zona de Benioff", tal y como se mencionó anteriormente para términos generales. Para nuestro país, los sismos ocurridos en esta zona son potencialmente los más destructivos, ya que poseen en promedio los eventos ocurridos interplaca tienen una mayor magnitud que aquellos que suceden intraplaca, por lo que en general los sismos originados en las zonas de choque de las placas van a causar daños importantes en los territorios con menor densidad demográfica, ya que estos son los más próximos a su epicentro, y son los contenidos dentro de los límites de las costas del pacífico o sus alrededores inmediatos (lo cual no significa que los sismos generados en esta región no causarían daños en el interior del país, sino que la intensidad de los mismos será menor por lo que los daños probables se verán reducidos).

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 ($M_s = 7.7$) 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. (Climent et al., 2003)

Respecto al sistema de fallamiento local, si bien la media de las magnitudes de los sismos generados por este medio es menor a aquella de los generados interplaca, este es, aun así, la fuente más común de actividad sismológica percibida por la población nacional y, por supuesto, por los habitantes del cantón de Pérez Zeledón, lo que lo vuelve tema de estudio. Además, los sismos por fallamiento local representan una mayor amenaza a las actividades socioeconómicas del país, ya que al tener lugar en puntos más cercanos o interiores a las regiones en las que se concentran las principales masas poblacionales, los daños materiales y las pérdidas humanas ocasionadas por estos han resultado ser históricamente mayores que

aquellas causadas por sus contrapartes originadas en la zona de Benioff.

En Costa Rica, el sistema de fallas locales se ha originado por los esfuerzos compresivos a los cuales se ven sometidas las regiones intra-placa debido al proceso de subducción ocurrido en la Fosa Mesoamericana. Las fallas presentes en la región son predominantemente de tipo inverso. Las fallas locales no solamente están presentes en el CDCCR, sino que también existen más fallas, de menores dimensiones y esparcidas a lo largo y ancho de todo el territorio nacional.

En el sitio oficial de la Red Sismológica Nacional se presenta información sobre más de setenta y ocho fallas actualmente activas, ubicadas dentro del país, siendo estas las principales más no todas las existentes. El Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica detalla con mayor profundidad cerca de cuarenta

y seis fallas con el potencial para generar sismos de altas magnitudes. No obstante, se debe recalcar que en el país se tienen identificadas cerca de ciento cincuenta fallas que poseen el potencial para la generación de eventos sísmicos y, a pesar de que no existen estudios detallados sobre cada uno de estos planos de desplazamiento, según los registros históricos disponibles, las fallas de nuestro sistema local tienen el potencial para sacudidas de terreno de magnitudes mayores a $M_s = 4.0$. Climent et al. (2003) establece que “Estas fallas se caracterizan por la generación de sismos de magnitudes locales intermedias ($5.0 \leq M_L \leq 6.5$) con foco superficial ($5.0 \leq Z \leq 20.0$ km), condición que hace que los mismos sean generalmente más destructivos cuando ocurren cerca de centros de población” (p.6).

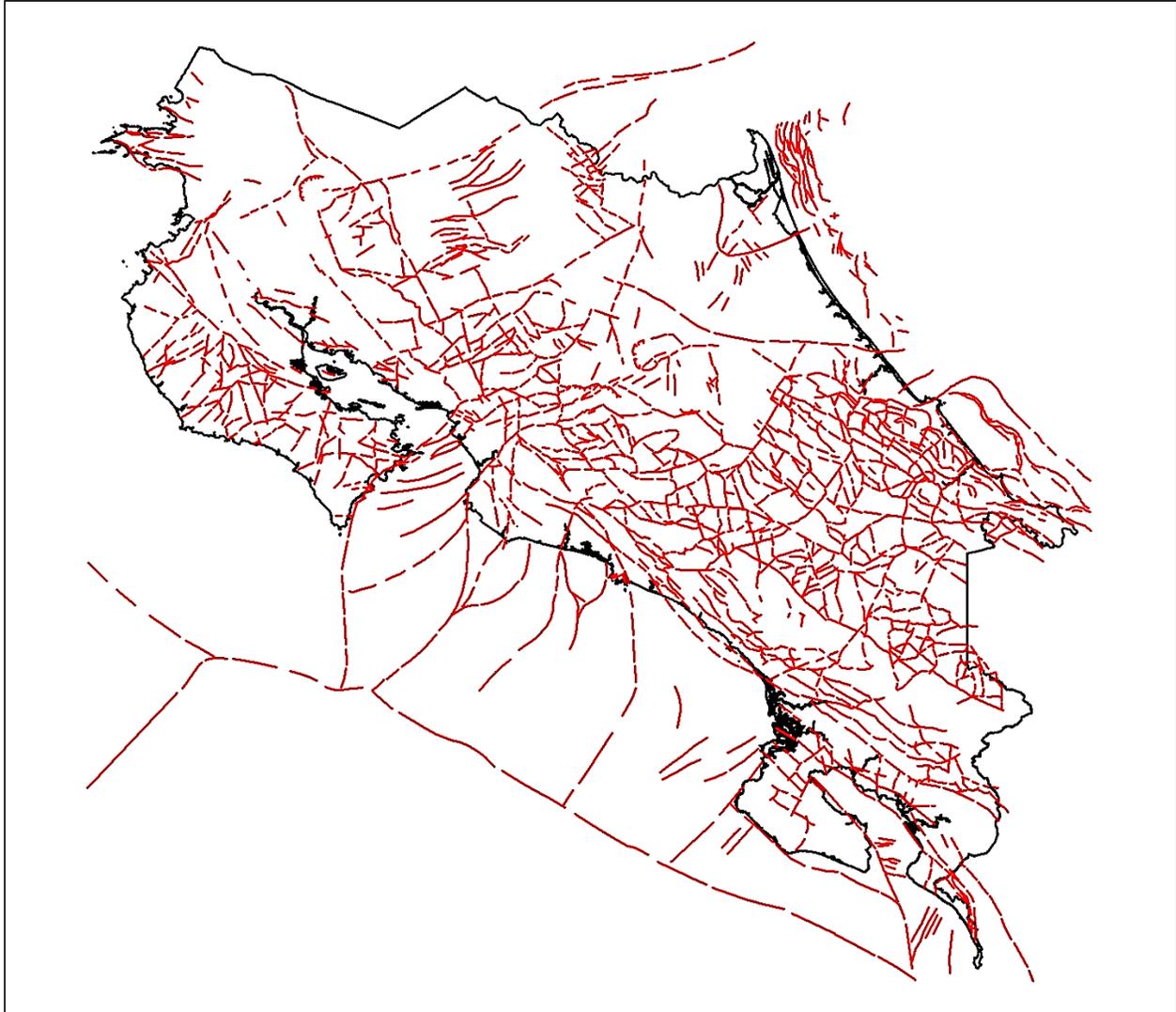


Figura 14.0. Mapa de fallas geológicas de Costa Rica.
Fuente: Climent, Rojas, Alvarado, Benito, 2008.

Formación, topografía y marco tectónico de la región

Según reportes de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), Pérez Zeledón se localiza dentro de una región sísmica que ha sido llamada “Valles y Serranías del Interior del país”, la cual se caracteriza por la frecuente ocurrencia de sismos con hipocentros cercanos a la superficie y con magnitudes moderadas dentro de la escala Richter.

Pérez Zeledón es una localidad cercana a la costa pacífica por lo que eventos sísmicos originados a partir del choque de las placas de Cocos

y Caribe pueden causar daños significativos en viviendas y otras edificaciones del cantón; incluso en parte de la infraestructura de la región, incluyendo puentes viales, peatonales, aceras, calles y carreteras, etc. Sin embargo, considerando la evidencia registrada hasta el momento, se estima que el tener niveles de destrucción extremos e irreparables debido a sismos causados por la actividad interplaca es algo poco probable.

Es importante destacar que debido a las características propias del marco tectónico regional y a aquellas de las localidades incluidas dentro de la zona de estudio que presentan terrenos que-

brados, poco uniformes, depresiones, valles fluviales de poca anchura, susceptibilidad a deslizamientos repentinos debido a los efectos de las lluvias o las sacudidas de terreno, y cambios bruscos de elevación entre distancias cortas; las condiciones topográficas y geológicas del cantón resultan ser un factor determinante a considerar en estudios relacionados con la estimación de aspectos como la amenaza sísmica, ya que, tal y como se estableció en el marco teórico, existen fenómenos de amplificación que pueden intervenir sobre el comportamiento físico de las ondas sísmicas y alterar, ya sea atenuando o agravando, la medida de parámetros como la intensidad de un evento sísmológico determinado; y para el caso de Pérez Zeledón, y por consiguiente del distrito de San Isidro de El General, dadas las propiedades del subsuelo y la proximidad a fallas geológicas, la probabilidad de que la intensidad de los terremotos que afecten a la zona se vea alterada es alta, especialmente si se trata de sismos ocurridos intraplaca, ya que las poblaciones ubicadas en las partes bajas de los valles favorecen la amplificación de las ondas sísmicas, lo cual sería un disparador para la intensidad de sismos ocurridos a cortas distancias de las localidades aledañas.

Lo anterior, según la CNE, pone en riesgo edificaciones construidas en varias localidades del cantón, específicamente a aquellas ubicadas en: la ciudad de San Isidro de El General, Pedregoso, Quebradas, General Viejo, Hermosa, Peñas Blancas, Palmares, Juntas, Repunta, Rivas, Pueblo Nuevo, Buena Vista, Canaán, San Gerardo, San Pedro, Unión, San Rafael de Plataneros y Pejibaye.

La amplificación de las ondas sísmicas podría ser, además, causante de deslizamientos y derrumbes de material rocoso, debido a que las rocas aflorantes de la zona presentan gran cantidad de fracturas, encontrarse con diaclasas es común, y estas, en conjunto con la ocurrencia de un terremoto cuya intensidad aumente debido a condiciones topográficas, pueden contribuir al tipo de derrumbes y a las afectaciones de los terrenos.

Pérez Zeledón se encuentra ubicado en el flanco pacífico de la cordillera de Talamanca, la cual es una formación geológica localizada al sur de Centroamérica que debe su origen al mismo proceso de subducción que es responsable por la ocurrencia sismos interplaca; en el caso de la cordillera de Talamanca, esta es parte del relieve orogénico que ha surgido debido a procesos asocia-

dos al levantamiento tectónico, que toman el material fracturado perteneciente a la placa de Cocos (material fracturado como consecuencia de esfuerzos de compresión y arrastre) y lo elevan.

Al pertenecer a esta región geológica, Pérez Zeledón se ve afectado por una gran cantidad de accidentes geográficos, ya que el relieve circundante a la cordillera de Talamanca varía notablemente a lo largo de toda la extensión de la misma, posee pendientes muy pronunciadas que van desde los quince grados hasta los cincuenta grados, y elevaciones montañosas que superan los tres mil metros sobre el nivel del mar en diversos puntos. Asimismo posee regiones con elevaciones más modestas que abarcan un rango entre los setecientos y mil trescientos metros sobre el nivel del mar, hecho que retrata las complejidades topográficas de la zona. Además, esta misma región es anfitriona de gran cantidad de cañones profundos, que se comportan como torrentes de montañas y han sido excavados por ríos y quebradas (Alvarado, et al., 2009).

“Las laderas moderadas están en función del tipo de roca, observándose pendientes más fuertes en laderas asociadas con rocas intrusivas o sedimentos metamorfozados” (Morales y Leandro, 1983).

Por otra parte, son seis los ríos principales que drenan la región considerada, mismos que influyen en los procesos geológicos relacionados con la estratigrafía local, los cuales son: División, Pacuar, San Isidro, Pedregoso, Buenavista y Chirripó, de los cuales el río División tiene una corriente en sentido S-W mientras que los otros cinco siguen un sentido Sur hasta unirse y formar el río General. Estos ríos siguen patrones determinados por los accidentes y estructuras geológicas más importantes en las partes altas del cantón, tales como lo son las fallas, los planos estratigráficos, las fracturas, etc.

Según Alvarado et al. (2009) los cuerpos intrusivos de la cordillera de Talamanca influyen también en la configuración tectónica del cantón, además de la condición de choque de las placas litosféricas en la Fosa Mesoamericana. Se pueden observar e identificar patrones de fallamiento con diversas orientaciones, destacándose entre estas las NW-SE, NE-SW y NNE-SSW. Además, a través del estudio de aerofotos, y la realización de recorridos de campo, se ha determinado la existencia de tres sistemas de fallamiento principales en la región según Leandro; Alvarado y Denyer (como

se citaron en Alvarado, et al., 2009). Los tres sistemas identificados son: el sistema N-S, el NE-SW y el NW-SE, los cuales pueden caracterizarse de la siguiente manera:

- **Sistema N-S:** identificado por el trazado rectilíneo de los cauces de los ríos San Ramón, Quebradas, Buena Vista y parte del río Blanco.
- **Sistema NE-SW:** este sistema controla el curso de los ríos y quebradas División y Páramo y la quebrada Blanca, entre otras.
- **Sistema NW-SE:** al igual que en el caso del sistema anterior, este controla el curso de muchos ríos y quebradas en el cantón, tales como lo son los ríos Chimirol, Blanco y quebradas Boquete, Aristides y Seca. La existencia de falla Aristides-Quebrada Seca fue verificada en el campo, gracias a un cambio litológico a ambos lados de las quebradas y a una zona de falla de 2 m en la carretera Interamericana.

Además de estos sistemas de fallamiento, es necesario hacer hincapié en aquellas estructuras geológicas que se atribuyen eventos sísmicos de importancia en la región. En Pérez Zeledón, en las cercanías de San Isidro de El General, existe una fuente de actividad sísmica con el potencial para generar sismos de magnitudes de hasta $M_w = 6.3$ (asumiendo una longitud de falla $L = 11$ km). Esta fuente, según varios autores, fue la responsable del terremoto que repercutió en la región en Julio de 1983, dejando a más de seiscientas personas afectadas y a una fallecida.

Junto con los daños humanos se deben reconocer también los efectos materiales de este sismo y otros que han tenido repercusiones sobre el sitio en estudio.

Detalles sobre eventos históricos que han tenido relevancia específicamente en la zona correspondiente al cantón de Pérez Zeledón serán expuestos en el siguiente apartado de este capítulo, en el cual se da una descripción sobre la sismicidad registrada e histórica para el cantón.

Sismicidad para la región en estudio

La zona sur (sureste) de Costa Rica es una región sumamente compleja en términos de sismicidad, ya que es justamente en esta zona en donde se da la interacción entre las placas de Cocos, Nazca y

el bloque de Panamá. Es bajo el área del pacífico central, la península de Osa y la península de Burica en donde la placa de Cocos se introduce bajo la fragmentación de la placa del Caribe que ahora se conoce como micro-placa de Panamá.

La neotectónica del sureste de Costa Rica está definida principalmente por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa Caribe. En esta región, este proceso se ve afectado por la subducción de la corteza oceánica engrosada de la cordillera submarina de Cocos y por la cercanía de la Zona de Fractura de Panamá (ZFP) que representa el límite entre las placas de Cocos y Nazca. Además, sobre la placa Caribe, existe una gran cantidad de fallas activas, algunas de las cuales alcanzan longitudes mayores de 100 km. Este complicado escenario tectónico es el responsable de la alta sismicidad que caracteriza la zona sureste de Costa Rica. (Linkimer y Schmidt, 2004)

La zona de fracturas de Panamá (ZFP) se ubica justo al sur de la península de Burica, siguiendo una orientación N-S tal y como se mencionó en secciones previas, y representando el límite de convergencia entre las placas de Nazca y Cocos. El mismo sistema de fallas se subduce bajo la micro-placa de Panamá, también en la región de la península de Burica.

Todos los componentes y configuraciones tectónicas descritas anteriormente para establecer este marco local —relativamente próximo al de la zona en estudio—, muestran, entre otras cosas, la gran complejidad y lo impredecible de los sismos ocurridos en la zona de estudio, ya que los mismos pueden generarse por diversas fuentes y la interacción de varias de estas, y tener así impactos importantes en toda la región, tanto en estructuras como en los suelos y la topografía de la misma.

El pacífico central es la región con la mayor actividad sísmológica en el país, sin embargo no necesariamente con la más severa, en promedio. En esta región se registran la mayor cantidad de sismos del territorio costarricense, con magnitudes que oscilan entre magnitudes de $M_w = 5.0$ y $M_w = 6.9$ con períodos de retorno cortos, de entre cinco y quince años. Bajo la península de Osa, debido a sus particularidades tectónicas la actividad sísmica registrada muestra la ocurrencia de al menos un sismo de entre $M_w = 7.2$ y $M_w = 7.4$ cada cuarenta años, aproximadamente. Esto significa que debido a la cercanía con la zona de choque

entre placas y los sistemas de fallamiento, estas regiones poseen actividad sísmica considerable, la más importante de la región, e influyen así sobre el potencial y peligro sísmico estimable para el cantón de Pérez Zeledón.

La zona de fractura de Panamá presenta un nivel alto de actividad, y en ella es posible que se originen sismos con magnitudes de hasta $M_w = 7.0$, con una elevada frecuencia y gran cantidad de réplicas que pueden ser percibidas hasta muchos meses después de la ocurrencia del evento principal.

Los sismos registrados en la península de Burica, y la península de Osa, suceden a profundidades variadas, con hipocentros que pueden estar ubicados a veinticinco kilómetros de profundidad o próximos a la superficie (a alrededor de cinco kilómetros).

Las diversas magnitudes e intensidades, así como los variables puntos de ruptura posibles evidencian la gran complejidad de la zona en términos de actividad sísmica, además de indicar un enorme peligro e incertidumbre, ya que al ser una zona de interacción de tres placas litosféricas, con actividad a diversas profundidades y períodos, predecir exactamente cuál será la fuente de un sismo destructivo es un proceso complejo y difícil de simplificar.

A la hora de enfrentar un sismo en la región, los tres posibles escenarios para explicar el origen del mismo son: la subducción de la placa de Cocos en la micro-placa de Panamá; sismicidad propia de la zona de fracturas de Panamá, en su porción introducida bajo el territorio de la península de Burica; sismicidad producto de actividad intraplaca, en fallas locales y superficiales localizadas dentro de la península de Burica.

En Pérez Zeledón hay registros históricos los cuales estén ligados con sismos catastróficos ocurridos antes de la época instrumental. Por lo tanto, la información sobre actividad sísmica antes del siglo XX es sumamente escasa, por no decir nula, ya que los datos disponibles son más bien relatos transmitidos de antiguos habitantes de la zona.

Peraldo (como se citó en Mora y Peraldo 2011) indica que el sismo más antiguo del que se tiene algún indicio en la zona de estudio, corresponde a uno ocurrido entre los años de 1914 y 1916, según testimonios de habitantes originarios del cantón, y respaldado parcialmente por un registro tomado en un sismógrafo de San José en 1916 y que ubica un sismo cerca del área de estudio. La aseveración de que ambos eventos sean el mismo es un poco osada por lo que se considera que el evento relatado por los habitantes sucedió pero no se puede dar seguridad sobre la información detallada, siendo que hay duda inclusive con el año de ocurrencia.

Otros movimientos de terreno y sacudidas bruscas fueron reportadas por residentes de la zona, según entrevistas realizadas y los datos recolectados por Mora y Peraldo (2011); entre los eventos mencionados se destacan aquellos ocurridos después de año 1973, siendo que a partir de dicha fecha la seguridad en la información obtenida crece y, a pesar de las limitantes de instrumentalización de la zona, se logra tener registro de varios eventos de importancia, incluyendo aquel que dio a conocer la existencia de la falla de Buenavista, y otros causados por efectos indirectos del sismo de Limón de 1991.

En el siguiente cuadro se puede notar que evidencias para deducir la existencia de una fuente sísmica cortical local ya existían previo al terremoto de Buenavista (al considerar los sismos de 1936 y 1956 principalmente), sin embargo, antes de los eventos de 1983 fue imposible llegar a la determinación de la presencia de la falla y mucho menos a su ubicación específica. De igual forma, testimonios varios, recolectados entre pobladores de las localidades próximas declararon que cerca de los años de 1943 y 1963 hubo sismos de magnitud considerable ocurridos en esa misma región. No obstante, los limitados recursos de información e imprecisión de las fuentes “consultadas” hacen que eventos como esos se tomen con cierta inquietud y sospecha respecto a su veracidad, finalmente tomándose como eventos inciertos o en necesidad de contar con información ampliada.

CUADRO 7.0. SISMICIDAD HISTÓRICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Fecha del sismo	Detalles del sismo	Fuente de la información	Calidad de la información
En algún momento en o entre 1914 y 1916.	En 1983, Trino Barrantes contaba que \pm 50 años atrás hubo un terremoto, produjo crecientes en el río Buenavista con aporte de grandes troncos, probablemente por deslizamientos ocasionados por el terremoto. Tembló fuerte por 15 días. Características fueron similares al sismo de 1983. Hubo retumbos. Una troja para leña ubicada en Buenavista quedó con las bases flojas.	Trino Barrantes, referido por Rodrigo Elizondo de Herradura y por Benjamín Díaz, La Piedra, comunicación personal, 2001, (entrevistas no consecutivas).	Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.
Julio de 1936, aproximadamente.	Tembló por espacio un de 15 días. La tierra se movió de arriba hacia abajo durante los eventos. Hubo retumbos. Cayeron objetos, pero no ocurrieron daños en viviendas.	Manuel Fallas, Quebradas, comunicación personal, 2001.	Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.
En algún momento cercano a 1943.	Sin información corroborada.	Leandro et al., 1983.	Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.
Meses después de la revolución de 1948.	Se sintieron en Pérez Zeledón fuertes temblores seguidos, por un lapso de cerca de quince días. Se decía que iba a salir un volcán en el Chirripó. Estos sismos podrían ser los referidos por Leandro et al. (1983).	Manuel Fallas, Quebradas, comunicación personal, 2001.	Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.
1956 y finales de la década de 1950.	Febrero: tembló mucho. Movimientos en sentido arriba-abajo, Trepidatorios (levantados fue la palabra usada para describir el movimiento). Posteriores a las inundaciones de 1955. Playas de Quesada: piedras desprendidas. Retumbos. Grietas en laderas. Sin daños en las casas. San Isidro de El General: sentidos más leves.	Benjamín Díaz, La Piedra, comunicación personal, 2001.	Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.

<p>En algún momento cercano a 1963.</p>	<p>Sin información corroborada.</p>	<p>Leandro et al., 1983.</p>	<p>Imprecisión considerable, incertidumbre respecto al año o mes de ocurrencia.</p>
<p>Febrero 22 o 23 de 1973, alrededor de las 13:00 y las 16:00 horas según testimonios. En Leandro et al. (1983) se indica que ocurrió el 23 de febrero de 1973, viernes a las 12:30 p.m.</p>	<p>Temblor muy fuerte, trepidatorio antecedido por un retumbo. Hubo réplicas y grietas en laderas y en el camino a San Cayetano. Cayeron objetos en una casa de Herradura. Los monos gritaban en la montaña. Se agrietó la hornilla de un trapiche ubicado en Salitre. Buenavista: temblor ondulatorio y sin retumbo. Una fisura en una alcantarilla se abría y cerraba como consecuencia del sismo. Fue sentido en Buenavista, La Piedra y finca Alaska. Algunos testigos manifestaron tener dificultad al caminar. Posteriormente la gente siguió sintiendo pequeños sismos (réplicas) por 10 días, asociados con retumbos.</p>	<p>Rodrigo Elizondo, Herradura, comunicación personal, 2001. Marvin Ureña, comunicación personal, 22-10-2004. Rafael Ángel Portugués, 22-10-2004. Ovidio Torres, comunicación personal. 22-10-2004. Ovidio Torres y otros testigos en Leandro et al. (1983).</p>	<p>Precisión aceptable, comunicación personal de testigos y/o registros instrumentales.</p>
<p>Domingo 3 de Julio de 1983, 16:13:43 (GMT)</p>	<p>Sismo precursor ($M_b = 5,1$)</p>	<p>Boschini et al. (1988).</p>	<p>Precisión aceptable, comunicación personal de testigos y/o registros instrumentales.</p>

Domingo 3 de Julio de 1983, 16:34:23	Ms = 6,1, Hipocentro a 14 km de profundidad, Intensidad máxima = VIII. Área de afectación = 400 km ² . Retumbo inicial. Réplicas sentidas durante un mes. Deslizamientos y agrietamientos en laderas. Herradura: varias casas de cemento cayeron, algunas por mala construcción. Río Blanco: desapareció por migración de sus vecinos. La Piedra: se oyó antes del sismo una explosión, seguida de un movimiento en vaivén leve y después otro más fuerte. No se podía caminar. Urbanización Juan Pablo II en Rivas para reubicar damnificados de La Hortensia, Herradura, División, El Jardín. Otros fueron reubicados en Santiago de San Pedro, urbanización Nueva Hortensia.	Omar Jiménez, Herradura, comunicación personal, 2001. Rodrigo Elizondo, Herradura, comunicación personal, 2001. Boschini et al. (1988). Marvin Ureña, 22-10-2004, comunicación personal.	Precisión aceptable, comunicación personal de testigos y/o registros instrumentales.
6 o 13 de Julio de 1983.	Réplica del sismo del 03/07/1983. Muy fuerte, similar al principal, pero de corta duración.	Omar Jiménez, Herradura, comunicación personal, 2001. Benjamín Díaz, La Piedra, comunicación personal, 2001.	Precisión aceptable, comunicación personal de testigos y/o registros instrumentales.
24 de abril de 1991.	Sismos inducidos en la región por el sismo de Limón, 22/04/1991.	Barquero y Rojas (1994).	Precisión aceptable, comunicación personal de testigos y/o registros instrumentales.

Fuente: Mora y Peraldo, 2011; realizado en Microsoft Excel 2013.

Con base en los sismos mostrados anteriormente, se puede apreciar que el evento más relevante en el historial de la región, en términos de magnitud y consecuencias causadas, así como también aquel sobre el que se dispone de una mayor cantidad de información, es el terremoto de Buenavista de 1983; razón por la cual es importante detallar con especial interés las características únicas de este suceso sismológico, siendo que esta sacudida es una determinante para la posterior definición de la amenaza sísmica existente en el cantón de Pérez Zeledón, misma que será estimada más adelante en este informe.

Terremoto de Buenavista, 3 de Julio de 1983.

El domingo 3 de Julio de 1983, en una zona ubicada dentro del valle del río Buenavista, su produjo un sismo de altas magnitudes; Ms = 6.1 y Mb = 5.7.

La ocurrencia de este terremoto puso en evidencia una fuente sismogénica desapercibida hasta ese momento, en un área que se consideraba de bajo potencial sísmico (del tipo intraplaca) por la escasa actividad que presentaba. Esta región comenzó a ser colonizada plenamente en la primera mitad del siglo XX, por lo cual no

se puede establecer ni siquiera aproximadamente un posible período de recurrencia para esta fuente pues no existen crónicas que mencionen eventos sísmicos en esta zona, ni en tiempos de la Colonia ni en época ya Republicana. (Boschini, Alvarado, Rojas, 1988)

Antes de la ocurrencia del evento principal, a eso de las once de la mañana con catorce minutos, un evento precursor con propiedades similares tuvo lugar en un punto próximo al de este sismo. El movimiento precursor tuvo una magnitud de $M_b = 5.1$ y de cierta forma contribuyó a que la cantidad de víctimas mortales fuera menor de lo que podría haber sido. Esto debido a que el terremoto precursor ocurrió solamente cuarenta segundos antes que el evento principal, y debido al gran estruendo y movimiento que causó, las personas abandonaron sus casas y salieron a espacios abiertos en los cuales la seguridad fue mayor a pesar del pánico generado por los retumbos y las sacudidas generadas.

La corta diferencia de tiempo entre el evento principal y el precursor, causó, además de la movilización de los vecinos de las poblaciones cercanas, complicaciones para poder determinar la ubicación y las características específicas del terremoto. La Red Sismológica Nacional (RNS: ICE-UCR) no fue capaz de establecer la posición de ocurrencia del sismo principal, debido a que la señal sísmica de este se traslapó con la del evento precursor, lo cual imposibilitó la lectura de llegada de las ondas P a la superficie, hecho que a su vez evitó obtener parámetros como la magnitud M_s en las estaciones. No obstante, sí fue posible ubicar el sismo precursor, cuyo epicentro se determinó a catorce kilómetros del centro de San Isidro de El General, en dirección norte con respecto a la ciudad principal del distrito y cabecera del cantón; con coordenadas de $9^{\circ}29'$ latitud norte y $83^{\circ}40,5'$ longitud oeste. El foco del evento fue localizado a una profundidad de catorce kilómetros por debajo de la superficie.

Tras el sismo principal, durante los meses siguientes, ocurrieron gran cantidad de réplicas en la zona, mismas que tuvieron intensidades en la escala Mercalli Modificada de V, y con magnitudes de entre $M_b = 4.0$ y $M_b = 4.5$, o menores.

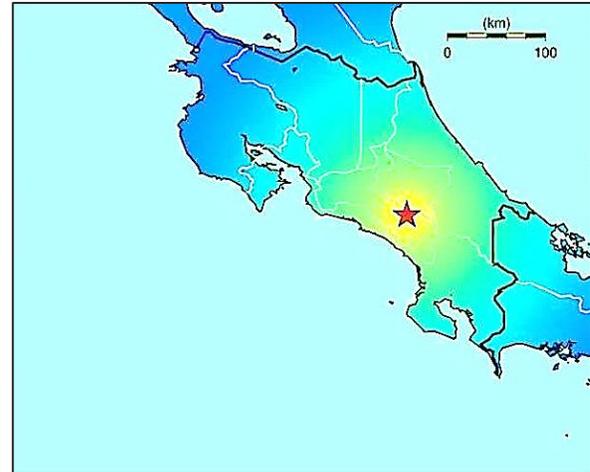


Figura 15.0. Epicentro del terremoto de Buenavista de 1983. Fuente: Red Sismológica Nacional (RSN).

El área afectada por el sismo fue de cuatrocientos kilómetros cuadrados (superficie sobre la cual se pudo percibir el terremoto, sin embargo el área más afectada fue de alrededor de doscientos cincuenta kilómetros cuadrados).

Las intensidades reportadas por los ciudadanos fueron varias, según el sitio y las impresiones de cada persona. En el área epicentral se tienen reportadas intensidades máximas, según la escala sismológica Mercalli Modificada, de VIII y IX, según Leandro y Morales (como se citaron en Mora y Peraldo, 2011). Para el área de mayor desarrollo cantonal, la ciudad de San Isidro, las intensidades registradas en la literatura son un poco menores, oscilando entre VII y VIII.

Los daños causados por este terremoto fueron extensos y se presentaron en toda la región en la que se percibió el sismo.

Al norte del Liceo Unesco, al sur de la Cooperativa; el Barrio Sinaí y el Hospital se reportaron daños de consideración. En el área epicentral, en su mayoría montañosa, se generaron numerosos deslizamientos que movilizaron un volumen total de $4.6E+6$ metros aproximadamente. Asimismo, gran parte de la carretera interamericana y la red de caminos vecinales fueron obstaculizadas y otras fueron destruidas. Además ocurrieron severos daños en escuelas y templos. De las 600 viviendas inspeccionadas en esa oportunidad, 40% podían usarse, 46% se hallaron inhabitables y un 14% requirieron reparaciones según Leandro (como se citó en Mora y

Peralta, 2011). Muchos de los daños se debieron a la ubicación de las viviendas en laderas inestables. (Mora y Peralta, 2011)

Los daños y el impacto causado por el terremoto en su momento no solo fueron responsabilidad de la intensidad del evento, sino que, como se mencionó antes, en la zona hay diversos factores que pueden influir sobre el impacto final de un evento, y que son importantes a la hora de anticipar los probables daños de un sismo en la región. En el caso del sismo de 1983, estudios realizados por Leandro et al. (1983) y Morales (1987) coinciden al determinar que las repercusiones absolutas

sufridas en el área epicentral del sismo estuvieron condicionadas por factores propios de la región que agravaron los efectos de las vibraciones del terreno. Las pendientes pronunciadas e irregulares; la calidad, homogeneidad y espesor de los estratos de suelo; el tipo de suelo; la gran cantidad de diaclasas; los tipos de estructuras y los deficientes métodos y materiales constructivos usados en la época en el sitio, fueron todos factores que indudablemente jugaron un papel en el desarrollo del evento y que contribuyeron a aumentar el valor económico de las pérdidas materiales con motivo del sismo.

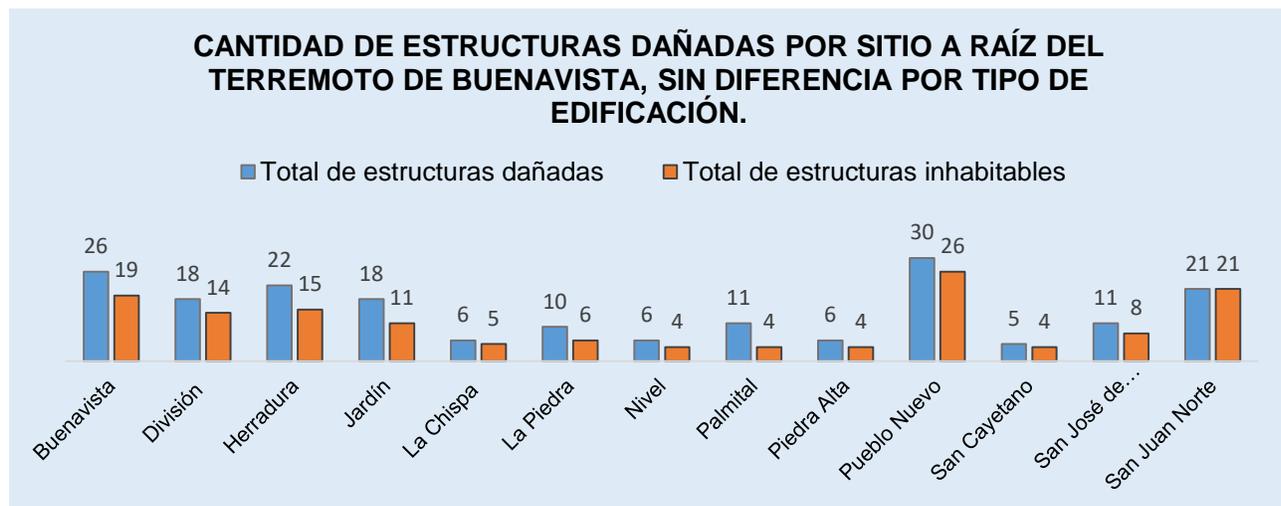


Gráfico 2.0. Distribución de estructuras dañadas tras el terremoto de Buenavista.
Fuente: Mora y Peraldo, 2011; realizado en Microsoft Excel 2013.

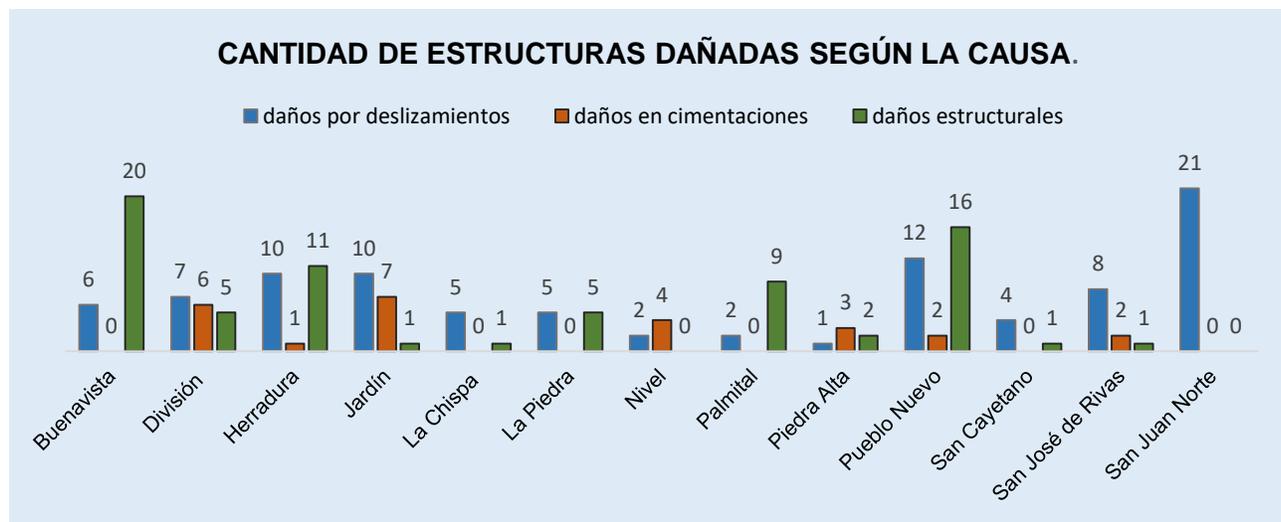


Gráfico 3.0. Clasificación de los daños en las estructuras en función de la causa que lo originó.
Fuente: Mora y Peraldo, 2011; realizado en Microsoft Excel 2013.

Con respecto a la fuente originadora del terremoto, se mencionó ya que el área epicentral del sismo se consideraba, hasta antes del evento, como una con bajo potencial para la generación de sismos. Sin embargo, una vez ocurridos y parcialmente registrados los eventos del domingo 3 de Julio de 1983, así como las réplicas que les siguieron meses e incluso años después, se determinó la existencia de una zona con el potencial para la creación de eventos sismológicos con magnitudes considerables y destructivas.

Existen varias propuestas para justificar la ocurrencia del sismo, sobre todo basadas en el sentido de la sacudida y las evidencias de campo disponibles.

Una de las interpretaciones sobre el tema, es hecha por Boschini et al. (1988), quien da a conocer ciertas observaciones para justificar su posición al sugerir el descubrimiento de una falla geológica hasta entonces desconocida.

El área circundante al fallamiento local, es descrita por Boschini et al. (1988), quien muestra ciertas características de la región, y asevera que en esta hay evidencias de actividad neotectónica y de procesos geomorfológicos, suficientes para poder concluir la existencia de una falla en la zona del valle del río Buenavista.

El río Buenavista discurre por un valle de falla asimétrico, que posee laderas en su vertiente oeste con pendientes moderadas no mayores a 17° y no menores a 8°; en el este, las pendientes del valle son más directas y abruptas, yendo desde los 18° hasta los 26°. A lo largo del río Buenavista —al igual que en el Chirripó pacífico—, es posible observar hasta cuatro distintos niveles de terrazas torrenciales, pero a pesar de esta característica del relieve identificable, no se muestran rasgos de deformación tectónica a raíz de este hecho. Sin embargo, en el lado derecho de la quebrada Hilario se distingue claramente la existencia de una terraza cuyos materiales están ubicados a aproximadamente sesenta metros con referencia en el nivel del río Buenavista, y a cuarenta metros por sobre el nivel de la terraza inferior. Esta configuración del margen de la quebrada Hilario expone levantamientos verticales diferenciales entre dos bloques rocosos, lo cual denota una característica propia del movimiento tectónico ocurrido en los planos de desplazamiento ubicados entre bloques adyacentes, misma característica que contribuye a confirmar la existencia de la falla de Buenavista, descubierta/propuesta/inferida tras el evento de 1983.

El trazo de la falla Buenavista es ligeramente curvilíneo y algo sinuoso, lo cual ha dado origen a pequeñas cuencas de tracción y a posibles lomos de compresión como, por ejemplo, el ubicado cerca de la desembocadura de la quebrada Nino Arias. En fin, la falla se observa en las fotografías aéreas a lo largo de 11 km, entre las poblaciones Rivas y La Piedra. Las evidencias sismológicas indican que el área de ruptura se extiende 19 km más al norte de La Piedra. Por otro lado, no tenemos por el momento argumentos suficientes para delimitar o establecer su continuidad hacia el sur de Rivas tal y como parecen sugerirlo algunos rasgos topográficos. Esta es la única mega falla evidente con rasgos neotectónicos, en un área de varios cientos de kilómetros cuadrados dentro de la zona mesosísmica. (Boschini et al., 1988)

Según las observaciones de Boschini et al. (1988), Montero et al. (1998), Montero (2001) y Alvarado et al. (2009) la falla Buenavista posee una orientación con un sentido, en promedio, de N10°W y es una falla de tipo transcurrente, dextral o direccional derecha y de desplazamiento vertical continuo.

No ha sido posible estimar o establecer de manera clara el período de recurrencia de la falla, ni la tasa de movimiento entre los bloques, esto debido a la poca información disponible, ya que, como se ha mencionado, la falla era desconocida hasta antes de 1983, y no se tienen registros de movimientos previos en la zona o alguna prueba irrefutable de actividad sísmica que pueda ser atribuido a esta falla; existen testimonios que han ido pasando entre los pobladores de la región; sin embargo, dichos indicios no son ni específicos ni mucho menos indicadores confiables de una fuente sismogénica determinada.

Los investigadores están de acuerdo en que la falla se ubica al norte de la ciudad de San Isidro del El General, en el margen occidental de la localidad de Rivas. No obstante no hay un consenso definitivo respecto a la longitud de la misma. Según Montero (2001) la falla tiene 7 km de largo, mientras que Montero et al. (1998) proponen una longitud distinta, de 15 km. Por su parte, en Barquero y Alvarado (2011) se indica una longitud de 30 km, y en Boschini et al. (1988), de 11 km.

A pesar de que la información relacionada a la actividad de esta falla es limitada debido al

poco tiempo invertido en su investigación a razón de su desconocimiento previo, no solamente se asigna el terremoto de 1983 a esta, Barquero y Rojas (2009) le atribuyen eventos ocurridos a lo largo

del año 2007, sismos que contaron con magnitudes que fueron desde los 2.8 grados hasta los 4.1, en su momento.



Figura 16.0. Ubicación geográfica de la falla Buenavista en el cantón de Pérez Zeledón.
Fuente: Red Sismológica Nacional (RSN).

Sobre las otras propuestas dadas como alternativa para explicar la actividad sísmica del año 1983 en Pérez Zeledón, Morales y Leandro (1985) alegan que el área epicentral del sismo puede hallarse muy cerca de la quebrada Zapote, en un sitio en el cual se ubica una falla con rumbo NW-SE, que fue llamada Falla Pangolín por Morales (1987).

De acuerdo con los trabajos de Morales (1987) y Alvarado et al. (2009) se puede concluir que existen indicios que sustentan la presencia de

las fallas de Pangolín y División en la proximidad de la zona, mismas que no se incluyen en Denyer et al. (2009). Mora y Peraldo (2011) mencionan que la Falla División podría condicionar los límites de valle con el río del mismo nombre, y que esta falla viene a terminar en el “comienzo” de la Falla Pangolín.

La Falla División, además, vendría a condicionar el valle del río Páramo en su punto de confluencia con el río Buenavista. A su vez, esta

falla estaría condicionando el tramo del río Buenavista que está ubicado entre las regiones de Alaska y La Piedra, zona en la cual es posible medir varios planos que tienen una tendencia NE-SW, misma que es congruente con la deducción de una rotura con esta orientación para explicar el terremoto de Buenavista, criterio contrario al del sentido N-S propuesto por Boschini et al. (1988).

El plano principal de entre los planos con rumbo medio NE-SW contiene “gradas” y “estrias horizontales” que pueden denotar certidumbre de movimiento sinistral y una zona de molienda de más de un metro de ancho.

Por otro lado, la Falla Pangolín vendría a condicionar el tramo superior del río Páramo y cortar a la Falla División, en un sector en el cual “intersecarían” ambas estructuras dentro del mismo tramo. Mora y Peraldo (2011) midieron, en un sector de la carretera interamericana sur, próximo al sitio propuesto para la ubicación de la

Falla Pangolín, varios planos de falla que pueden correlacionarse con el trazo tentativo, indicado por Morales (1987), para describir la geometría de la Falla Pangolín. Además, cerca de Canaán, hacia el sureste del área epicentral, Alvarado et al. (2009) han cartografiado el trazo de la Falla Chimirol, misma que podría interpretarse como parte de la zona de fractura de la Falla pangolín, y que continua, según el mapa de Morales (1987) sobre el valle del río Talari.

Mora y Peraldo (2011) indican que en su análisis macrosísmico del sismo de Buenavista hallaron menor cantidad de evidencias de campo para apoyar la tesis del fallamiento con rumbo N-S que para aquel propuesto en sentido NW-SE. No obstante, concluyen que debido a la incertidumbre asociada a los mecanismos focales, la localización del sismo, y a la falta de estudios sismológicos, no es posible atribuir el sismo con seguridad a una de las fallas indicadas.

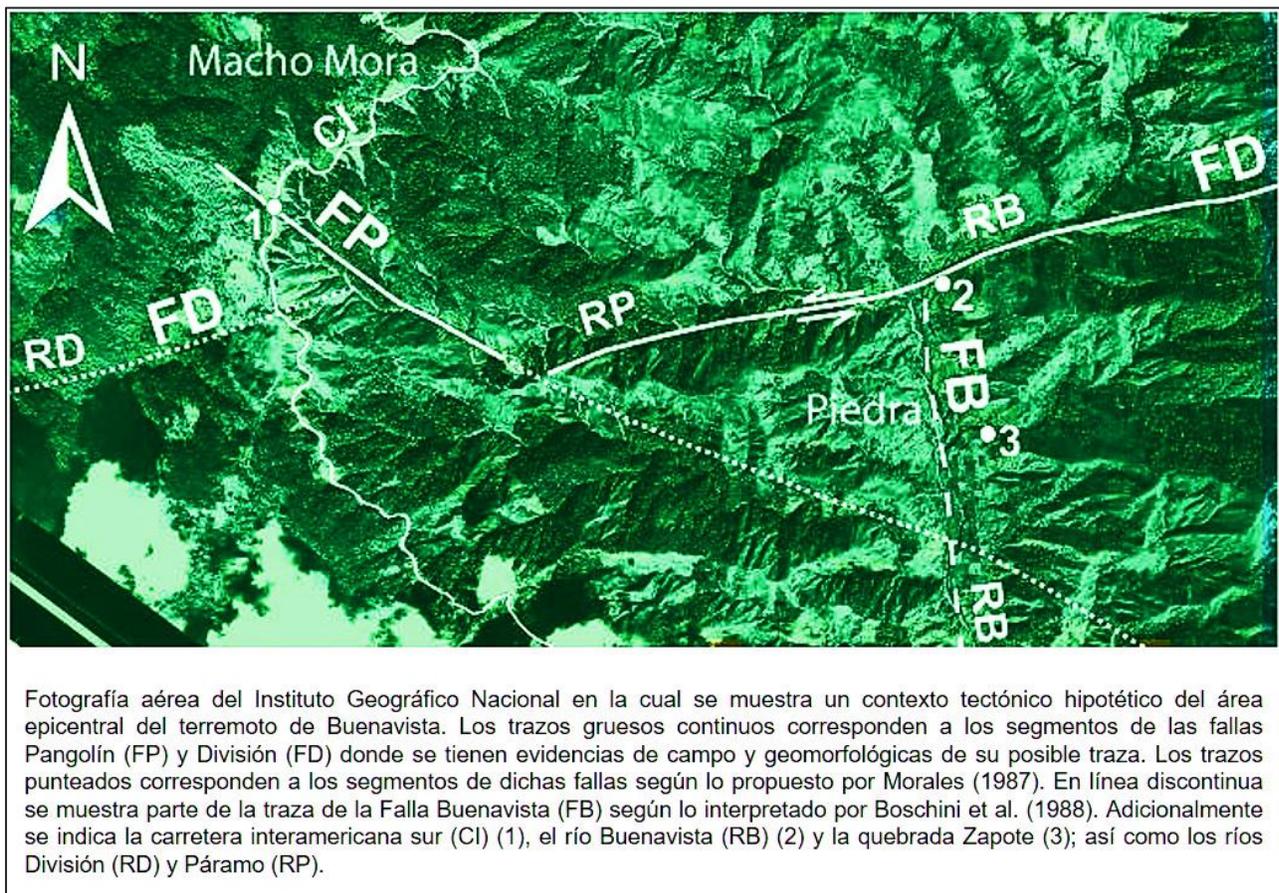


Figura 17.0. Ubicación geográfica de la falla Buenavista en el cantón de Pérez Zeledón.
Fuente: Mora y Peraldo, 2011.

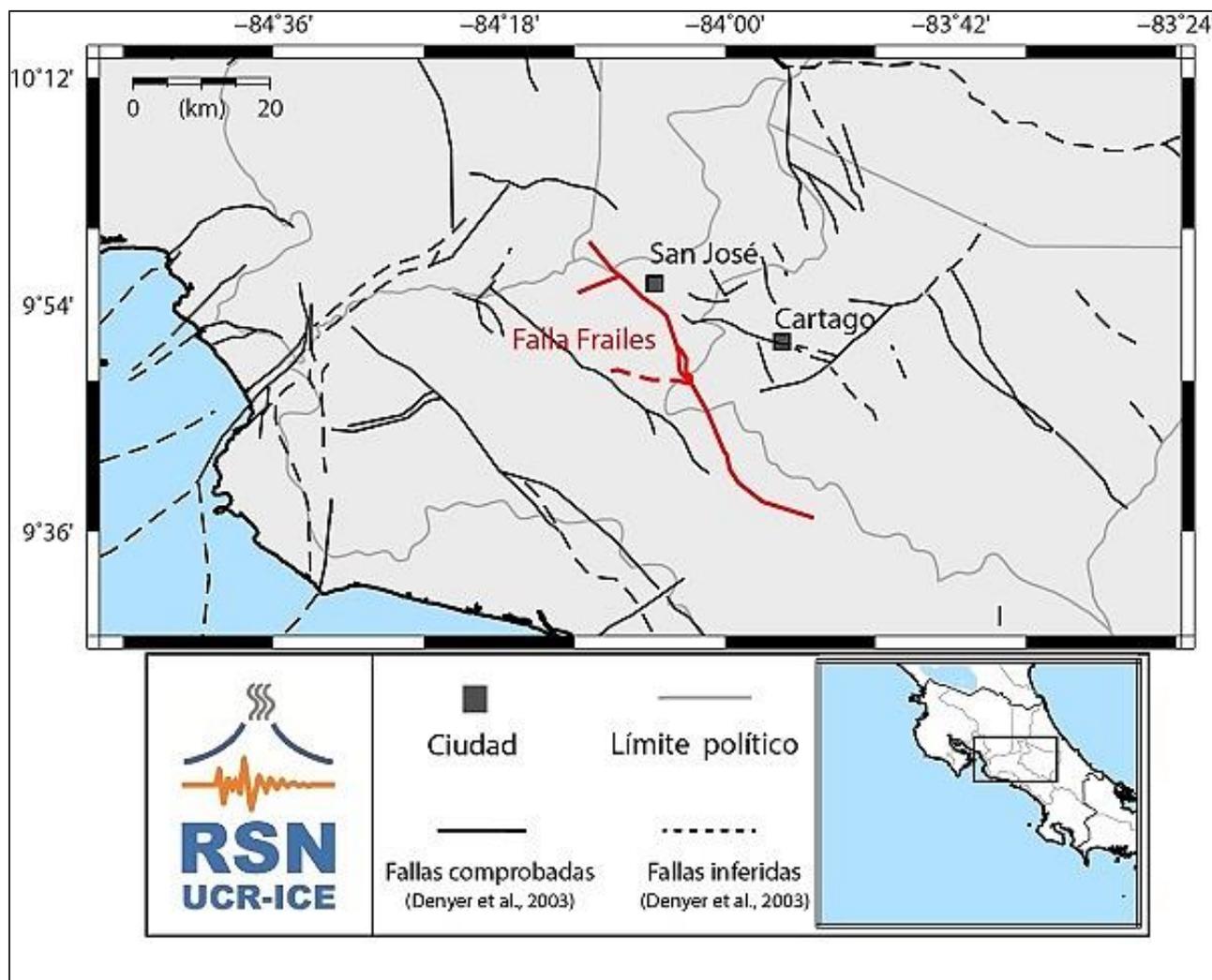


Figura 18.0. Ubicación geográfica de la Falla Frailes-Pirris-Pangolín.
Fuente: Red Sismológica Nacional (RSN).

Sismicidad reciente en la zona

La sismicidad superficial registrada recientemente en el cantón de Pérez Zeledón, debida a eventos de poca profundidad ocurridos en las cercanías del mismo —por fenómenos de fallamiento local en el sector norte del cantón o en el área de Dominical, principalmente— o por motivo de eventos fuera de sus límites territoriales pero percibidos por todos los habitantes y con consecuencias directas en el sitio, se caracteriza por sismos con magnitudes entre bajas y moderadas (desde $M_s = 2.4$ hasta $M_s = 4.2$), con focos relativamente cercanos a la superficie pero con ubicaciones impredecibles y

variadas, ubicándose en puntos muy cercanos al nivel del suelo en ocasiones (7 km de profundidad) o también inaccesibles físicamente para los seres humanos en otras (40 km de profundidad). Estos eventos van en concordancia con lo esperado de la región, debido a sus características espaciales.

La actividad sísmica a lo largo de los años recientes no ha representado pérdidas de peso en la región en estudio, los sismos son frecuentes pero de intensidades moderadas (entre III y V dependiendo de la localidad) en la escala Mercalli Modificada, por lo que los daños materiales han sido pocos.

De entre los últimos años, el 2009 ha sido el que ha contado con un mayor número de eventos percibidos en la región, con un total de 10 a lo largo de ese año.

Los sistemas de fallamiento probables que han sido descritas en las secciones anteriores del informe, y que representan las principales fuentes de amenaza sísmica para el cantón, con potencial para dañar la ciudad cabecera si se presenta una ruptura interna, conforman una buena parte de las fuentes sismogénicas de las cuales han provenidos los fenómenos registrados en por el OVSICORI en el período de reciente actividad sísmológica.

En el cuadro 9.0 se presenta un resumen de todos los sismos percibidos en el cantón de Pérez Zeledón, elaborado con datos recopilados desde el sitio web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (<http://www.ovsicori.una.ac.cr>) y desde los reportes emitidos por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica.

No todos los sismos mostrados en el cuadro tienen origen en el cantón o sus áreas circundantes inmediatas, sin embargo se considera necesario incluir aquellos eventos cuya intensidad fue lo bastante alta como para ser registrada y reportada dentro del cantón, incluso si las fuentes generadoras se encuentran fuera del ámbito local estudiado en dichos casos.

CUADRO 8.0. SISMICIDAD RECIENTE PERCIBIDA EN PÉREZ ZELEDÓN (PERÍODO DE REGISTROS ENTRE 2009 Y EL PRIMER TERCIO DE 2016).								
Fecha D/M/A	Hora	Mb	Profundidad (km)	Localización	Fuente	Región del reporte	Latitud	Longitud
8/5/09	02:33:00	4.7	30.0	12 km Este Ciudad Neily.	Tectónico por Subducción Placa Cocos bajo placa Panamá	Linda Vista, Palmital, Pérez Zeledón, Durika, Punta Burica, Limón, Cartago.	8.672	-82.837
16/5/09	00:57:00	4.6	15.0	15 km Norte de Dominical.	Fallamiento local	Palmital, Dos Bocas de Pérez Zeledón.	9.230	-83.53
9/8/09	15:57:00	4.0	30.0	4 km Sur-oeste de Golfito.	Tectónico.	Zona Sur.	8.607	-83.221
22/11/09	18:19:00	2.6	9.0	Alaska de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallaamiento local.	Palmital y Alaska de Pérez Zeledón.	9.524	-83.661
22/11/09	10:50:00	2.4	14.0	Alaska de Pérez Zeledón	Tectónico por falla local.	Alaska	9.501	-83.677
24/11/09	18:53:00	2.4	14.0	15 km al Noroeste de Pérez Zeledón	Tectónico por fallaamiento local.	Alaska Pérez Zeledón.	9.501	-83.677
25/11/09	22:28:00	2.8	10.0	15 km Noroeste de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallaamiento local.	Alaska, Palmital y Pérez Zeledón.	9.500	-83.678

25/11/09	02:10:00	3.2	7.0	15 km Noroeste de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallamiento local.	Palmital, Alaska y Rivas de Pérez Zeledón	9.500	-83.683
2/12/09	06:45:00	2.9	8.0	15 km al Norte de San Isidro de Pérez Zeledón.	Fallamiento local.	Palmital de Pérez Zeledón.	9.517	-83.680
17/12/09	15:13:00	4.0	30.0	15 km al Noroeste de San Isidro de El General.	Tectónico por fallamiento local.	Zona Sur.	9.480	-83.780
30/3/10	19:12:00	3.8	26.5	14 km al Suroeste de División San Isidro de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallamiento local.	Pérez Zeledón, Palmital, Alaska, Rivas, San Pedro Montes de Oca.	9.484	-83.833
1/4/10	14:50:00	5.2	29.0	26 km al Noroeste de Puerto Cortez.	Subducción placa Cocos bajo micro placa Panamá.	San José Alajuela Heredia San Isidro de Pérez Zeledón Linda Vista Palmital, Zurquí, Zona Sur, Guayabal, Belén.	9.060	-83.718
20/5/10	16:16:00	6.1	10.0	30 km Suroeste de Puerto Quepos.	Subducción de la placa del Cocos por debajo de la microplaca de Panamá.	Canas, Zona sur, Quepos, Valle Central; San José, Pérez Zeledón, Cartago, Puntarenas, Bahía Drake.	9.222	-84.241
22/11/10	08:32:00	3.8	14.0	10 km Noroeste de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Quebradas Arriba de Pérez Zeledón.	9.461	-83.680
8/6/11	18:07:00	3.8	12.5	22 km al Suroeste de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallamiento local.	Pérez Zeledón.	9.298	-83.903

8/6/11	18:04:00	3.7	8.0	22 km al Suroeste de Pérez Zeledón	Tectónico por fallamiento local	Pérez Zeledón.	9.298	-83.903
5/7/11	18:02:00	4.2	15.0	5 km Norte de Dominical, Puntarenas	Tectónico por fallamiento local.	Quepos, Dominical, Pérez Zeledón.	9.298	-83.878
28/9/11	16:25:00	4.4	12.0	16 km Suroeste San Isidro de El General.	Tectónico por fallamiento local.	San José, Heredia, San Isidro de El General.	9.313	-83.878
6/10/11	22:07:00	3.2	27.0	25 km al Noroeste de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Pérez Zeledón, Heredia, San José y Heredia.	9.300	-83.52
9/10/11	18:16:00	3.5	16.0	Cordillera de Tamanaca, 28 km al Norte de Buenos Aires.	Tectónico por falla local.	Buenos Aires, San Isidro de El General, Cerro de la Muerte, Cartago.	9.388	-83.335
9/6/12	08:58:00	4.5	25.0	30 km al Sur de Quepos.	Tectónico por choque de la placa del Cocos con la micro-placa de Panamá.	Dominical, Quepos, Jaco, Pérez Zeledón, Valle Central.	9.160	-84.160
25/6/12	21:16:58	4.1	16.0	2 km al Noroeste de Tres Equis, Turrialba, Cartago.	Fallamiento local.	Turrialba, Pacayas, Siquirres, San Martín de Irazú, Talyutic, Bajo Piedra Grande, Orosi, Pérez Zeledón, Durika.	9.973	-83.585
18/7/12	14:35:00	3.0	10.0	37 km Este de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Pérez Zeledón.	9.380	-83.376
31/8/12	08:13:00	3.8	10.0	8 km al Norte de Playa Dominical.	Fallamiento local.	Pérez Zeledón.	9.324	-83.860

10/1/13	03:08:00	3.6	25.0	10 km al Noroeste de San Isidro de El General.	Fallamiento local.	Pérez Zeledón, Heredia, Cartago.	9.437	-83.626
3/3/13	20:36:00	4.2	20.0	30 km al Sur de Quepos.	Tectónico por subducción	Quepos, Pérez Zeledón, Valle Central.	9.133	-84.137
3/3/13	20:59:00	4.1	20.0	30 km al Sur de Quepos.	Tectónico por subducción.	Quepos, Pérez Zeledón, Valle Central.	9.1265	-84.142
6/3/13	21:56:00	4.5	20.0	35 km al Sur de Quepos.	Tectónico por subducción.	Quepos, Pérez Zeledón, Valle Central.	9.119	-84.157
20/3/13	01:27:00	4.0	7.0	12 km al Oeste de Laurel de Corredores de Puntarenas.	Subducción.	Golfito y Pérez Zeledón.	8.432	-83.066
27/4/13	17:07:00	3.9	37.0	15 km al Sureste de Quepos.	Tectónico por subducción.	Quepos, Pérez Zeledón y Valle Central.	9.340	-84.080
13/11/13	09:26:00	4.2	37.0	5 km Suroeste de San Isidro de El General.	Subducción.	Valle Central y Zona Sur.	9.933	-83.744
24/6/14	19:57:00	3.1	20.0	6 km Norte de Los Ángeles de Pérez Zeledón.	Fallamiento local.	Pérez Zeledón.	9.529	-83.821
16/7/14	16:10:00	4.5	19.0	7 km al Sureste de San Gerardo de Dota.	Fallamiento local.	Valle Central y Pérez Zeledón.	9.520	-83.753
22/10/14	09:46:00	4.0	20.0	4 km Sur de División de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Zona Sur, Río Claro, Pérez Zeledón y Buenos Aires.	9.464	-83.712

22/10/14	09:50:00	3.3	20.0	5 km Sureste de División de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Pérez Zeledón.	9.455	-83.721
15/11/14	07:01:56	2.8	8.8	4.2 km al Norte de San Isidro de Pérez Zeledón.	Tectónico por fallaamiento local.	San Isidro, Peñas Blancas, Palmares de Pérez Zeledón.	9.410	-83.700
26/12/14	17:52:00	6.3	5.0	167 km al Sur de Punta Burica.	Fallamiento de la fractura de Panamá.	Fuerte: Bribri, Talamanca, Pérez Zeledón, San José, Turrialba, Cartago. Leve: San Pedro Montes de Oca, Rohmoser, Pavas, Heredia, Moravia.	6.592	-82.449
3/4/15	12:32:00	4.8	18.0	6 km al Sureste de San Gerardo de Dota	Fallamiento local.	Valle Central, Valle del General.	9.531	-83.752
3/4/15	12:42:00	5.2	18.0	6 km al Sureste de San Gerardo de Dota.	Fallamiento local.	Valle Central, Valle del General.	9.506	-83.754
3/4/15	16:04:00	3.8	19.0	6 km al Sureste de San Gerardo de Dota.	Fallamiento local.	Valle del General.	9.510	-83.755
9/4/15	21:12:00	2.4	4.0	3 km al Sureste de División de Pérez Zeledón.	Fallamiento local.	Alaska, División.	9.487	-83.678
18/4/15	20:37:00	2.5	14.0	3 km Noroeste de Alaska de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Fuerte en Pérez Zeledón.	9.562	-83.618

1/8/15	06:47:00	4.1	16.0	5 km al Sureste de San Gerardo de Dota.	Fallamiento local.	San Isidro de El General y Valle Central	9.524	-83.765
23/11/15	20:27:00	4.0	60.0	7.5 km al Noreste de Piedras Blancas, Osa, Puntarenas.	Deformación de la placa del Cocos.	San Isidro de El General, Buenos Aires de Puntarenas.	8.819	-83.181
17/1/16	18:46:22	4.4	31.0	10.8 km al Sureste de San Gerardo de Dota, Dota, San José.	Fallamiento local.	Pérez Zeledón, Valle Central.	9.470	-83.800
5/2/16	02:24:00	3.7	42.0	4.8 km Sur del Porvenir de Parrita, Puntarenas.	Subducción.	Atenas, Alajuela, Quebradas de Pérez Zeledón.	9.540	-84.245
7/4/16	03:25:00	3.3	7.0	4 km Noroeste de Rivas de Pérez Zeledón.	Fallamiento Local.	Rivas, Quebradas y Pérez Zeledón.	9.439	-83.695
21/4/16	23:08:00	3.5	25.0	8 km Norte de San Isidro de El General.	Fallamiento Local.	Pérez Zeledón y leve en el Valle Central.	9.425	-83.751

Fuente: OVSICORI; realizado en Microsoft Excel 2013

Amenaza sísmica

Selección de la metodología a utilizar (funciones de atenuación)

En este apartado se pretende definir la amenaza sísmica del cantón de Pérez Zeledón, siendo esta una de las tres principales etapas que conforman el proyecto, e iniciada con el estudio de la sismicidad y tectónica de la región. Posterior a la estimación justificada de la amenaza sísmica se procede a determinar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones (viviendas y edificios comerciales de trescientos metros cuadrados o menos) encontradas en la región en estudio que ya se ha establecido antes y, haciendo uso de resultados obtenidos al resolver ambos parámetros se da paso a la elaboración de mapas de riesgo para la zona, siendo estos los productos definitivos, más explicativos y simplificados obtenidos a través de este estudio en el cantón de Pérez Zeledón.

La vulnerabilidad sísmica se presenta mediante un criterio cualitativo, mostrado a través de los grados de daño esperados, y dependiente de variables como la intensidad sísmica de los terremotos modelados con base en los datos históricos de aquellos sentidos y que han repercutido de algún modo en la estabilidad normal de la ciudad de San Isidro de El General y el cantón en general.

En el capítulo 2 sobre las generalidades asociadas al desarrollo de este proyecto se realizó una breve descripción de las metodologías existentes para la estimación de la amenaza sísmica de una zona en estudio, siendo básicamente dos las mencionadas como principales: la primera basada en una aproximación determinística, y la segunda basada en una aproximación probabilística.

En este estudio, dado que los análisis probabilísticos para calcular la amenaza sísmica de una región requieren de extenso escrutinio y gran cantidad de detalle, así como de modelos computacionales complejos y poco prácticos a la hora de ser considerados para un proyecto cuyos objetivos no se centran en la determinación de este parámetro específico sino en la vulnerabilidad de las estructuras ocupadas por los habitantes, se opta por el método determinístico para la evaluación del peligro sísmico, ya que este ofrece productos con aceptable veracidad y suficiente detalle, además

de ser más sencillos en aplicación y basarse en registros históricos para obtener el criterio necesario para modelar el escenario —o en este caso escenarios— más crítico al cual podría enfrentarse el terreno de la región y estar expuestas las viviendas y demás edificaciones.

Lo que se busca con esta metodología es integrar el conocimiento sismológico asociado a la configuración tectónica de la región para determinar con ello el grado de intensidad sísmica probable que podría ocurrir en esta. Contrario al método probabilístico, que permite asociar al terreno probabilidades de ocurrencia con ciertos niveles de intensidad, el método determinístico lo que consigue es obtener valores absolutos al evaluar el escenario sísmico inferido a través del potencial de la zona y la sismicidad de la misma.

Para definir la amenaza sísmica en Pérez Zeledón, se utiliza este método, y se decide llevar a cabo un análisis haciendo uso de varios escenarios sísmicos basados en la información registrada y las evidencias de actividad tectónica recolectadas sobre las condiciones geológicas y sísmicas del sitio, considerando así los efectos de estos hipotéticos eventos probables en el área comprendida por el distrito representativo del cantón (San Isidro de El General, la ciudad y los alrededores de esta).

Los pasos básicos a seguir para la aplicación de la metodología determinística ya han sido citados en el capítulo 2 de este informe, sin embargo es importante abordar cada aspecto antes mencionado superficialmente y, desarrollarlo para conseguir los resultados buscados.

Contando con la información histórica y reciente de las fuentes sismológicas activas se procede a considerar el porqué es importante haber definido y caracterizado estas fuentes en primer lugar.

El peligro inducido por los fenómenos sismológicos debe ser categorizado y estudiado de modos específicos, ya que estimar el movimiento relativo de la corteza terrestre a causa de los sismos es un proceso complejo y en primera instancia confuso. Para poder organizar la información medida y con ello lograr representar una versión adecuada y hasta cierto punto simplificada de la realidad de los sismos, a través de simulaciones y modelos de análisis, es necesario definir y organizar en una base de datos los parámetros indicativos del nivel de peligro de un sismo. En el informe T1-3 de ERN-CAPRA a estos parámetros precisos se les llama “parámetros de movimiento fuerte” y

su propósito es el de determinar la intensidad de la sacudida sísmica en el sitio de análisis.

Los parámetros de movimiento fuerte son estimados a través de las ecuaciones de atenuación, funciones dependientes de variables como la distancia de la fuente sismogénica al sitio de análisis, la magnitud del evento sísmico y el tipo de mecanismo al que obedece la ruptura del evento considerado.

La relación de atenuación entre el movimiento de punto focal y el terreno es una particularidad natural que se considera tanto en los métodos de análisis probabilísticos como determinísticos, y es representada por las funciones de atenuación, o como se conocen en inglés: ground motion prediction equations (GMPE).

Las ecuaciones de predicción describen el accionar y paralelismo existente entre un parámetro "Y" de movimiento de terreno (siendo este identificado como PGA, PGV, MMI o PSA, según los diferentes períodos), la magnitud del terremoto "M" y la distancia fuente-sitio "R"; considerando además la participación de un valor residual o de incertidumbre, expresado como " δ ". Esta equivalencia es denotada como:

$$\ln(Y) = f(M, R) + \delta. \quad (1)$$

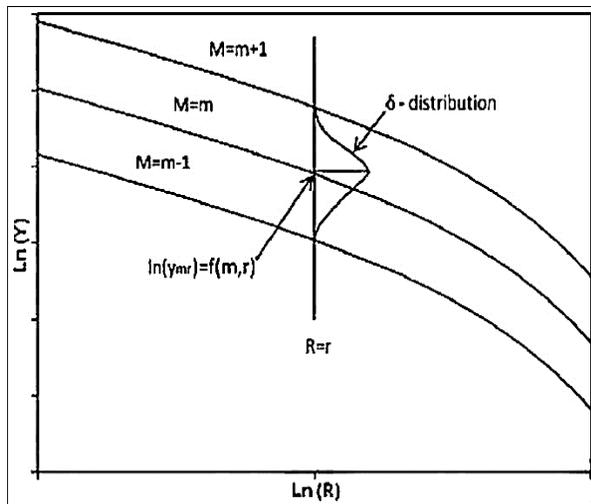


Figura 19.0. Relación esquemática de las funciones de atenuación.
Fuente: Wang, 2010.

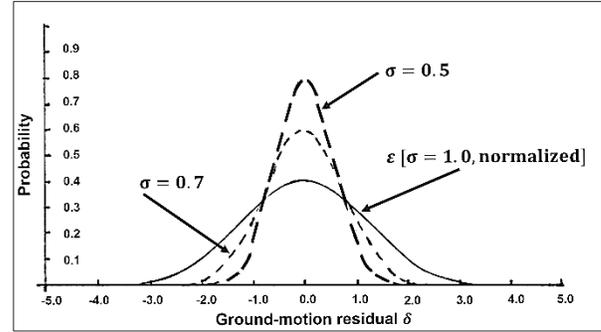


Figura 20.0. Función de probabilidad del parámetro δ , donde ϵ es el residual normalizado y representa a la distribución de probabilidades para una desviación estándar constante igual a una unidad.
Fuente: Wang, 2010.

Las funciones de atenuación representan y predicen el movimiento del terreno en un marco espacial. La incertidumbre " δ " es modelada como una función probabilística de distribución normal, con una cierta desviación estándar " σ ". Por lo tanto, la ecuación (1) puede también reflejarse de la siguiente manera:

$$\ln(Y) = f(M, R) + \epsilon\sigma. \quad (2)$$

Esta reestructuración de la función general es importante ya que el parámetro " ϵ " no depende de la magnitud "M" ni de la distancia "R", al tener una desviación estándar constante, mientras que la incertidumbre δ sí depende de una de estas dos variables, o de ambas, como ha sido especificado por Youngs, Abrahamson y Silva, y Boore (como se citaron en Wang, 2010).

Por su parte, la magnitud es un parámetro constante e independiente de cada evento, mientras que la distancia fuente-sitio es una variable que puede ser considerada y medida de dos formas: como la distancia más corta hasta la superficie de ruptura " R_{RUP} " o la distancia más corta hasta la proyección superficial de la ruptura " R_{JB} ".

La magnitud, como ya es sabido, está directamente relacionada con la cantidad de energía que es liberada en el momento en que ocurre una ruptura interna en la corteza terrestre, específicamente con la porción de esta energía que es expresada como ondas sísmicas y que se desplazan usando el medio rocoso que las rodea como medio. En debido a su forma de propagación que la magnitud se encuentra relacionada con la intensidad de un sismo, lo cual significa que los principa-

los efectos que pueden ser atribuidos a la magnitud en consecuencia a un sismo son: el aumento en la amplitud de la intensidad, la variación en el contenido frecuencial y el aumento en la duración de la vibración.

A medida que las ondas se desplazan por el medio rocoso, son absorbidas parcialmente y progresivamente por los materiales por los que transitan. Como resultado, la energía por unidad de volumen varía en función de la distancia. Dado que la intensidad está relacionada con la energía de las ondas, se encuentra también relacionada con la distancia. (ERN-CAPRA, T1-3)

Como se especificó previamente, la distancia fuente-sitio puede ser considerada de dos maneras diferentes, esa categorización presentada es preliminar, las más básicas y generales

que pueden considerarse, esto debido a que correspondía a la introducción sobre los componentes de las funciones de atenuación; sin embargo, esa subdivisión no quiere decir que esas dos aproximaciones sean las únicas disponibles para aplicar una función de atenuación. En realidad, se han desarrollado ecuaciones de predicción que utilizan distintos parámetros de movimiento fuerte para calcular la intensidad probable y los niveles de peligro. En el informe ERN-CAPRA T1-3 se destacan cinco distintos tipos de distancias entre el sitio y un sector importante relacionado al movimiento sísmico, estas distancias están definidas en función de la manera en que caracterizan el origen del movimiento vibratorio en la corteza. Las mismas se muestran a continuación en la figura 21.0.

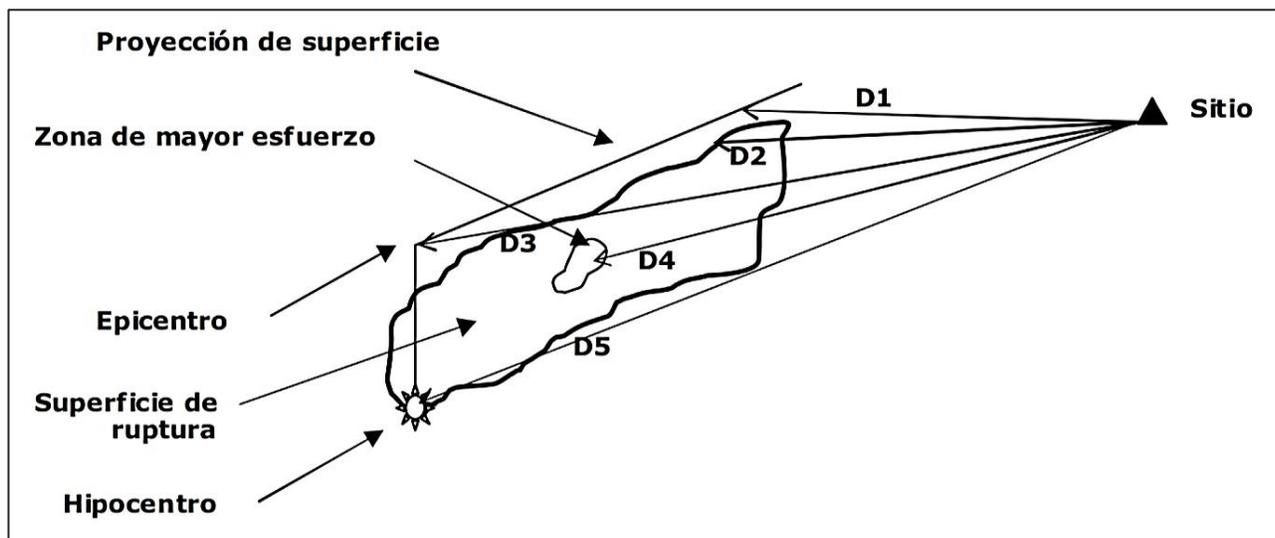


Figura 21.0. Distancias entre un sitio de estudio y ciertos puntos relacionados al origen de un evento sísmico, empleadas en las funciones de atenuación.

Fuente: informe ERN-CAPRA T1-3.

La distancia identificada como “D1” hace referencia al segmento medido desde el sitio hasta la proyección en superficie del plano de falla; “D2” se refiere a la distancia hasta la superficie de falla; “D3” corresponde a la distancia hasta el punto epicentral; “D4” es la longitud medida desde el sitio en estudio hasta la zona en la superficie de falla en la cual se haya registrado la mayor liberación de energía; y finalmente, “D5” alude a la distancia existente entre el sitio y la región hipocentral.

Determinar cuál de las distancias —o en todo caso funciones de atenuación— utilizar, depende enteramente de cuál sea aquel parámetro que se está buscando calcular para expresar la intensidad.

La intensidad —y por ende la amenaza sísmica—, como se indicó superficialmente en el capítulo 2 de este informe, puede ser estimada a través de diversas propiedades de la sacudida sísmica, tales como: la aceleración máxima del terreno, la velocidad máxima de las ondas a través del medio rocoso, el desplazamiento del terreno,

la duración del evento sísmológico, la amplitud del espectro de Fourier, etc.

Estos valores son denominados “parámetros de amplitud” y su cálculo se realiza a partir de regresiones fundamentadas en los conjuntos organizados de datos históricos disponibles para las zonas estudiadas, considerando, claro, la calidad de los instrumentos con los que se han obtenido los registros y, por ende, la de los datos mismos.

Dado el hecho de que la aceleración máxima es el parámetro de amplitud más documentado y utilizado alrededor del mundo para definir la intensidad de un sismo tanto por comodidad como por la simpleza relativa relacionada con su obtención, y dado también que se cuenta con referencias suficientes para trabajar el tema desde una perspectiva que se base en este, se escoge la aceleración máxima como parámetro para representar el movimiento del terreno en la próxima determinación del peligro sísmico para la región central de Pérez Zeledón.

Se acude a la medida de la aceleración por dos razones principales, la primera es el reconocimiento de que optar por este criterio de determinación es el más ampliamente utilizado por investigadores para la estimación del peligro sísmico y, la segunda es la necesidad de seleccionar con la menor demora posible un modelo de atenuación que involucre las propiedades del medio transmisor y la distancia fuente-sitio para evaluar la amenaza del área en estudio, esto último debido a que el propósito principal de este proyecto no es el de llevar a cabo un escrutinio exhaustivo sobre las fuentes sísmicas y con ello ejecutar un análisis detallado de la amenaza sísmica del cantón de Pérez Zeledón, sino que es determinar la vulnerabilidad de las estructuras construidas en los centros con mayor concentración demográfica de la región ante la actividad sísmica inherente del sitio, razón por la cual se decide no invertir la mayor parte del tiempo disponible en la aplicación de varios modelos para evaluar el peligro de que ocurra un evento sísmico sino que simplemente se busca generar una representación gráfica (un mapa explicativo) que pueda mostrar las aceleraciones pico del terreno para los distintos escenarios probables que se propondrán y definirán específicamente para este estudio y zona.

Un sinnúmero de funciones de atenuación de aceleración máxima han sido desarrolladas a nivel mundial en las últimas 4 décadas, dada la alta relevancia de este insumo dentro de los análisis de amenaza

sísmica. En un marco más local en relación con América Central, se han realizado estudios que utilizan bases de datos del movimiento fuerte para desarrollar relaciones de atenuación propias del entorno sísmico y neotectónico del continente. (ERN-CAPRA, T1-3)

Uno de los estudios con mayor relevancia para el marco de investigación local es el realizado por Climent et al. (1994), en el cual se tomaron los datos de doscientos dieciocho registros acelerográficos provenientes de Centroamérica, de estaciones ubicadas en Costa Rica, Nicaragua y el Salvador; así como sesenta y dos registros extra, de magnitudes elevadas, adquiridos desde la red acelerográfica de Guerrero, México. De los registros centroamericanos, ciento cincuenta y cinco fueron tomados en Costa Rica, y los restantes sesenta y tres se obtuvieron de las estaciones nicaragüenses y salvadoreñas.

A partir de los datos registrados, los autores del estudio realizaron una regresión basada en la metodología bayesiana, que obedece al principio/teorema de Bayes, mismo que explica que se puede obtener la probabilidad condicionada de un evento aleatorio “A” dado un valor de entrada “B” en términos de distribución de probabilidad condicional de “B” si se cuenta con “A”, lo cual es ideal para estudios relacionados a temas de sismicidad.

De la regresión realizada se obtuvo la siguiente ecuación de predicción de movimiento del terreno:

$$\ln \text{PGA} = A + B + C \quad (3)$$

Con:

$$A = -1.687 + 0.553M \quad (3.1)$$

$$B = -0.537 \ln R - 0.00302R + 0.327S \quad (3.2)$$

$$C = \sigma_{\text{PGA}} \quad (3.3)$$

Donde:

- PGA: siglas correspondientes a peak ground acceleration, término traducido como “aceleración pico del terreno”. Se expresa en m/s^2 .
- $M = M_w$: magnitud de momento de un evento.
- $R = D_5$: distancia entre el sitio y la región hipocentral. Se expresa en km.

- S: parámetro indicativo de la geología propia de la zona en estudio. Se considera $S = 0$ en roca y $S = 1$ en suelo.
- σ_{PGA} : desviación estándar relacionada con el método de cálculo. Para esta expresión se considera $\sigma_{PGA} = 0.75$.

Otra relación de atenuación de onda sísmica que podría ser considerada es la desarrollada por Schmidt et al. (1997), quienes realizaron una regresión contando con doscientos registros de sacudidas con magnitudes de momento de entre $M_w = 3.3$ hasta $M_w = 7.6$, y valores de "R" en un rango de 6 km hasta 200 km. Todos los eventos registrados para la elaboración de ese estudio ocurrieron en territorio costarricense, entre los años de 1987 y 1996.

El trabajo de Schmidt, Dahle y Bungum determinó relaciones de atenuación separadas para los casos de eventos intraplaca y aquellos ocurridos por subducción. Para los sismos generados intraplaca se obtuvieron relaciones de atenuación tanto para las distancias hipocentrales

como epicentrales, empleando siempre la mayor de las aceleraciones horizontales registradas por los acelerógrafos. Para los eventos causados por subducción solamente se obtuvieron ecuaciones de predicción de movimiento del suelo para distancias hipocentrales, aunque de igual forma se tomó en consideración siempre la mayor aceleración del registro.

Para estos casos, la función de atenuación general empleada fue la siguiente:

$$\ln PGA = C_1 + C_2M + C_3 \ln R C_4R + C_5S_1 + C_6S_2 \quad (4)$$

En donde, a través de la regresión y los procedimientos seguidos llegaron a determinar los coeficientes que multiplican a cada parámetro según la condición de análisis, incluyendo además, las desviaciones estándar correspondientes según el tipo de regresión efectuada: σ_{bay} para la desviación referente a la regresión bayesiana, y σ_{LS} para la desviación estándar de la regresión por mínimos cuadrados.

CUADRO 9.0 COEFICIENTES DE ATENUACIÓN PARA GMPE BASADAS EN EL PARÁMETRO DE ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO, SEGÚN LA CONDICIÓN DE ANÁLISIS

Descripción	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	σ_{bay}	σ_{LS}
Todos los datos. Tomando los dos componentes horizontales de aceleración.	-2.005	0.609	-0.603	-0.003	0.173	0.279	0.74	0.73
Todos los datos. Tomando la mayor componente horizontal de la aceleración.	-1.589	0.561	-0.569	-0.003	0.173	0.279	0.80	0.78
Sismos intraplaca. Considerando la distancia hipocentral.	-1.725	0.687	-0.743	-0.003	0.173	0.279	0.83	0.82
Sismos intraplaca. Considerando la distancia epicentral.	-2.091	0.694	-0.679	-0.003	0.198	0.315	0.84	0.82
Sismos debidos a subducción.	-0.915	0.543	-0.692	-0.003	0.173	0.279	0.74	0.67

Fuente: Schmidt et al., 1997; realizado en Microsoft Excel 2013

En 2014 se publicaron los resultados de una nueva investigación fue conducida por Schmidt para determinar ecuaciones de atenuación aplicables a toda Centroamérica, utilizando registros de sismos ocurridos entre 1972 y 2010; en la investigación se determinaron ecuaciones de atenuación para sismos corticales, con registros de toda América Central y, para sismos por subducción utilizando registros de acelerógrafos ubicados en Costa Rica. A

nivel general, los coeficientes resultantes del estudio demostraron ser estables y contar con un comportamiento similar a lo largo de todo el rango de períodos usados en ese estudio, mostrando variantes concordantes con el proceso propio de cada variable independiente de las ecuaciones de atenuación. No obstante, el estudio también concluyó que la desviación estándar obtenida es muy alta en comparación con aquella obtenida para estudios de naturaleza similar.

Por otra parte, los resultados del estudio de Schmidt, (2014) fueron comparados con los obtenidos por Schmidt et al. (1997) y se determinó que a nivel comparativo, los coeficientes inferidos fueron menores para todas las distancias hipocentrales, probablemente debido al método de regresión utilizado, el cual fue el de mínimos cuadrados ya que una regresión bayesiana probó ser inaplicable debido a que se desestabilizó con los datos para la regresión.

El estudio de Schmidt, (2014), si bien no entró en conflicto con otros realizados por diferentes autores si mostró discordancia de resultados con estos, entregando coeficientes más bajos para los tipos de suelos considerados tanto en ese estudio como en estudios previos.

En este estudio de vulnerabilidad de edificaciones y riesgo sísmico de la zona central de Pérez Zeledón, se selecciona la función formulada por Climent et al. (1994). Se elige mediante un criterio conservador, basado la simplicidad de aplicación y en el hecho de que esta ecuación ya ha sido empleada para evaluar la amenaza sísmica, incluso en nuestro propio país, en estudios como los realizados por Climent et al. (2003) y Jiménez (2012), de los cuales se pueden tomar referencias para el proceso de aplicación y evaluación general del peligro.

A pesar de haber seleccionado una metodología determinista para satisfacer el objetivo de evaluar la amenaza, es necesario aclarar que este método de análisis tiene importantes limitaciones, como por ejemplo:

- DSHA está basado en características tectónicas, sin embargo tiende a ser un método demasiado conservador al tomar el máximo sismo posible (MCE, por sus siglas en inglés) que una falla es “capaz” de generar y colocarlo en la locación de la falla más próxima el sitio de estudio.
- Mientras que tiene la ventaja de ser una metodología simple, la evaluación determinista no desarrolla las incertidumbres de la mejor manera, se presta para que estadísticas rudimentarias sean incluidas en el proceso al incluir una desviación estándar mayor al promedio en cada paso (magnitud, PGA, etc.) lo cual puede resultar en un resultado aproximado bastante conservador.
- El no considerar la probabilidad de que un evento determinado ocurra en una falla es una limitante, ya que resta precisión a los

resultados si se comparan con la realidad y, por ende, puede influir en la toma de decisiones de mitigación menos óptimas.

- La frecuencia de ocurrencia no es considerada explícitamente en el método. Esto quiere decir que la característica temporal, o más bien, el intervalo de ocurrencia y su respectiva incertidumbre, no es referido y más bien es ignorado en muchos métodos de evaluación determinística.
- Al igual que no considera la probabilidad de que un evento —o escenario propuesto— ocurra en un sitio determinado, tampoco se detiene a estudiar las variables involucradas en la generación de un sismo como el propuesto para llevar a cabo un análisis, en otras palabras no calcula la probabilidad de que un escenario propuesto ocurra dentro de un marco temporal dado.

Procedimiento a seguir para evaluar la amenaza sísmica

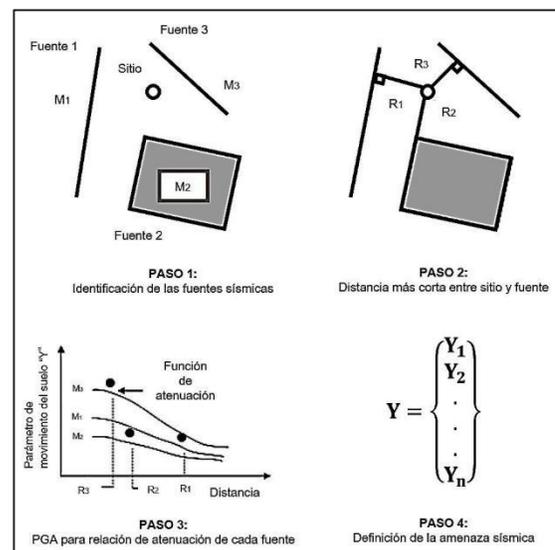


Figura 22.0. Esquema descriptivo para mostrar los pasos secuenciales del DSHA.

Fuente: Introduction to seismic hazard analysis, Anbazhagan.

Tomando en cuenta que se llevará a cabo un análisis determinístico de la amenaza sísmica para poder conocer con mayor detalle el comportamiento del área de estudio, se procede a verificar el cumplimiento de los pasos mostrados en la figura

22.0., la cual muestra las pautas generales a seguir para poder completar un estudio de amenaza.

El primer paso considerado es la identificación y definición de las fuentes sísmicas con el potencial para generar eventos que afecten a la localidad estudiada, punto que, ha sido trabajado previamente en este capítulo, en la sección relacionada con la tectónica y sismicidad.

Para establecer las características de estas fuentes se definió el marco tectónico regional, considerando tanto los sistemas de fallamiento internos como la configuración de las placas litosféricas de Cocos, Caribe y Nazca; y la micro-placa de Panamá. Seguidamente se redujo el ámbito hasta el área de interés, haciendo una revisión de las fallas activas que podrían causar desastres en esta locación y considerando la sismicidad que son capaces de generar. Se concluye que el peligro más cercano e inmediato es la falla de Buenavista, falla sobre la cual se tiene importante información referente a eventos pasados y a su rumbo de fallamiento con sentido N-S; sin embargo son datos inferidos y existen incertidumbres válidas respecto a esta fuente sismogénica y a su actividad, por lo que algunos autores ponen en duda que haya sido la causa del terremoto de Buenavista de 1983, tal y como lo indican Mora y Peraldo (2011). Otro punto que ha sido discutido es la longitud de la falla, aunque la longitud más aceptada y referida en la literatura es de 11 km.

A partir de los detalles expuestos en la definición del marco tectónico del área, se procedió a identificar los eventos sísmicos asociados con los procesos de fallamiento local, los ocurridos en los últimos años (se realizó un recuento de los sismos percibidos y que generaron alguna clase de impacto en el cantón de Pérez Zeledón desde Enero de 2009 hasta Abril de 2016). Así también, se expusieron y describieron los efectos de los sismos más relevantes en el historial del cantón, según lo que se ubicó investigación de fuentes de bibliográficas realizada; aunque cabe resaltar que muchos de los eventos históricos fueron registrados por medio de testimonios y relatos de habitantes de la región, e incluso sobre el terremoto más relevante ocurrido en la zona no se cuenta con información exacta, debido a que no habían sismógrafos en los alrededores de Pérez Zeledón en las fechas en que el sismo tuvo lugar, y el que tomó registro (en San José, en el Gran Área Metropolitana "GAM") del evento contó con dificultades circunstanciales, ya que antes del evento principal ocurrió un sismo

precursor que impidió conocer con precisión detalles como la ubicación del evento.

La información para generar la base de datos sobre la sismicidad histórica y reciente en el cantón de Pérez Zeledón provino principalmente del OVSICORI, la Red Sismológica Nacional y reportes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.

Tras haber reunido y organizado la información pertinente el primer paso del procedimiento determinístico para el cálculo de la amenaza sísmica concluyó.

Antes de especificar las distancias mínimas entre las fuentes sismogénicas y el sitio de estudio, fue necesario escoger la función de atenuación a emplear en la evaluación, misma que corresponde a la ecuación (3), especificada anteriormente, y que ha sido utilizada en otros estudios de características similares a las de este (Jiménez (2012), Villanueva (2015), Climent et al. (2003), etc).

Conociendo las fuentes sísmicas y sus longitudes es posible conocer el potencial sísmico de estas. Una vez definido el potencial sísmico y la distancia mínima entre las fuentes al sitio de estudio (segundo paso del procedimiento) se debe proceder a revisar la función de atenuación seleccionada para el estudio, para analizar qué pasos a seguir con el fin de determinar el nivel de intensidad sísmica en la zona seleccionada como representativa del cantón de Pérez Zeledón, dada la ocurrencia de un sismo con una magnitud determinada.

Al considerar las variables independientes de la ecuación predictiva del movimiento del terreno, los pasos a cumplir antes de su aplicación quedan claros. Para obtener la aceleración pico es necesario contar con la magnitud de momento "Mw", la distancia hipocentral "R", y el parámetro "S" indicativo del tipo de configuración y contenido geológico de la región en estudio, las características de su geología.

Los primeros dos parámetros serán especificados en función del escenario planteado para evaluar la amenaza sísmica, es decir, corresponderán a aquellos valores esperados para el terremoto máximo creíble "MCE", el cual se definirá tomando en consideración el potencial sísmico de la falla de Buenavista, así como la profundidad crítica a la que podría ocurrir el evento.

Queda claro, entonces, que para poder especificar un escenario sintético para la evaluación de la amenaza sísmica, es necesario dar una idea

más sólida sobre la geología del cantón, el significado integral de “terremoto máximo creíble”, y el nivel de amenaza sísmica regional.

Geología

Los sismos son fenómenos que implican una ruptura de material rocoso en el interior de la corteza terrestre, así como la liberación de energía elástica por medio de grandes cantidades de calor y vibraciones, vibraciones con ciertas frecuencias, amplitudes y longitudes de onda. Las vibraciones provocadas por la liberación inesperada de energía — como todo tipo de onda mecánica—, requieren de un medio para poder viajar, ese medio por el cual se transmiten es el mismo material rocoso circundante que atraviesan. Es por eso que las cualidades geológicas del área en la cual tienen influencia los sismos condicionan a estos, afectando directamente los valores de aceleración del terreno y, por ende, los de intensidad sísmica. De igual forma, para la simulación de eventos sísmicos que es propuesta más adelante, la geología resulta ser un factor importante, razón por la cual es considerada dentro de la ecuación de predicción de movimiento del suelo.

Dado que este estudio fue realizado por un solo investigador y que no hubo posibilidad de contar con los recursos y/o contactos necesarios para llevar a cabo un estudio geológico exhaustivo de la zona analizada —y que dicho tema es lo suficientemente amplio como para abarcar un trabajo de investigación exclusivo para sí mismo y centrarse en este iría en contra de los objetivos de

este proyecto—, los datos presentados en referencia al tipo de suelo y subsuelo de cantón provienen de fuentes externas, como lo son Alvarado et al. (2009) y el Atlas de Costa Rica en su versión 2014; entre otros.

Desde una perspectiva sismológica, para suelos con baja rigidez, los valores de aceleración sísmica serán mayores en comparación con aquellos que puedan presentarse en un sitio con suelos de alta rigidez, incluso para eventos con magnitudes equivalentes. Es decir, la peligrosidad para las estructuras y las obras de infraestructura de una región en particular será mayor si los suelos de dicha región son en su mayoría categorizados como blandos.

Los suelos pueden clasificarse de muchas maneras, dependiendo de cuál sea la propiedad que se busca individualizar como representativa de estos materiales, ya sea para uno o múltiples fines prácticos. En geotecnia es usual considerar la resistencia al corte, el tamaño de granos, la adherencia y otras características físicas como determinantes de categorizaciones. En ciencias agrícolas los suelos pueden clasificarse según su funcionalidad como preservador de material orgánico y estimulador del crecimiento de este material. En sismología es de suma importancia conocer el suelo en función de los efectos que este tendrá sobre las ondas sísmicas una vez que estas incidan en él.

En general, para la última disciplina, los suelos pueden clasificarse de forma válida en cuatro casillas principales, en función de la dureza y rigidez que posean, tal y como se muestra en el cuadro 11.0.

CUADRO 10.0. TIPOS DE SUELOS		
Tipo	Nombre	Descripción
S1	Roca	Rocas volcánicas efusivas (basaltos y andesitas), intrusivas (granodioritas, monzonitas, gabros y sienitas), metamórficas (cornubianitas), poco fisuradas, con una velocidad de la onda cortante de 2500 a 4000 m/s.
S2	Firme	Rocas sedimentarias (arenitas, lutitas, calizas, brechas y conglomerados), rocas volcánicas (flujos piroclásticos, lavas y lahares), con espesores de arcilla inferiores a 20 m, y velocidades de la onda de 1500 a 1700 m/s.
S3	Blando	Rocas volcánicas (lavas y depósitos piroclásticos = fuertemente alteradas, donde los niveles freáticos son altos, los espesores de arcilla de hasta 10 m sobre el suelo tipo S2 y velocidad de onda cortante de 800 a 1200 m/s.

S4	Muy Blando	Rocas volcánicas (lahares, cenizas y tobas), rocas sedimentarias (diatomita, lacustres y lutitas), depósitos recientes (aluviones y coluviones), de baja calidad mecánica, con niveles freáticos someros, son las rocas fuertemente alteradas, espesores de arcilla mayores a 50m sobre suelo tipo S1, S2 y S3, y con velocidad de onda cortante de 235 a 300 m/s.
-----------	-------------------	--

Fuente: LIS-UCR; realizado en Microsoft Excel 2013.

De acuerdo con lo mencionado en la sección sobre la topografía y tectónica de la región en estudio, el cantón de Pérez Zeledón debe su composición en términos de suelo a las condiciones litológicas de la Cordillera de Talamanca, que está caracterizada principalmente por la presencia de grandes cuerpos intrusivos de granitoides y rocas sedimentarias, localmente metamorizadas, al igual que lavas subordinadas en la configuración estratigráfica, presentes en la zona probablemente por la existencia de cuerpos sub-volcánicos.

Referente a otras geoformas recientes, encontramos al menos cuatro diferentes niveles de terrazas aluviales y coluvio-aluviales a los largo de los ríos principales de la región, indicios de los pasados períodos de agradación/erosión aluvial por los períodos interglaciares y glaciares, así como por avenidas fluviales. (Alvarado, et al., 2009)

A nivel estratigráfico, en San Isidro de El General se pueden identificar siete unidades litográficas principales, enumeradas también en Alvarado et al, (2009), partiendo de su edad geológica (de más antigua a más joven) las unidades son:

- Rocas sedimentarias, las de mayor variedad en la región, clasificadas en: 1. Lutitas negras, areniscas y conglomerados; 2. Lutitas y areniscas; 3. Brechas volcano-sedimentarias; 4. Lutitas y areniscas; 5. Conglomerados y areniscas aluviales y 6. Depósitos aluviales, coluviales y glaciáricos.
- Las rocas ígneas, las cuales están divididas en dos grandes grupos: cuerpos intrusivos, y cuerpos volcánicos.

- Cornubianitas, producto del metamorfismo de contacto.

Esta variedad de unidades ha sido observada en campo y puede apreciarse incluso desde aerofotos de la región, sin embargo, es de interés general aclarar que entre estas unidades litográficas deberían existir relaciones físicas claras para explicar su procedencia e interacción en la zona, pero el caso es que para varias de las unidades no se tiene certeza de qué relación estratigráfica guardan con las otras unidades, lo cual puede deberse a problemas por la cobertura vegetal de los suelos, ausencia de afloramientos o por estar en planos de falla.

Una descripción detallada referente a lo que es conocido en la actualidad respecto a las relaciones estratigráficas de las unidades litográficas presentes en la región central del cantón de Pérez Zeledón puede encontrarse en Alvarado et al. (2009), donde se desvela a profundidad la caracterización física de cada una de ellas.

La distribución de estos suelos indica la gran variedad del sector en términos geológicos, mostrando que en la región hay diferentes estratos dispersos dependiendo de la elevación y la ubicación espacial dentro del territorio cantonal, con interacciones entre los mismos que aún resultan desconocidas.

Alvarado et al. (2003) en la Revista Geológica de América Central, en la serie "Colección de mapas geológicos", presentan un mapa del distrito de San Isidro de Pérez Zeledón, en el cual se puede observar gráficamente la distribución de suelos del sitio.

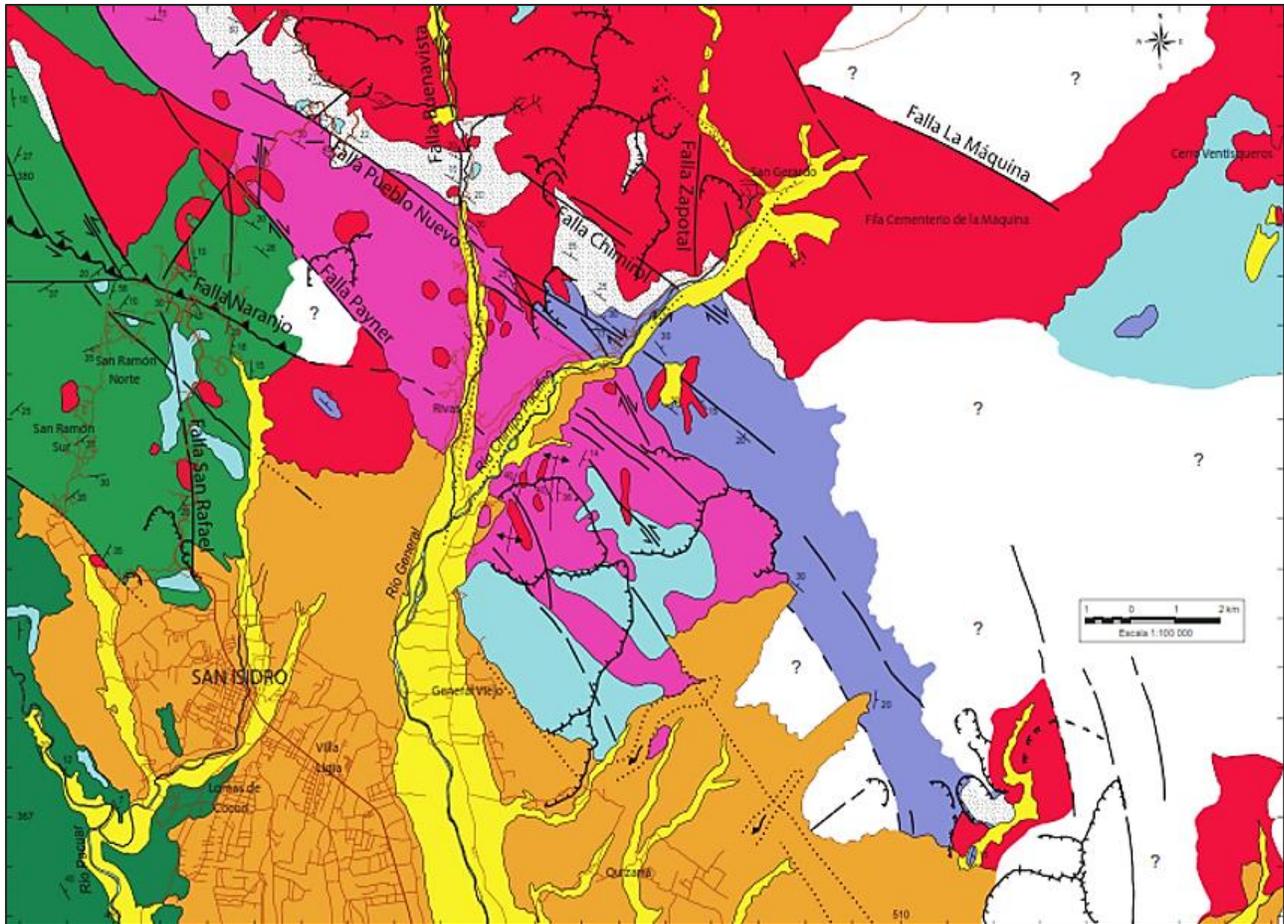


Figura 23.0. Mapa geológico de San Isidro de El General.
Fuente: Alvarado et al. (2003); Revista Geológica de América Central.

CUADRO 11.0. SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA PARA SAN ISIDRO DE P.Z.					
Rocas ígneas y de metamorfismo		Rocas sedimentarias		Sedimentos	
	Cuerpos intrusivos (G. Comagmático de Talamanca).		Lutitas y areniscas (Peña Negra).		Depósitos aluviales, coluviales y glaciáricos.
	Cuerpos volcánicos (La Cruz).		Brechas volcano-sedimentarias.		Conglomerados y areniscas aluviales (Valle El General).
	Cornubianitas.		Lutitas y areniscas (Carai-gres).	?	Litología indeterminada.
			Lutitas negras, areniscas y conglomerados (Térraba).		

Fuente: Alvarado et al. (2003); Revista Geológica de América Central; realizado en Microsoft Excel 2013.

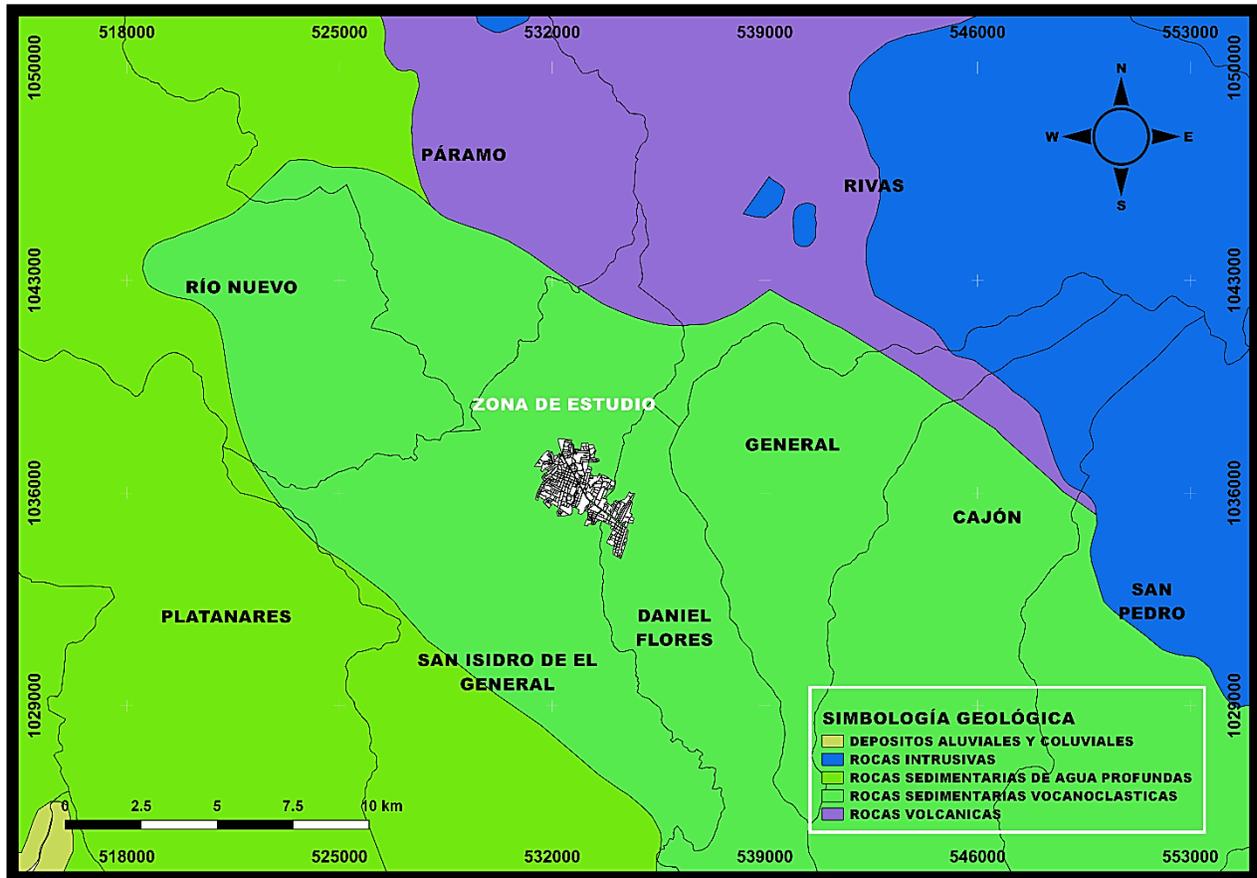


Figura 24.0. Geología local y circundante para el área en estudio.
Fuente: Atlas de Costa Rica versión 2014; realizado en QGIS 2.14.

Considerando el mapa geológico, se puede notar que el área de mayor concentración urbana está construida en suelos que podrían considerarse firmes (tipo de suelo S2), ya que corresponde a conglomerados y areniscas aluviales. De forma paralela, en el Atlas de Costa Rica el área de estudio se muestra ubicada sobre rocas sedimentarias volcanoclasticas, siendo congruente esta visión más general del marco geológico existente en la región con lo mostrado en el mapa de Alvarado et al. (2003).

Con estas observaciones se puede considerar el valor de la variable “S” en la ecuación de atenuación, además, se debe indicar y hacer hincapié en el hecho de que las condiciones de geología superficial de la zona de estudio tendrán influencia no solamente en la propagación de las ondas sísmicas sino también en la vulnerabilidad de la estructura, ya que el estado y las condiciones del lugar de cimentación son condiciones a tomar

en cuenta a la hora de determinar la vulnerabilidad de cada estructura.

En el caso de la ciudad de San Isidro, el tener suelos firmes es una condición favorable en cuestiones de propagación sísmica, ya que al considerar el efecto de los suelos, entre mayor sea la rigidez menor será la velocidad de onda y la aceleración pico del terreno, lo cual se traduce en menor movimiento e intensidad de un evento determinado. Esto, si bien no significa que el peligro sísmico es menos importante, sí significa que la geología superficial no estará jugando un rol como factor de amplificación de las ondas sísmicas, como podría ser el caso en terrenos con suelos blandos o muy blandos (tipos S3 y S4). No obstante, es necesario mantener en mente que las condiciones topográficas de la región son muy variables y, por lo tanto, la amplificación de las ondas sísmicas de un sismo cualquiera es posible y calculable.

Amenaza sísmica regional

Otro factor a considerar como referencia, es la amenaza sísmica regional. Este punto, si bien en cierta medida puede ser inferido a través del criterio desarrollado al describir el marco tectónico regional (para fines de este estudio, no generales), requiere de la mención de ciertos detalles primordiales para la una mejor comprensión del porqué de la amenaza sísmica en Pérez Zeledón, y qué diferencias esperables posee en comparación con otras zonas del país.

A nivel de Centro América se han realizado diversos estudios de amenaza sísmica, siendo el más importante y relevante a este momento, el proyecto RESIS II, en el cual se llevó a cabo una evaluación de la amenaza sísmica del área comprendida por los países centroamericanos; y también se emitieron reportes sobre la amenaza de los países como regiones individuales.

Es a partir de estos estudios que se ha podido conocer las aceleraciones de terreno que pueden desarrollarse en cada región del país, considerando, gracias a análisis probabilistas, el factor temporal de recurrencia y la sismicidad general y más representativa.

En el proyecto RESIS II se determinó que, para un período de retorno de quinientos años y reportando resultados en términos de la aceleración pico (PGA), el territorio dentro del cual se ubica Pérez Zeledón podría experimentar aceleraciones de entre 501 Gal y 600 Gal. Por otra parte, para un período de retorno de mil años, el rango de aceleraciones máximas probables está entre 601 Gal y 700 Gal y, para un período de retorno de dos mil quinientos años, las aceleraciones podrían estar entre 751 Gal y 850 Gal, según los cálculos realizados en dicho estudio que incluyó a todo el sector centroamericano.

Las figuras 25.0, 26.0 y 27.0 se muestran los mapas de amenaza sísmica desarrollados para los países de área central del continente americano, desarrollados mediante PSHA.

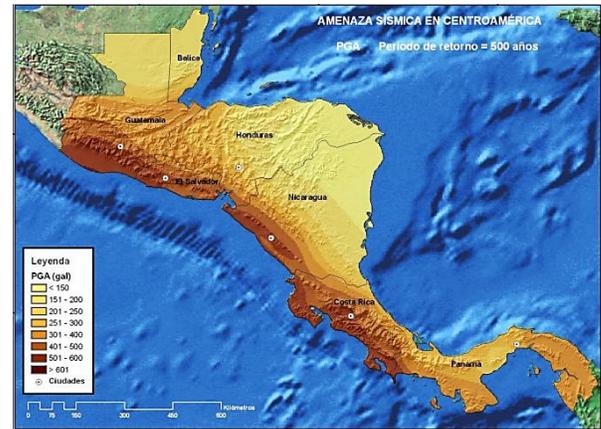


Figura 25.0. Amenaza sísmica para CA (PR = 500 años).
Fuente: Climent et al. (2008).

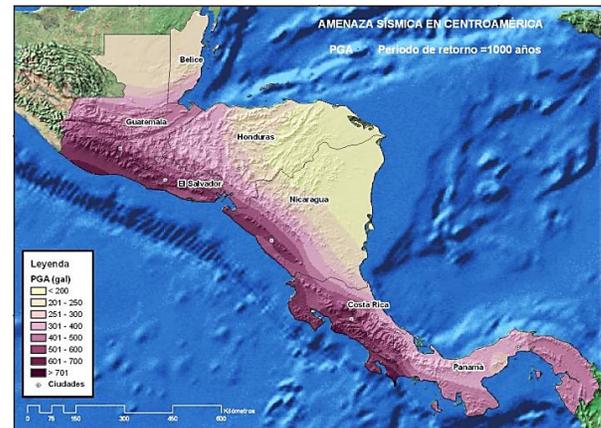


Figura 26.0. Amenaza sísmica para CA (PR = 1000 años).
Fuente: Climent et al. (2008).

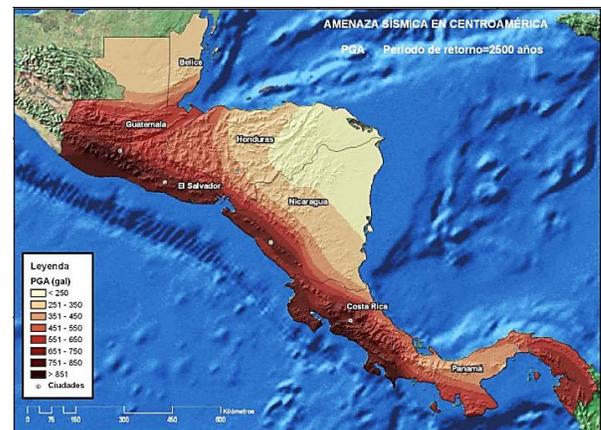


Figura 27.0. Amenaza sísmica para CA (PR = 2500 años).
Fuente: Climent et al. (2008).

Estos resultados funcionan como indicador de lo esperado para la zona de estudio, y dan un indicio sobre las simulaciones sísmicas pertinentes a modelar para calcular la amenaza sísmica del cantón. Con esto, es posible tener una idea general sobre las aceleraciones que podrían obtenerse de considerar el factor de frecuencia en estudios como el que se desarrolla para la zona de Pérez Zeledón, pero principalmente la utilidad de este resumido apartado es crear una visión clara —aunque no específica— sobre en qué regiones la peligrosidad sísmica es mayor; representa una aproximación

coherente para poder determinar en qué rango deberían ubicarse las intensidades obtenidas al realizar la evaluación de amenaza local.

Como conclusión de esta visión regional básica, es importante mencionar que con base en los resultados de la amenaza es posible tomar decisiones sobre el diseño de estructuras o el reforzamiento de las previamente existentes para mitigar el riesgo. La zonificación sísmica es la deducción posibilitada por estos análisis.

De acuerdo con la zonificación sísmica de Costa Rica, presentada en el código sísmico en su versión actual (2010), San Isidro de El General se encuentra en la zona III de sismicidad.



Figura 28.0. Zonificación sísmica de Costa Rica.
Fuente: Código sísmico de Costa Rica (2010).

Cálculo de la amenaza sísmica

Como se ha demostrado hasta este momento, los suelos de la zona de Pérez Zeledón son favorables

para las estructuras de vivienda y edificaciones en general, ya que no contribuyen masivamente a la amplificación de las ondas sísmicas cuando estas pasan por el subsuelo. Además, se ha dejado en

claro que la zona sur de Costa Rica posee alta sismicidad, debido a que en esta región se da actividad continua entre tres placas litosféricas principales y del bloque de Panamá.

Pérez Zeledón está así, expuesto a una amenaza sísmica considerable, no obstante, toda esta peligrosidad no es intrínseca del territorio delimitado por el cantón, sino que una gran parte de ella ocurre en fuentes fuera de “las fronteras” del mismo; dentro de los límites territoriales de Pérez Zeledón, la fuente de sismicidad más amenazante es la falla de Buenavista.

Contando con este conocimiento es viable proceder al cálculo de la amenaza sísmica, siguiendo con el procedimiento del método determinístico a seguir en este estudio.

La amenaza sísmica es representable mediante gráficos comparativos de intensidad contra distancia, y también mediante mapas de peligro en los que las aceleraciones del terreno en las distintas sub-regiones del área en estudio son apreciables de forma simple, mediante una escala de colores que engloba a las distintas líneas de isoaceleración. Desde un punto de vista práctico, podría decirse que los mapas resultan más prácticos que los gráficos, ya que, de modo general, su interpretación es más sencilla para cualquier individuo, por lo que resultan sumamente útiles en temas administrativos y de gestión territorial.

Para realizar el cálculo de la amenaza, la definición de la mínima distancia entre el sitio y la fuente será propuesta, al igual que la magnitud, considerando los puntos expuestos en el marco tectónico de la región, y la sismicidad registrada (magnitud, profundidad y ubicación de los eventos). Esto significa que para completar el segundo punto de la metodología, y para obtener los resultados del tercero, será necesario especificar y modelar un sismo hipotético con las características adecuadas para evaluar de una forma lógica la amenaza sísmica del cantón, tomando al distrito de San Isidro como sector representativo de este.

Mapas de amenaza sísmica

Haciendo uso de las relaciones empíricas entre la magnitud, la longitud, el ancho y el área de ruptura de un sismo, propuestas por Wells y Coppersmith, (1994), se establece que el potencial sísmico de la principal fuente sísmogénica de la región de Pérez Zeledón (la falla Buenavista) es suficiente para ge-

nerar un sismo de $M_w = 6.3$. Con base en el potencial definido y la distancia hipocentral, así como el factor indicativo de la geología del terreno, se determinan los valores a utilizar para aplicar la función de atenuación de Climent et al. (1994), a través de la cual se obtiene la intensidad en función de la aceleración horizontal pico del terreno. Seguidamente se procede a realizar los mapas para representar los valores de aceleración, mismos que serán relacionados con una intensidad cuantificada por medio de la escala Mercalli Modificada, para tener así mapas de intensidad instrumental.

La magnitud y coordenadas a usar se obtienen de los escenarios propuestos para evaluar la amenaza.

El cálculo de la distancia hipocentral se realiza valiéndose de las longitudes conocidas, medidas por medio de la instrumentalización: la distancia epicentral y la profundidad. Así, la distancia hipocentral es una medición indirecta que obedece la siguiente relación:

$$R_{\text{hipocentral}} = \sqrt{R_{\text{epicentral}}^2 + R_{\text{profundidad}}^2} \quad (5)$$

El parámetro “S” es relevante porque sugiere si el terreno contribuye a amplificar o atenuar las ondas sísmicas incidentes en él. Este parámetro obedece a la geología local y será considerado a través del uso del Atlas de Costa Rica versión 2014, ya que las capas de este documento son manipulables en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual es necesario para la creación de los mapas.

Y en referencia a los sistemas de información geográfica, para cumplir con la intención de crear los mapas de amenaza sísmica se requiere emplear algún sistema de información geográfica que permita manipular y desplegar la información necesaria, así como manejar los datos pertinentes y exponer los productos esperados de forma adecuada.

En este proyecto se hizo uso del SIG de código libre QGIS, en su versión 2.14, con el propósito de realizar los procedimientos antes descritos. QGIS es una herramienta muy eficaz para el procesamiento y georreferenciación de imágenes, el análisis de datos, manejo de formatos ráster y vectoriales, y la organización de información geoespacial, que posee una interfaz amigable con el usuario y permite la adaptación de plugins desarrollados en Python y C++; el software en su versión más reciente puede ser descargado del sitio del equipo desarrollador: www.qgis.org.

Definición de escenarios sísmicos

En primera instancia se debe considerar el proponer un sismo basado en las características físicas y el potencial sísmico conocido de la falla Buenavista. Este escenario se plantea con base en el criterio del MCE, término que usualmente es confundido con otros como el sismo máximo de diseño de una estructura. Es por esta razón que se especifica a continuación la definición exacta de sismo máximo creíble, antes de proceder a especificar las propiedades del escenario formulado.

En detalle, el sismo máximo creíble puede definirse como: el más grande terremoto hipotético cuya ocurrencia puede ser razonablemente esperada a lo largo de una determinada falla geológica u otra fuente sismogénica, considerando claro, la configuración tectónica actual de la zona específica en que la ocurrencia puede ser esperada. Es un evento que cuenta con el respaldo de todos los datos geológicos y sismológicos disponibles. Es determinístico si su fuente sismogénica es espacialmente definible y puede ser localizada a una distancia particular del sitio de estudio. Por otra parte, el terremoto hipotético es probabilístico si se considera un evento al azar, cuya distancia hipocentral es determinada por medio de relaciones matemáticas de recurrencia y magnitud para un área dada. El MCE puede asociarse con estructuras geológicas superficiales específicas, y puede también asociarse a eventos impredecibles o terremotos que ocurren a profundidades altas y que no causan desplazamientos en la superficie.

El criterio de evaluación sísmica determina cuál o cuáles fuentes sísmicas pueden asignarse a un MCE. El terremoto más severo esperado se determina considerando estudios regionales y locales que pueden incluir una completa revisión de todos los datos sobre sismicidad en los alrededores del sitio analizado; todas las fallas circundantes y condiciones atenuantes o amplificadoras propias del lugar deben ser consideradas.

El criterio de selección del evento puede variar, ya que podría proponerse un evento relacionado con estructuras sismo-tectónicas específicas, no basándose en la magnitud más alta esperada sino en la más severa vibración del suelo que podría causar un evento bajo el marco tectónico conocido.

Dadas las condiciones geológicas del área de San Isidro de El General, se tomará como principal criterio la magnitud de momento de los eventos sismológicos registrados para definir el MCE, así como sus localizaciones y profundidades para definir la distancia hipocentral.

Al tratarse de un análisis determinístico no se toma en cuenta ningún criterio respecto a la recurrencia de los eventos sísmicos, solamente sus características físicas medibles tras su ocurrencia; individuales.

La magnitud de momento se considera la variable relacionada con la fuerza del sismo a emplear en la propuesta, antes que las magnitudes de ondas superficiales (M_s) y de ondas de cuerpo (M_b), al igual que con la magnitud local (M_L), debido a que la magnitud de momento es el parámetro necesario para ejecutar la ecuación de Climent et al. (1994).

Para extender la validez de este estudio, se busca evaluar la amenaza sísmica en el cantón de forma integral, esto es, no limitando el estudio a un solo escenario hipotético sino previendo los efectos de varios sismos con puntos de ocurrencia distintos, para así tomar en cuenta la influencia potencial de cada fuente importante de actividad sísmica y no solamente la de la principal, debido a que, al considerar la ubicación geográfica del sitio y la evidencia disponible, se vuelve irrefutable la obligación de analizar aquellas fuentes sismogénicas que muestran actividad constante y de magnitud cuantiosa.

Primer escenario

El primer escenario de sismo hipotético se basa en la suposición del potencial máximo de la falla de Buenavista, el cual corresponde a la generación de un terremoto con magnitud de momento $M_w = 6.3$. Tomando como referencia el registro histórico y la sismicidad reciente de la zona involucrada en el estudio, se define un escenario simulador para evaluar la amenaza sísmica en la región central de Pérez Zeledón.

Este primer evento sismológico propuesto está ubicado hacia el noreste (NE) de la ciudad de San Isidro de El General, a una distancia epicentral de 9.07 km con referencia en la misma, en el distrito de Rivas.

La profundidad del evento modelado es de 10 km y, sus coordenadas geográficas son: $Y =$

1044001.308 y $X = 537130.104$; medidas en el sistema de referencia de coordenadas (SRC) de uso oficial en Costa Rica, el CRTM05.

Las coordenadas para este escenario, en el sistema CRTM05, son: $Y = 1030337.125$ y $X = 518940.340$.

Segundo escenario

El segundo escenario está definido por un evento de magnitud $M_w = 5.3$, y está ubicado hacia el norte de Dominical, en el distrito de Platanares (dirección suroeste con respecto a la ciudad de San Isidro).

El segundo escenario propuesto asigna al sismo una distancia epicentral de 15.24 km. Además, en esta proposición se establece una profundidad al hipocentro de 7.0 km.

Tercer escenario

Finalmente, el tercer escenario es configurado con un sismo de control que se ubica a 12.94 km de la ciudad de San Isidro de El General, hacia el noroeste de esta y en el distrito de Páramo.

Las propiedades del evento sísmico propuesto para el escenario incluyen una magnitud de $M_w = 5.0$; un centro focal ubicado a 4.0 km bajo la superficie; y coordenadas en sistema CRTM05 iguales a: $Y = 1047085.121$ y $X = 526711.422$.

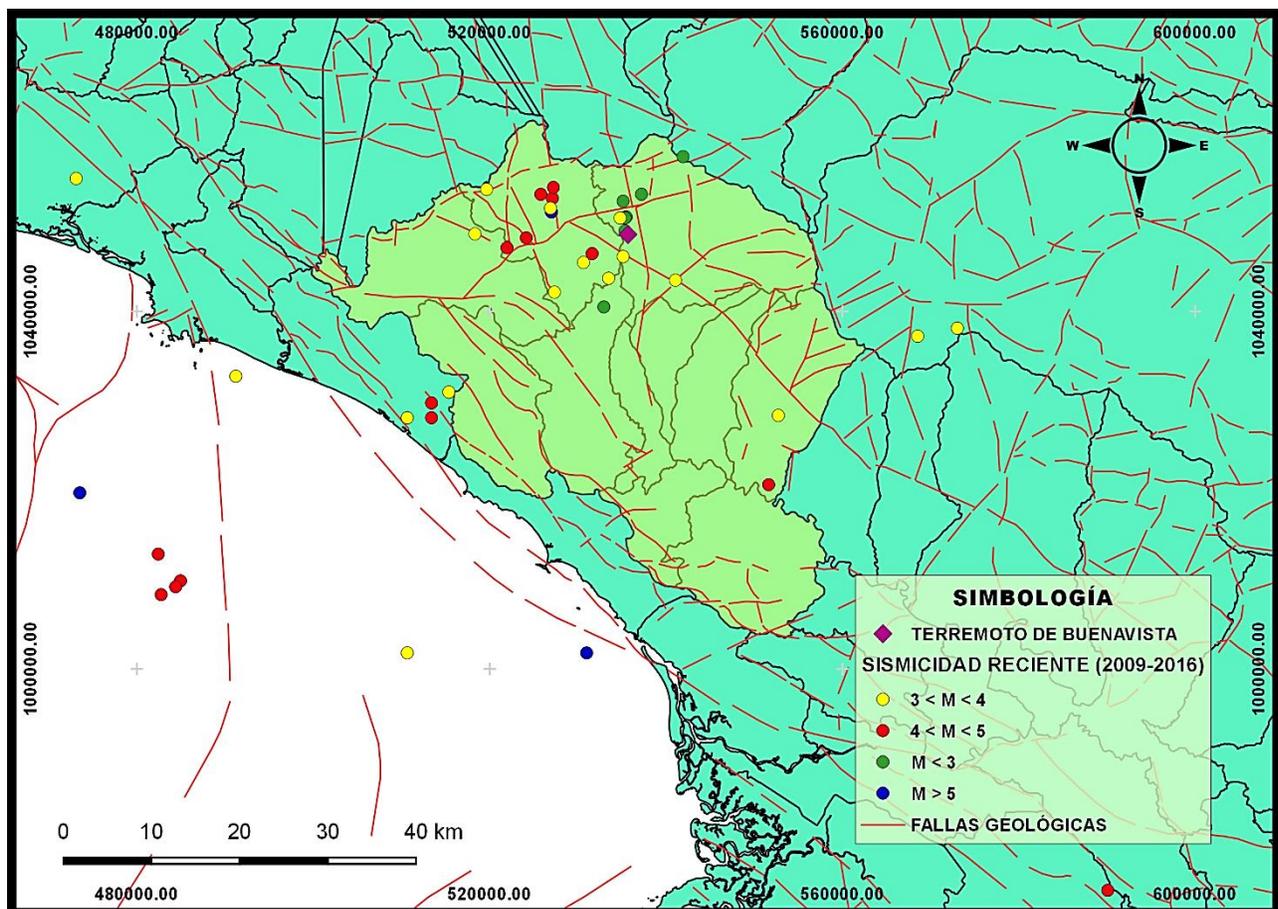


Figura 29.0. Actividad sísmica percibida y relevante para el cantón de Pérez Zeledón en los últimos años.
Fuente: Atlas de Costa Rica versión 2014; realizado en QGIS 2.14.

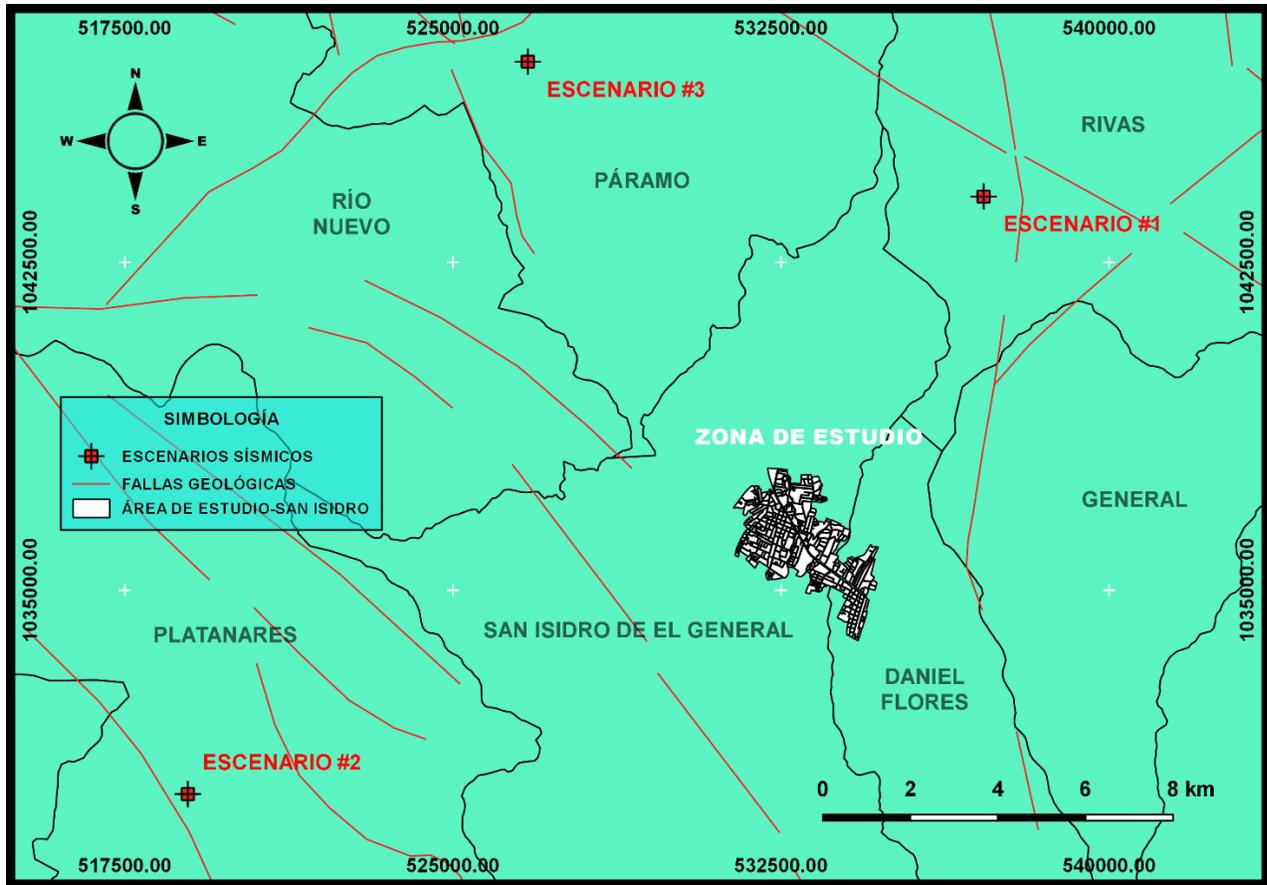


Figura 30.0. Escenarios sísmicos hipotéticos para la evaluación determinística de la amenaza sísmica en la zona de estudio.
Fuente: Atlas de Costa Rica versión 2014; realizado en QGIS 2.14.

Correlación de intensidades

Habiendo definido los escenarios para la evaluación de la amenaza en la región solamente resta emplear las herramientas del sistema de información geográfica seleccionado para confeccionar con estas los mapas de aceleración pico del terreno en cada uno de los sismos hipotéticos planteados.

En este estudio, los mapas de amenaza sísmica son presentados en función de tres modalidades distintas, siendo estas:

- PGA expresado en Gal (cm/s^2).
- PGA expresado como un porcentaje de la gravedad terrestre.

- La intensidad instrumental (MMI).

Como se mencionó antes, una vez realizados los mapas (es decir, aquellos en los que se expresa la intensidad por medio de la aceleración pico) y con el fin de que cualquier usuario pueda hacer un correcto uso de lo que estos indican, se correlacionarán los resultados de los mapas con los valores de la escala sismológica Mercalli Modificada. Esto es posible al tomar una relación empírica para la correlación, como las propuestas por Linkimer (2008), Wald et al. (1999) y Wald et al. (2006).

CUADRO 12.0. ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE MMI Y PGA; MMI Y PGV		
Correlación encontrada		Autores
$I_{mm} = 2.20 \log PGA + 1.00$	$I_{mm} \leq V$	Wald et al. (1999a)
$I_{mm} = 3.66 \log PGA - 1.66$ ($\sigma = 1.08$)	$V \leq I_{mm} \leq VIII$	Wald et al. (1999a)
$I_{mm} = 2.10 \log PGV + 3.40$	$I_{mm} \leq V$	Wald et al. (1999a)
$I_{mm} = 3.47 \log PGV - 2.45$ ($\sigma = 0.98$)	$V \leq I_{mm} \leq IX$	Wald et al. (1999a)
$I_{mm} = 2.30 \log PGA + 0.92$	$II \leq I_{mm} \leq V$	Linkimer (2008)
$I_{mm} = 3.82 \log PGA + 1.78$	$V \leq I_{mm} \leq VII$	Linkimer (2008)

Fuente: Wald et al. (1999a); realizado en Microsoft Excel 2013.

CUADRO 13.0. RELACIÓN ENTRE SACUDIDA PERCIBIDA, DAÑO POTENCIAL, MMI, PGA Y PGV				
Intensidad (MMI)	PGA (%g)	PGV (cm/s)	Sacudida percibida	Daño potencial
I	<0.17	<0.1	No sentida	Ninguno
II-III	0.17-1.4	0.1-1.1	Débil	Ninguno
IV	1.4-3.9	1.1-3.4	Ligera	Ninguno
V	3.9-9.2	3.4-8.1	Moderada	Muy ligero
VI	9.2-18.0	8.1-16.0	Fuerte	Ligero
VII	18.0-34.0	16.0-31.0	Muy fuerte	Moderado
VIII	34.0-65.0	31.0-60.0	Severa	De moderado a alto
IX	65.0-124.0	60.0-116.0	Violenta	Alto
X+	>124.0	>116.0	Extrema	Muy alto

Fuente: Wald et al. (1999a); realizado en Microsoft Excel 2013.

CUADRO 14.0. RANGOS PROPUESTOS DE PGA PARA CADA MMI EN COSTA RICA		
Intensidad (MMI)	Rango de PGA _{máximo} (cm/s ²)	Rango de PGA _{máximo} (%g)
II	<4.9	<0.5
III	4.9-13.3	0.5-1.4
IV	13.3-36.0	1.4-3.7
V	36.0-80.3	3.7-8.2
VI	80.3-146.7	8.2-15.0
VII	146.7-268.0	15.0-27.3

Fuente: Linkimer (2008); realizado en Microsoft Excel 2013.

Es necesario explicar que la correlación entre la intensidad MMI y el parámetro de aceleración máxima posee importantes limitaciones que deben

ser recordadas a la hora de tomar decisiones e interpretar los resultados ligados a estas ecuaciones y rangos empíricos. Como comenta Linkimer

(2008), una de las principales limitaciones del método de correlación es la alta dispersión de valores de aceleración pico entre un nivel y otro de la escala Mercalli Modificada, lo cual puede deberse a la naturaleza de los parámetros, siendo que PGA es un valor máximo específico para un punto determinado y MMI es una medida ponderada de los efectos de un sismo en una región. Además, los períodos de observación para realizar las correlaciones son una limitante, ya que estrecha el número de datos disponibles para la regresión, y se ha observado que información adicional puede redefinir la correlación, entre PGA y MMI. Otro problema relacionado con el período considerado

para la toma de datos es el hecho de que dependiendo de la sismicidad de la región durante ese lapso, es posible que no se pueda disponer de suficientes datos para relacionar valores de PGA con los de MMI, como fue el caso de Costa Rica, en donde no se contó con información suficiente para realizar una regresión que diera como resultado una ecuación empírica para intensidades MMI mayores a VII. Finalmente, se desconoce si la correlación entre PGA y MMI varía dependiendo de la profundidad, el tipo de suelo, o la distancia hipocentral.

Vulnerabilidad sísmica

Selección de la metodología a utilizar.

Una vez determinada la amenaza sísmica para la región en estudio se procede a definir la vulnerabilidad física de las edificaciones que allí se encuentran, considerando este parámetro, para los fines de este estudio, como un grado de fragilidad de las estructuras ante las cargas y efectos antepuestos por el movimiento de terreno emergente debido a las vibraciones ocasionadas por ondas sísmicas. Esta aclaración es importante porque las estructuras poseen diferentes debilidades ante diferentes amenazas; el modo de reacción de los materiales con los cuales está construida una estructura es diferente dependiendo de cuál sea la solicitación a la que debe responder. Como analogía, un elemento sismo-resistente con alta resistencia a la compresión pero baja resistencia a la tensión será más vulnerable ante la aplicación de esfuerzos de tracción, lo cual no significa que no posee vulnerabilidad ante los esfuerzos axiales, sino que esta es menor a la primera mencionada; de igual forma, una edificación cualquiera cuenta con una cierta vulnerabilidad ante diferentes situaciones o desastres. La vulnerabilidad física ante sismos no es equivalente a la vulnerabilidad ante otros desastres naturales como deslizamientos, huracanes o inundaciones, aunque ciertamente la deducción de correlaciones entre todos estos tipos de vulnerabilidad es posible y viable.

Tras señalar de manera más explícita qué es lo que se busca determinar, se procede a seleccionar una metodología general para poder estimar el grado de vulnerabilidad de las edificaciones. Para realizar esta determinación sobre la vulnerabilidad de cada tipo constructivo no es necesario conocer las aceleraciones pico esperadas para el terreno —conocidas a través del estudio de la amenaza sísmica de la región—, ya que como se especificó antes, vulnerabilidad puntual y amenaza son componentes separados que en conjunto representan al riesgo o vulnerabilidad global de toda una región.

El propósito de evaluar la vulnerabilidad es predecir los daños que sufrirá una edificación ante la ocurrencia de un sismo. Por lo general, este parámetro propio de cada estructura es expresado

como un factor de daño —o porcentaje si se desea expresar en ese formato— asociado a una incertidumbre propia de las deducciones basadas en procedimientos estadísticos.

Una de las formas más recurrentes a la que se acude para reflejar el daño esperado ante desastres de ciertas propiedades es a través del uso de las llamadas funciones de vulnerabilidad física. Las funciones de vulnerabilidad son relaciones matemáticas formuladas para representar de forma continua el daño probable que sufrirá un tipo de estructura determinado ante la aplicación de esfuerzos y cargas externas inducidas por alguna situación demandante; para el caso de este estudio: solicitaciones sísmicas. Estas funciones se deducen a través de regresiones estadísticas para cada tipología estructural, que emplean registros de datos captados gracias a mediciones y observaciones previas o información sintética generada a partir de procedimientos teórico-prácticos.

Cuando se pretende realizar estudios detallados, para calcular la viabilidad de un proyecto de remodelación o demás, es posible hacer uso tanto de funciones basadas en inventarios de daños registrados (empíricas) como de aquellas obtenidas gracias a la modulación y análisis del comportamiento estructural (teóricas), con el fin de comparar y evaluar la efectividad relativa de cada aproximación y definir así diferentes medidas de mitigación de riesgo. Esto puede ser recomendable para estudios puntuales, de una sola estructura —o grupos pequeños de estas—, en la cual revisar la vulnerabilidad de manera exhaustiva es uno de los objetivos primordiales a tener; sin embargo, en el caso de estudios enfocados al análisis de grandes extensiones de terreno urbanizadas, es preferible investigar el marco local de datos y las condiciones del sitio y, con base en el criterio profesional y los datos disponibles, asumir una metodología apta para ajustarse a las necesidades específicas del estudio.

Las funciones de vulnerabilidad física definen la distribución de probabilidades de las pérdidas previstas en función del valor de un parámetro variable de movimiento fuerte del terreno para un escenario determinado, relacionado generalmente con el rango de aceleraciones producidas por el evento, ya que es una medida dependiente/registrada directamente de la amplitud de las ondas sísmicas registrada; así como la más utilizada para identificar la intensidad (escalas de intensidad macro-sísmicas como la Mercalli Modificada también pueden ser consideradas).

Las curvas resultantes de las regresiones relacionan el indicador de daño con la desviación estándar de la intensidad del evento al cual están expuestas las edificaciones.

Según el informe T1-5 de ERN- CAPRA las funciones de vulnerabilidad pueden ser evaluadas mediante diversos procedimientos; el mismo informe propone una serie de técnicas para la evaluación de estas, ofreciendo como referencias las siguientes:

- Observaciones del comportamiento de diferentes tipos estructurales ante fenómenos que producen desastres.
- Estudios experimentales de componentes estructurales particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Estudios analíticos de componentes estructurales o de estructuras completas particulares sometidos a acciones externas que modelan los efectos de las amenazas a considerar.
- Experiencia acumulada de expertos.
- Funciones publicadas en la bibliografía internacional.

Respecto al indicador de daño, antes de poder establecer la relación daño esperado-intensidad es necesario considerar de qué depende la vulnerabilidad del elemento por sí solo, independientemente de la amenaza a la cual estará expuesto.

La vulnerabilidad es una variable que depende de características propias de las edificaciones que deben ser censadas y puestas en un inventario apropiado para poder con ello calcular el indicador de vulnerabilidad de las estructuras, entre las cuales se pueden realzar a manera general: el tipo constructivo, los materiales empleados, el tipo de suelo sobre el que estén cimentadas las estructuras, el sistema sismo-resistente diseñado y construido, la edad de la obra, etc.

Lo anterior significa, que la evaluación de la vulnerabilidad inicia con la caracterización de los tipos constructivos predominantes en la región en estudio y requiere de la consideración de los siguientes aspectos, según la literatura y el informe T1-1 de ERN-CAPRA:

- Materiales que constituyen la estructura principales y los elementos de fachada, divisiones internas y recubrimiento.

- Geometría general/configuración estética y arquitectónica.
- Tipo estructural principal
- Tipo de terminados y conexiones.
- Fecha de construcción y norma de diseño utilizada.
- Condición física aparente al momento de la evaluación y posible ocurrencia de daños previos.
- Defectos o debilidades específicas.
- Obras de reforzamiento previas.
- Comportamiento inelástico esperado (considerable para evaluaciones cuantitativas).
- Descripción general de la edificación (tipo de fachada, número de plantas, altura, área, etc.).
- Sistema estructural principal.
- Material de la estructura principal.
- Tipo de cubierta de techos.
- Tipo de diafragmas.
- Tipo de construcción/propósito de uso.

La consideración de cada uno de estos puntos es indispensable, y de un modo u otro, cada metodología diseñada para determinar la vulnerabilidad física de las estructuras hace uso de la información expuesta, mediante una perspectiva u otra.

Tipologías y funciones de vulnerabilidad para Costa Rica

Para el caso del centro de Pérez Zeledón, se sigue la tendencia de las viviendas y edificaciones construidas en el resto de zonas del país (Costa Rica), en las cuales se puede observar una predominancia en el empleo de la mampostería reforzada así como también, en ciertas zonas, de construcciones con muros de madera. Otro sistema constructivo que ha venido tomando relevancia en la región es el que se basa en el uso de baldosas prefabricadas para la confección de los muros principales de la estructura, así como en el uso de columnas y vigas también prefabricadas que se consiguen con medidas estandarizadas y alivian el costo de los proyectos constructivos al agilizar el tiempo de obra.

Para la consideración de funciones de vulnerabilidad física en el país, se puede hacer uso

del método sugerido por CAPRA en el informe T1-5 de ERN-CAPRA, proceso que consiste en una estimación probabilística de la vulnerabilidad física de cada tipología constructiva dominante de la región en estudio, asignando al final una función determinada a cada tipo, para reflejar los resultados obtenidos.

También es posible hacer uso de un módulo de software para el cálculo y edición de diferentes funciones de vulnerabilidad: el ERN-Vulnerabilidad; especial para desarrollar funciones que se ajusten a las peculiaridades de cada tipo de edificación, que, además de agilizar mucho el procedimiento de cálculo, cuenta también con una base de datos con funciones preestablecidas, propuesta por diversos autores y por ERN, las cuales incluso pueden ser modificadas en caso de que así se requiera.

Sin embargo, una opción rápida es considerar como referencia las funciones propuestas en el informe T2-5 de ERN-CAPRA (Caracterización local de la vulnerabilidad de edificaciones), mismas que fueron desarrolladas con la intención de corresponder a las tipologías generales usadas en Costa Rica, tipología que fueron identificadas y clasificadas tomando como base las edificaciones ubicadas en la ciudad de mayor desarrollo urbano del país: San José.

Las tipologías fueron identificadas a través de un sistema de censo que incluyó los principios conceptuales expuestos previamente en este apartado, incluyendo las características generales de la estructura, el sistema de entrepiso, sistema y elementos sismo-resistentes, conexiones, apariencia y estado aparente (registros fotográficos), etc.

La clasificación de cada uno de los tipos constructivos en la ciudad y en el país, se realizó mediante visitas de inspección y documentación previamente existente. Para cada uno de los tipos identificados se realiza un levantamiento detallado de información en edificaciones representativas mediante formatos que resumen las características principales, fotografías y descripciones de los elementos principales y sus conexiones. (ERN-CAPRA, T2-5)

De entre las inspecciones y los documentos consultados se extrajo la información más relevante en referencia con el tema investigado y se realizó la clasificación de los tipos de estructuras más comunes en Costa Rica. Se resolvió la existencia de los ocho tipos estructurales esenciales y

más recurrentes en el país (para lo cual se consideró la importancia de los aspectos de mayor peso evaluados, tales como el material principal y la configuración sismo-resistente), y de estos fue posible extraer subcategorías para concluir con un total de quince tipologías constructivas predominantes (las subcategorías surgieron al analizar los aspectos complementarios inspeccionados y consultados).

A continuación se describen las tipologías constructivas definidas en el informe técnico ERN-CAPRA T2-5:

TUGURIO (R)

Es una tipología propia de asentamientos de extrema pobreza, donde se utiliza cualquier tipo de material de desecho para edificar las viviendas, de un piso con altura inferior a 3.00 m, y luz aproximada de 3.00 m. No presenta un sistema estructural definido, por lo tanto posee un comportamiento sísmico impredecible, pero presumiblemente deficiente.

ADOBE (A)

Estas corresponden a edificaciones de un solo piso, de albañilería, con piezas de arcilla cocidas al sol, unidas con barro y sin elementos de liga. Los techos de tiras de madera apoyadas en largueros, llevan encima la cubierta presentándose con cubiertas livianas o pesadas.

En las edificaciones de dos niveles, el entrepiso en madera se comporta como un diagrama flexible. Se encuentra con muy poca frecuencia y las existentes tienen muchos años de construcción.

En la actualidad no se construye con este tipo de material en Costa Rica, ya que no cumple con los requerimientos estructurales que se consideran en el código sísmico nacional.

Las edificaciones de adobe corresponden en general a edificaciones con una alta vulnerabilidad sísmica relativamente hablando. Esto significa que es de esperarse daño estructural importante para niveles de aceleración relativamente bajos.

Para este tipo de construcciones la falla del sistema normalmente ocurre por colapso parcial o en total dirección perpendicular a los muros y por pérdida de apoyo de los elementos de cubierta.

PÓRTICOS EN CONCRETO RESISTENTES A MOMENTO (PCR)

Estructuras conformadas por vigas y columnas de concreto, pueden ser de uno o más niveles, las cubiertas varían entre ligeras, pesadas o losas de concreto.

Para las estructuras de más de un nivel el diafragma de entrepiso es en general rígido.

El comportamiento de las estructuras de pórticos de concreto reforzado se caracteriza por la flexibilidad asociada a la disposición de los elementos que la conforman sin tener algún tipo de contravientos o riostras. Estas edificaciones son en general de vulnerabilidad intermedia.

MAMPOSTERÍA CONFINADA (MC)

Dentro de la mampostería prevalecen las edificaciones de mampostería confinada, presentan relativa baja vulnerabilidad sísmica, esto significa que es de esperarse daño estructural importante solo para altos niveles de demanda sísmica en términos de deriva estructural.

Para este tipo de construcciones la falla del sistema ocurre normalmente por figuración avanzada en dirección paralela al plano de los muros principales y deterioro progresivo consecuente de los muros de mampostería.

Por su extrema rigidez, estas edificaciones están normalmente sometidas a aceleraciones para periodos estructurales muy bajos que son en general aceleraciones relativamente menores en comparación con las que pudieran actuar en edificaciones de rigidez intermedia.

El comportamiento esperado de este sistema estructural puede variar según el tipo de diafragma y la disposición de elementos de confinamiento en concreto reforzado.

MUROS DE MADERA (W)

Es una tipología en la que predomina la madera como elemento estructural principal, están conformados por marcos de madera y muros en madera, aunque en algunos casos pueden ser láminas de otro material.

Las edificaciones de madera corresponden en general a edificaciones de uno o dos pisos con entrepisos de diafragma rígido o flexible y con vulnerabilidad sísmica intermedia, se presentan

variaciones en los materiales de cubierta, clasificándose en cubiertas ligeras o pesadas.

En general la calidad de construcción en madera no es buena ya que las técnicas de producción, industrialización y construcción no están tan desarrolladas.

Por esta razón las funciones de vulnerabilidad corresponden a estructuras de madera de regular y baja calidad. A pesar de esto, el sistema no es en general susceptible de daños grandes principalmente porque, considerando sus características, la intensidad sísmica de entrada no es muy alta por tratarse de un sistema relativamente flexible, dúctil y de bajo peso.

Se encuentra principalmente en zonas suburbanas, o barrios antiguos y asentamientos. En la actualidad se emplea muy rara vez.

MAMPOSTERÍA SIMPLE (MS)

Las edificaciones de mampostería simple están conformadas por muros en bloque de concreto o arcilla, generalmente son edificaciones de uno o dos pisos con cubierta ligera en la mayoría de los casos.

Para las edificaciones de dos pisos se observa en la mayoría de los casos diafragmas de entrepiso flexibles conformados por vigas en madera o metálicas con losa en madera.

Estas edificaciones presentan vulnerabilidad sísmica alta, con niveles de daño estructural importante.

Para este tipo de construcciones la falla del sistema ocurre normalmente por figuración avanzada en dirección paralela al plano de los muros principales y deterioro progresivo de los muros de mampostería.

Se encuentra principalmente en zonas de barrios antiguos y asentamientos. En la actualidad se emplea muy rara vez.

MAMPOSTERÍA REFORZADA (MR)

Las edificaciones de mampostería reforzada están conformadas por muros en bloques de concreto perforado con algunas celdas rellenas de concreto y con acero de refuerzo, generalmente son edificaciones de uno o dos pisos con cubierta ligera en la mayoría de los casos.

Las edificaciones de dos o más pisos presentan en la mayoría de los casos diafragmas de entrepiso rígidos conformados por vigas metálicas con losa de concreto.

También se observan casos de diafragmas de entresijos flexibles conformados por vigas en madera o metálicas con losa en madera. Estas edificaciones presentan una vulnerabilidad sísmica baja.

Para este tipo de construcciones la falla del sistema ocurre normalmente por figuración avanzada en dirección paralela al plano de los muros principales y deterioro progresivo consecuente de los muros de mampostería.

Este sistema constructivo de mampostería es el más utilizado en la actualidad para la construcción de viviendas y edificaciones de una o dos plantas, aunque su uso en obras de más niveles no es aislado.

MUROS EN CONCRETO PREFABRICADO (CP)

Es un sistema de muros estructurales prefabricados sobre los que se apoyan placas prefabricadas también de concreto. Típicamente se encuentran estructuras de uno o dos pisos con cubiertas ligeras.

En estructuras de dos niveles el diafragma de entresijo se idealiza como diafragma flexible.

Estos tipos antes descritos engloban las características de aquellas edificaciones encontradas en Costa Rica, y a partir de estos surgen las sub-clasificaciones presentadas en el cuadro 15.0.

CUADRO 15.0 TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS PRINCIPALES COSTA RICA	
Tipo	Características generales
A-SLFSB-1	Adobe - Sin diafragma, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 1 piso
PCR-RLFLM-5	Pórticos en concreto RM - Diafragma rígido, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Medios - 5 pisos.
MC-FLFSB-2	Mampostería confinada - Diafragma flexible, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos.
W-SLFLB-1	Muros en madera - Sin diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1 piso.
W-FLFLB-2	Muros en madera - Diafragma flexible, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 2 pisos.
MR-FLFSB-2	Mampostería Reforzada - Diafragma flexible, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos.
MR-RLFSB-2	Mampostería Reforzada - Diafragma rígido, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos.
MS-SLFSB-1	Mampostería sin refuerzo - Sin diafragma, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 1 piso.
MS-FLFSB-2	Mampostería sin refuerzo - Diafragma flexible, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos.
MS-RLFSB-2	Mampostería sin refuerzo - Diafragma rígido, Cubierta ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos
PCR-RLFSM-5	Pórticos en concreto RM - Diafragma rígido, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Medios - 5 pisos.
PCR-RCFSM-5	Pórticos en concreto RM - Diafragma rígido, Cubierta en concreto, Fachada frágil sin dilatar, Medios - 5 pisos.
PCM-RCFSM-5	Pórticos y muros en concreto - Diafragma rígido, Cubierta en concreto, Fachada frágil sin dilatar, Medios - 5 pisos.
R-SLFLB-1	Ripio - Sin diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1
CPM-RCFSB-2	Concreto prefabricado - Diafragma rígido, Cubierta en concreto, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2

Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5; realizado en Microsoft Excel 2013

Tras identificar las tipologías dominantes de la región, y siguiendo el proceso de cálculo de CAPRA, se asigna a cada subcategoría constructiva una función de vulnerabilidad característica. Las curvas despliegan en su eje vertical el daño medido en términos de la relación media de daño "RMD" (Mean Ratio Damage o "MRD", en inglés), que es la cuantificación del costo de reparación para restablecer el estado de las estructuras al punto previo a la ocurrencia del sismo. En el eje horizontal las curvas utilizan los valores de aceleración espectral, velocidad espectral, desplazamiento espectral o de deriva relativa del entrepiso/entrepisos para representar la intensidad sísmica, dependiendo de cuál sea la correlación más apta para cada tipo constructivo; por ejemplo, se usa la aceleración del terreno para estructuras rígidas, y en casos opuestos es posible que la velocidad espectral o la deriva relativa resulten ser mejores parámetros para expresar la relación.

Las funciones de vulnerabilidad para los tipos estructurales típicos y para los diferentes tipos de amenaza en cada uno de los

países debe ser objeto de un trabajo de investigación y refinación permanente. El grado de precisión que se utilice en la función de vulnerabilidad definirá el grado de precisión de los resultados de riesgo. La utilización de funciones de vulnerabilidad de tipos constructivos similares con base en curvas propuestas en otros países es posible siempre y cuando se realice una validación y verificación de las mismas. (ERN-CAPRA, T2-5)

Lo anterior es importante para recalcar que a medida que se tenga acceso a mejores y más precisas tecnologías y/o información más detallada, se deberán actualizar las funciones de vulnerabilidad obtenidas mediante las metodologías actuales, cuyo proceso de obtención posee un cierto alcance y limitaciones ineludibles al momento de ser ejecutado.

A continuación se muestran las funciones de vulnerabilidad física definidas por ERN para las tipologías constructivas representativas del territorio costarricense.

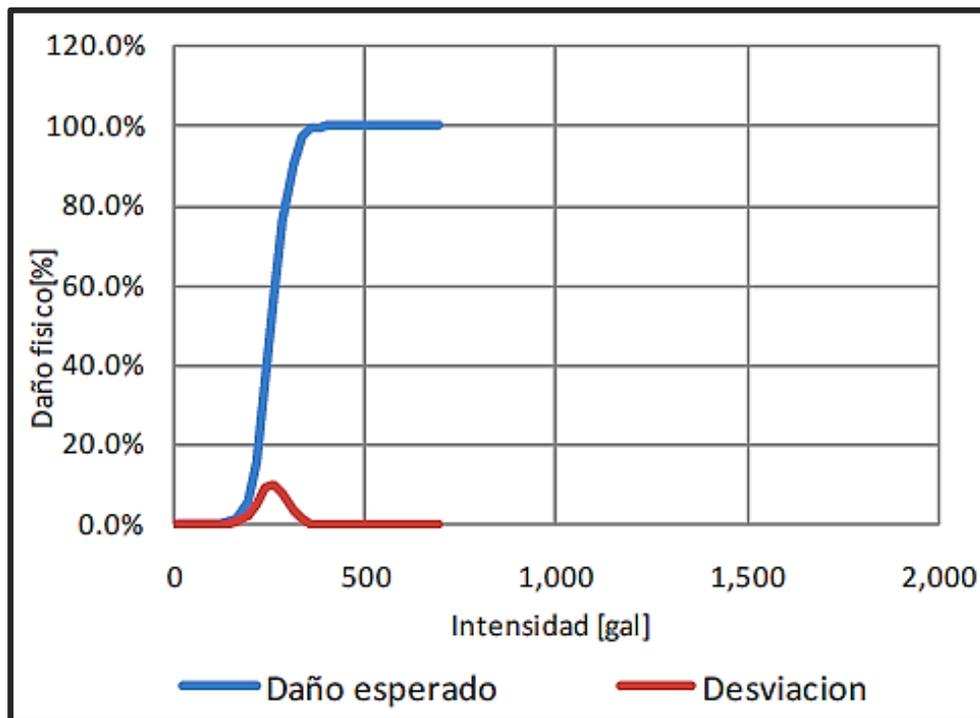


Figura 31. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo A-SLFBB-1. Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

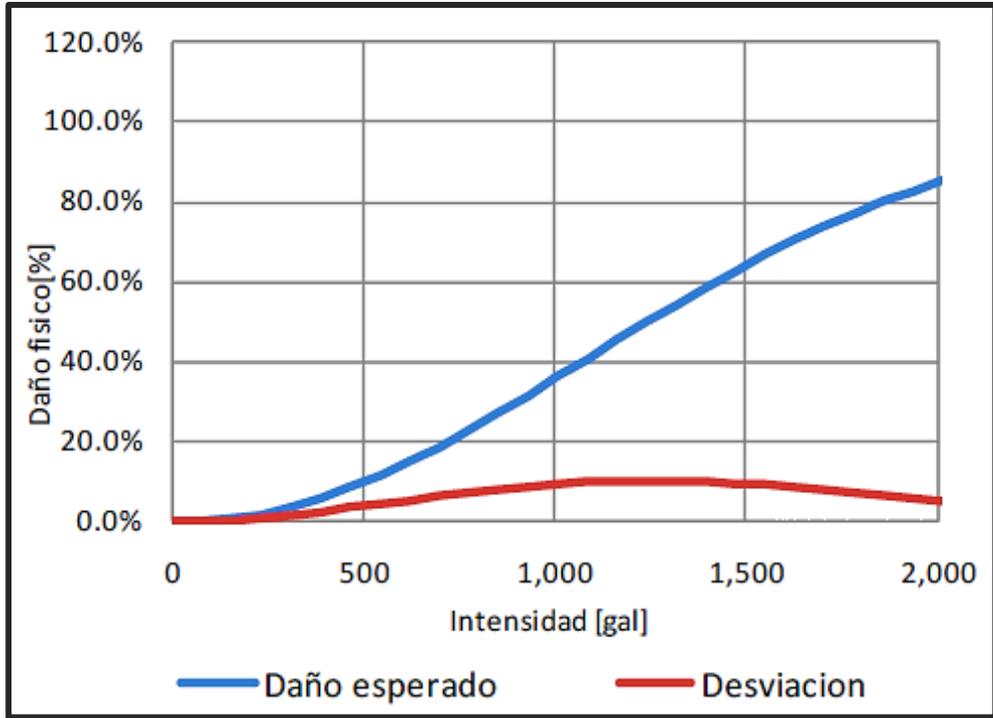


Figura 32. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo PCR-RLFLM-5.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

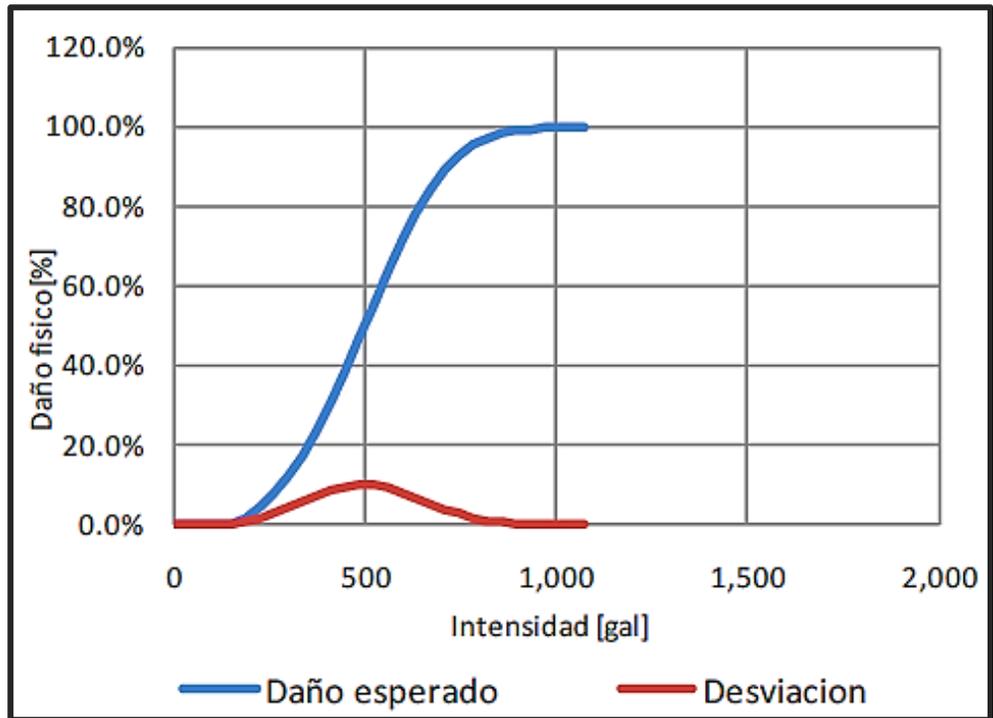


Figura 33. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MC-FLFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

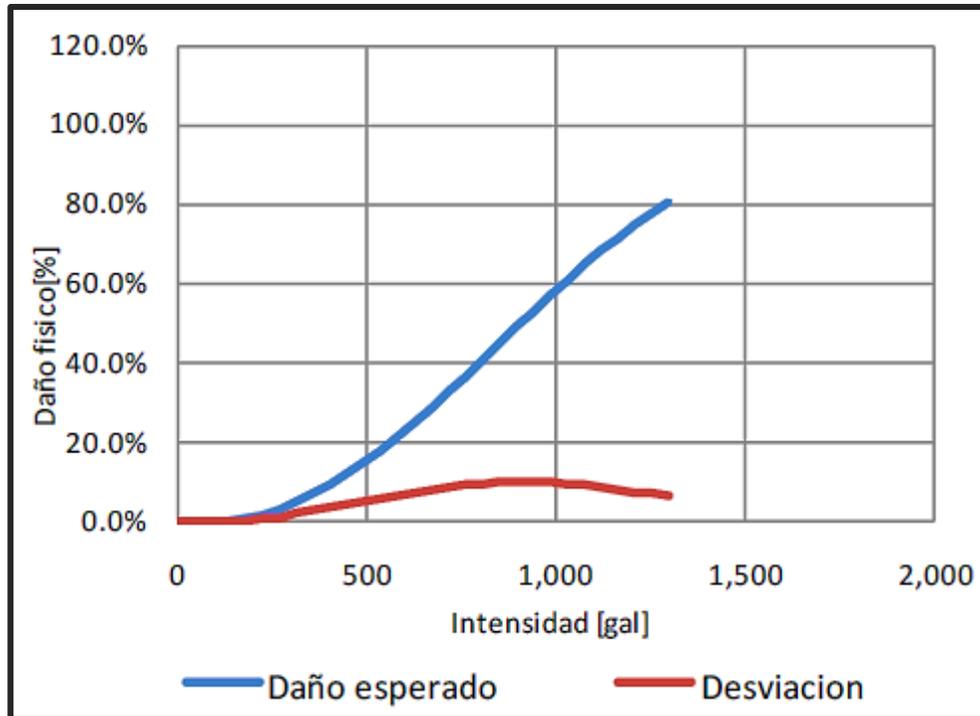


Figura 34. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo W-SLFLB-1.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

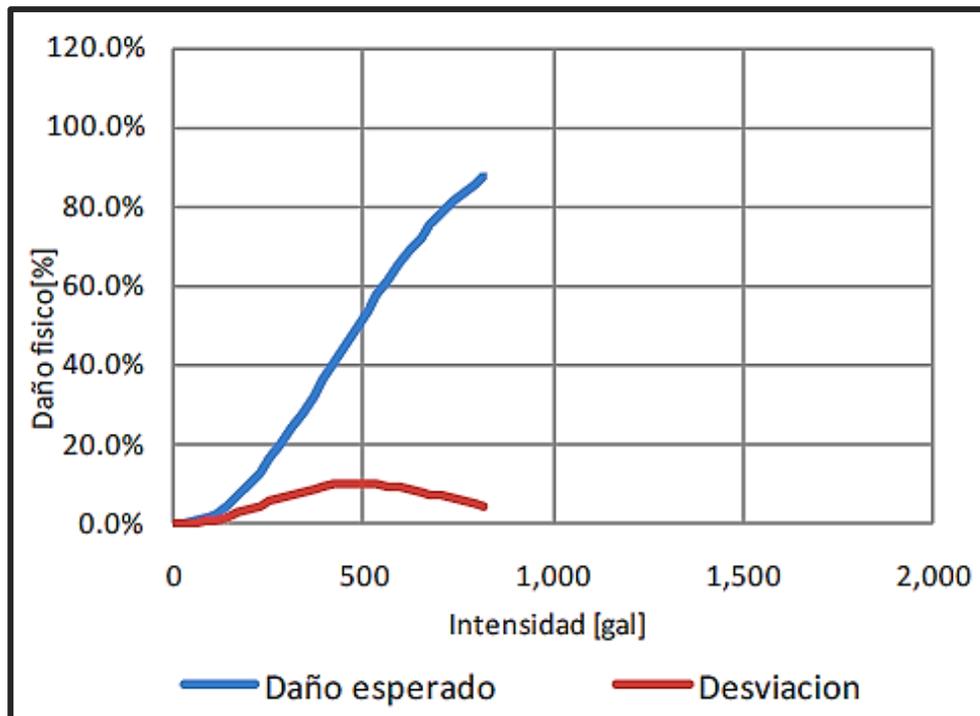


Figura 35.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo W-FLFLB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

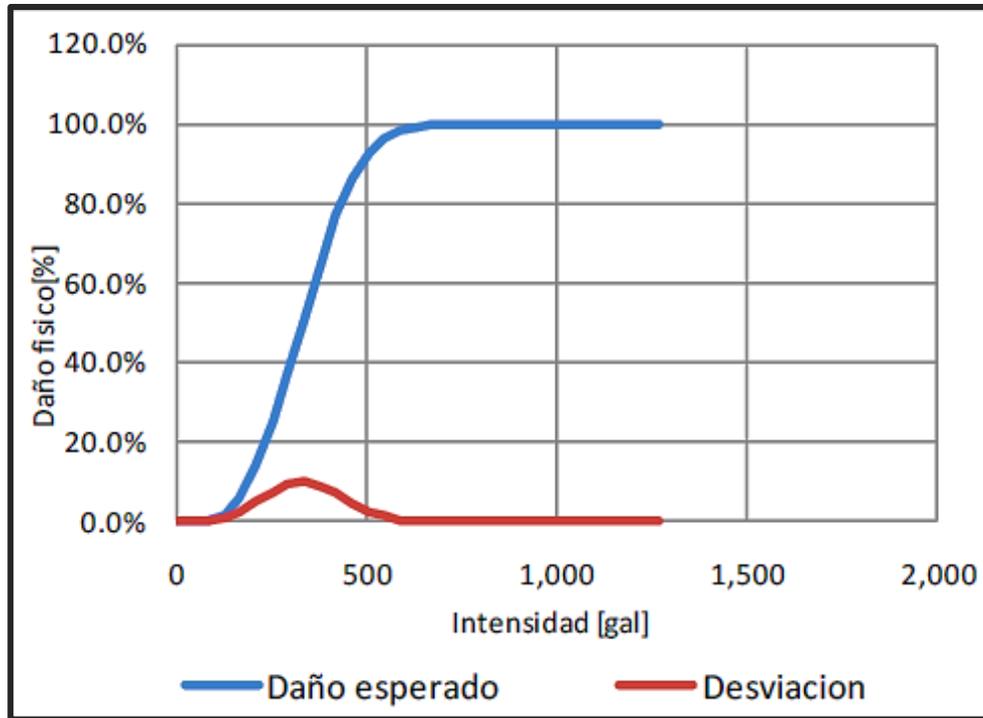


Figura 36.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MR-FLFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

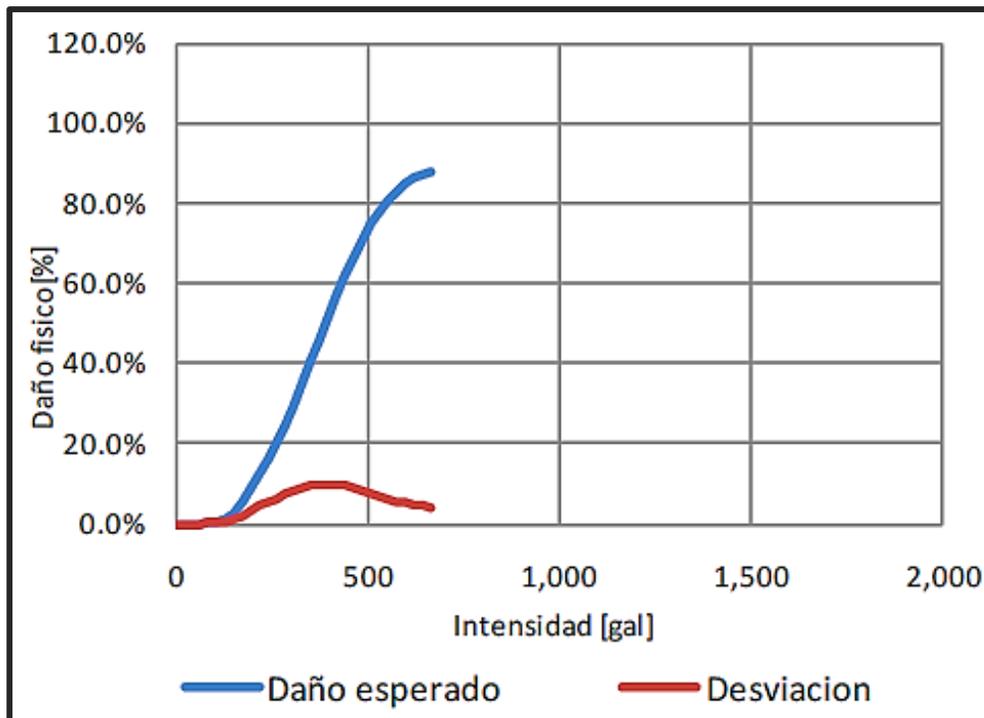


Figura 37.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MR-RLFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

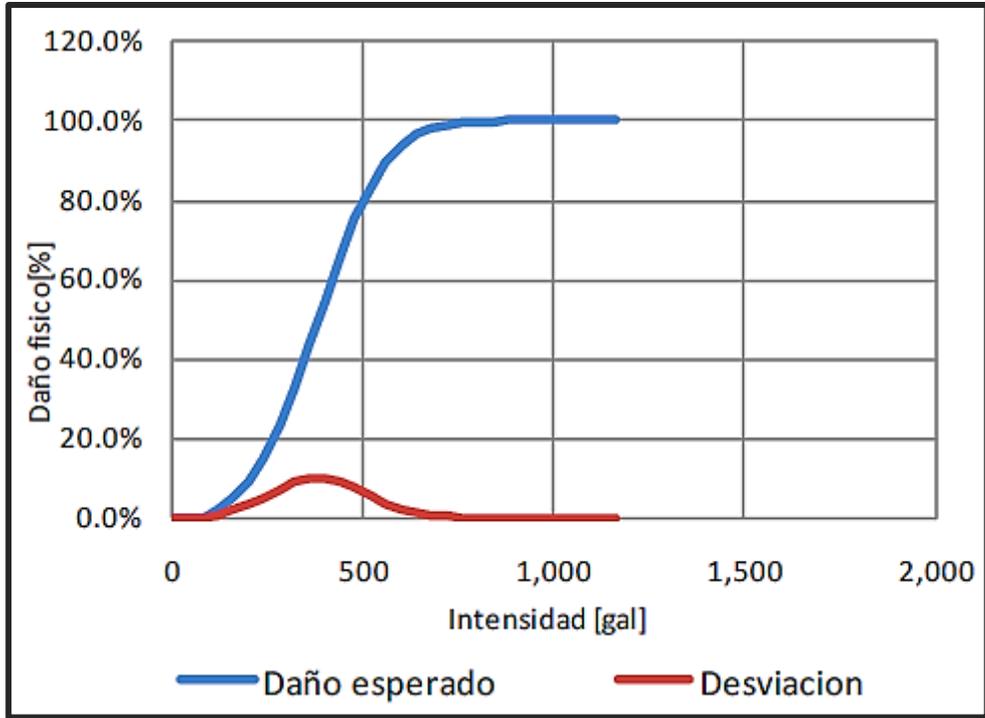


Figura 38.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MS-SLFSB-1.
Fuente: Informe T2-5, ERN-CAPRA.

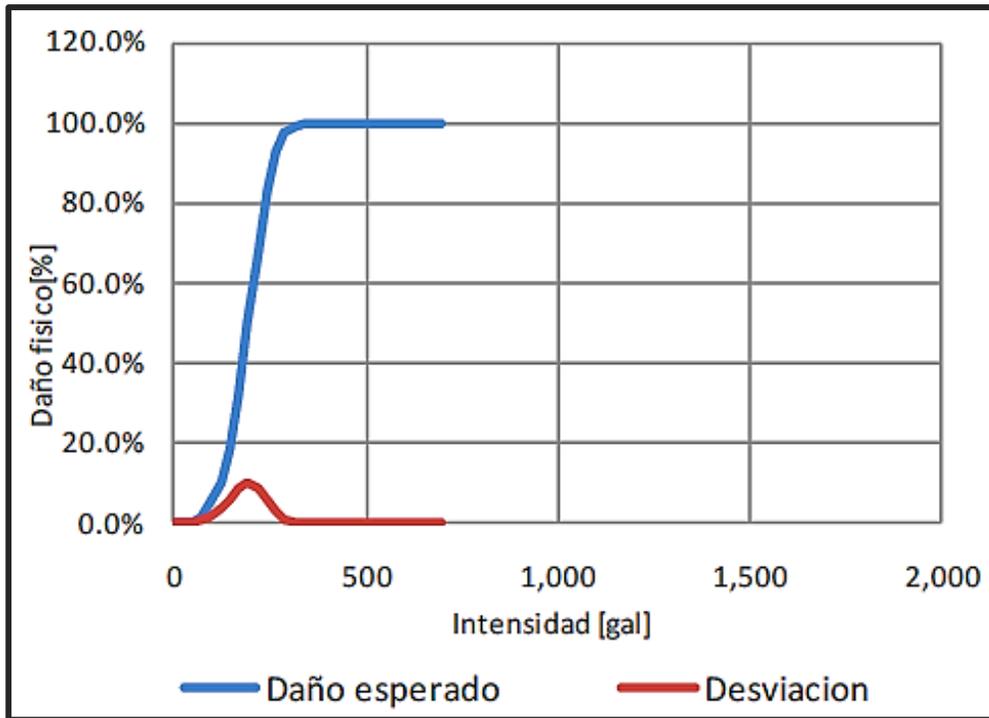


Figura 39.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MS-FLFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

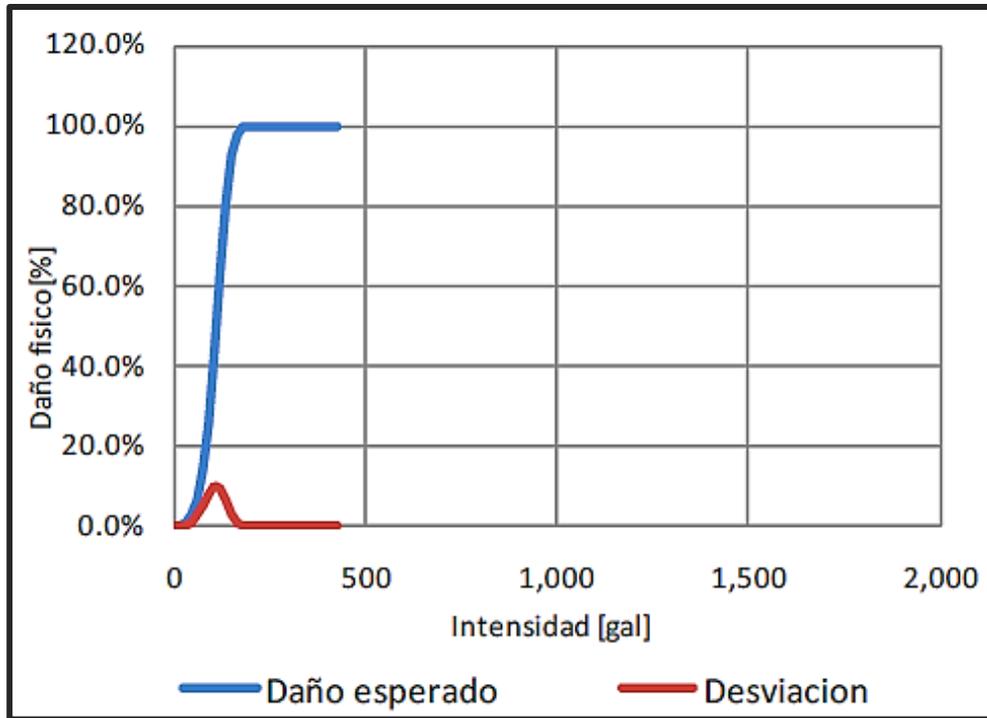


Figura 40.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo MS-RLFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

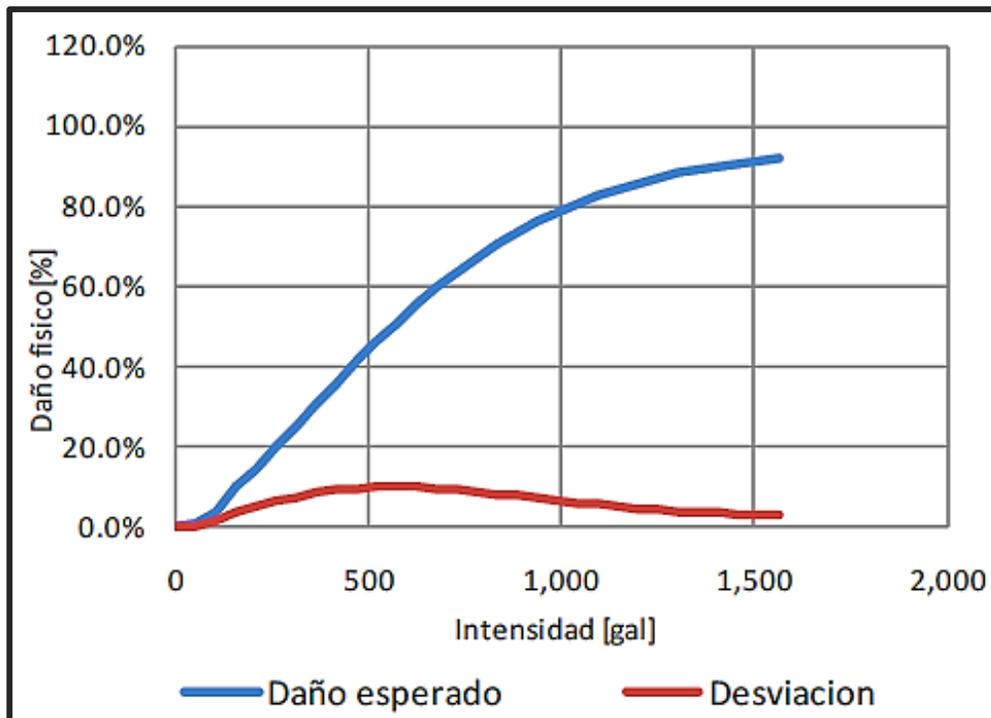


Figura 41.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo PCR-RLFSM-5.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

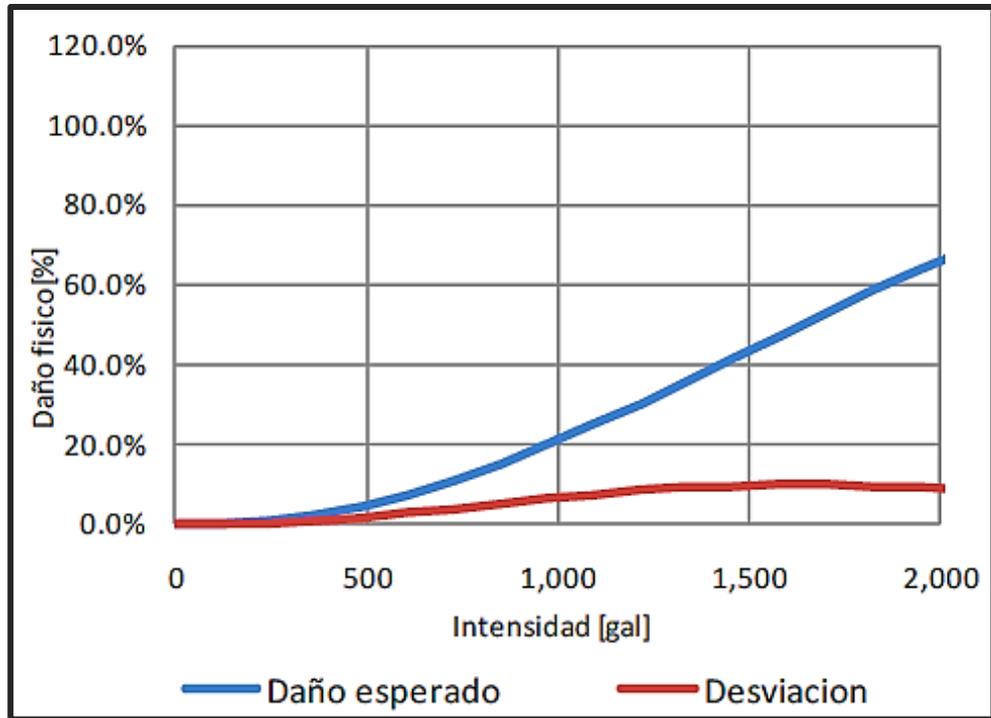


Figura 42.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo PCR-RCFSM-5.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

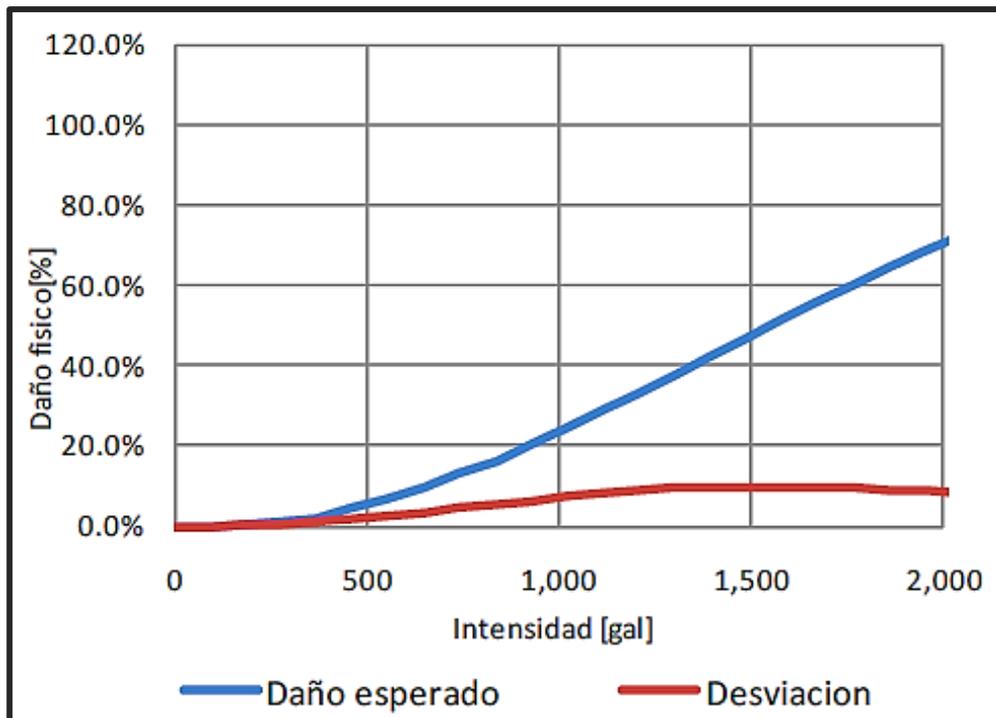


Figura 43.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo PCM-RCFSM-5.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

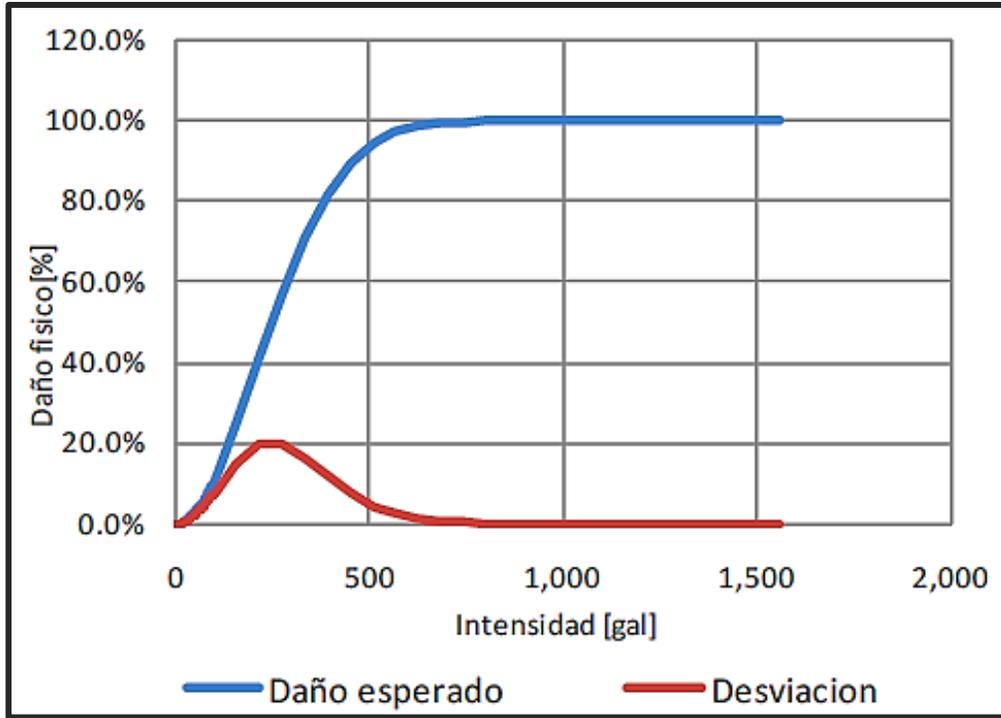


Figura 44.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo R-SLFLB-1.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

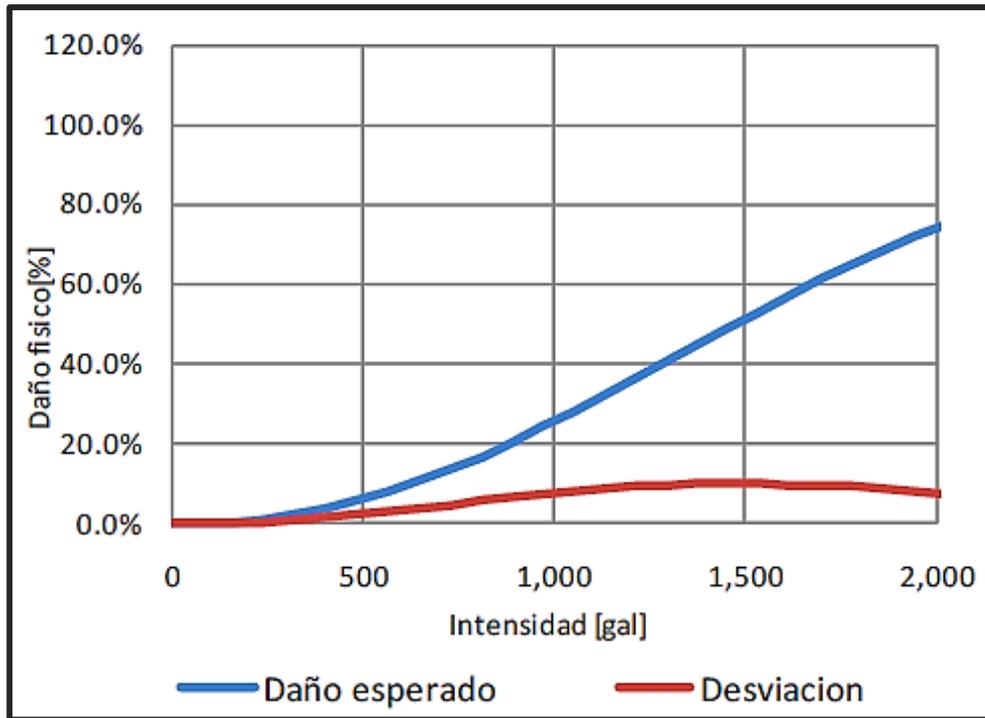


Figura 45.0. Función de vulnerabilidad sísmica, tipo constructivo CPM-RCFSB-2.
Fuente: informe técnico ERN-CAPRA T2-5.

Procedimiento para el diagnóstico de la vulnerabilidad sísmica

Debido a las limitaciones de tiempo y personal es imposible escrudiar y realizar encuestas en cada una de las edificaciones del cantón de Pérez Zeledón (o del distrito de San Isidro de El General en términos específicos), razón por la cual se opta por llevar a cabo un muestreo estadístico, para poder a través de este, partiendo del área completa, definir una muestra representativa que permita la generalización de los resultados para cada tipología identificada.

El uso de una técnica de muestreo en este estudio es importante porque permite mantener los costos al mínimo, así como reducir el volumen trabajo y también el tiempo invertido en la evaluación de campo, sin afectar considerablemente la exactitud y precisión en los resultados finales.

Entonces, para proceder con el diagnóstico de la vulnerabilidad el primer paso es seleccionar un método de muestreo válido para el escenario planteado por el proyecto, considerando la información que se tiene respecto al tamaño de la población y la muestra.

En este caso, se debe entender que la población es el conjunto total de edificaciones comunes construidas en el distrito de San Isidro de El General, tomando como énfasis principal aquellas que son construidas con fines ocupacionales de vivienda, pero también incluyendo edificaciones diseñadas con propósitos comerciales, modestas en complejidad y función. También es importante recalcar que la población considerada corresponde al número de edificaciones que cumplan con las tipologías identificadas en el informe ERN-CAPRA T2-5.

De lo anterior es posible inferir que habrá edificaciones que no forman parte de la población de este estudio a pesar de ubicarse dentro de área a evaluar. Esta situación corresponde a una consecuencia directa del alcance del proyecto, el cual no toma en consideración estructuras complejas en cuanto a funcionalidad o servicios prestados.

Las estructuras que no forman parte de la evaluación a realizar incluyen, pero no se limitan a: iglesias, centros educativos, salones comunales, hoteles, estadios, auditorios, centros de salud, etc.

Por otra parte, las zonas en donde no hay edificación alguna son igualmente ignoradas para este estudio por obvias razones. Estas zonas no

necesariamente se encuentran del todo vacías, pero son zonas con propósitos diferentes a los esperados de edificaciones comunes. Ejemplos de estas zonas son: plazas, lotes abandonados, lotes baldíos, parques, polideportivos, etc.

Las edificaciones comerciales que serán tomadas en cuenta para el análisis de la vulnerabilidad son aquellas que obedecen a las características generales de las tipologías regionales, además, como aclaración es importante mencionar que el fin de este proyecto no es enfocarse en las estructuras comerciales sino en las de ocupación residencial. Dicho esto, los principales establecimientos a evaluar serán aquellos cuyas actividades giran en torno a la alimentación, como cafeterías, sodas, restaurantes, creperías, restaurantes de paso, etc.

Tras estas aclaraciones, es necesario proponer el tipo de técnica estadística a emplear para la definición de la muestra.

La técnica propuesta elegir la muestra representativa de la zona es la de Muestreo Aleatorio Simple (M.A.S). Esta técnica consiste en la selección de "n" unidades en entre un conjunto de "N" cifras, de tal modo que cada una de las posibles muestras resultantes a partir de la elección tenga la misma probabilidad de ser elegida.

Para poder realizar un muestreo aleatorio simple es necesario entonces contar con una numeración de los elementos que componen a la población. Se enumeran las unidades desde uno hasta "N" y posteriormente se extrae una serie de "n" números aleatorios entre uno y "N".

Para poder hacer la elección de las "n" unidades se debe emplear ya sea una tabla de números aleatorios, o un programa computacional que pueda generar resultados semejantes, dando en cada extracción la misma probabilidad a cada uno de los componentes de "N" que no hayan sido seleccionados en la extracción previa. Los componentes de "N" que se tengan al alcanzar "n" representan a la muestra.

Para el cálculo de la muestra se utiliza un dato de población aproximado, al cual se acude debido a la ausencia de información más detallada en referencia al tema. Este dato es el de viviendas totales (considerando tanto individuales como colectivas) ubicadas en el distrito de San Isidro de El General, mismo que no cubre la totalidad de edificaciones que se desea representar en el estudio, ya que el propósito principal de este es el de evaluar aquellas estructuras que cumplan con las ca-

racterísticas identificables de cada uno de los tipos constructivos dominantes del país. Esto significa que hay una importante incertidumbre en este aspecto, y no solamente por el dato que se toma como población sino por el hecho de que este valor proviene del censo realizado en 2011 por el INEC, lo cual indica que tiene cerca de cinco años de antigüedad, razón por la cual puede considerarse razonablemente que el número de viviendas en el distrito es mayor en la actualidad.

En la sección sobre la zona de estudio se mencionó el porqué de la escogencia de San Isidro de El General como sector central y representativo del cantón de Pérez Zeledón, en dicha sección se especificó que para el 2011 había un total de trece mil cuatrocientas noventa y nueve edificaciones de vivienda en el distrito, dato que se considera la población “N” para este caso, o al menos como el “N” preliminar.

Con la intención de mejorar la aproximación y reducir una de las fuentes de incertidumbre se consultó a la municipalidad del cantón respecto al crecimiento urbano en términos de residencias, y tras revisión de los documentos públicos y oficiales del sitio se determinó que entre 2011 y 2016 ha habido un crecimiento de 11.21% en términos de vivienda, en relación con los resultados obtenidos por el INEC en 2001. Esto quiere decir que un valor más exacto de la cantidad de viviendas construidas en San Isidro de El General sería de aproximadamente quince mil doce edificaciones.

Tras haber definido el valor de la población se debe proceder a calcular el tamaño óptimo de muestra necesario para que el análisis tenga validez estadística.

Según Spiegel y Stephens (2005) si la población fuera incuantificable y/o desconocida entonces la muestra óptima estaría definida por:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{i^2} \quad (6)$$

Por otro lado, si la población es cuantificable y conocida, la fórmula para determinar la muestra óptima es la siguiente:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q * N}{i^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q} \quad (7)$$

Donde:

- N: tamaño muestral.
- Z_{α} : valor correspondiente a la distribución de gauss (normal). Para un $\alpha = 0.05$, $Z_{\alpha} = 1.96$.
- p: prevalencia esperada del parámetro a evaluar. Si no se conoce su valor entonces se considera $p = 0.5$, con lo cual el tamaño muestral aumenta en relación con los demás casos posibles. En esta evaluación se desconoce p, debido a que no hay estudios anteriores asociados con esta población y con este marco temático, por lo tanto se toma $p = 0.5$.
- q: valor complementario, $q = 1 - p$.
- i: porcentaje de error previsto para la operación matemática. Si, por ejemplo, se espera tener un error del 10%, entonces $i = 0.1$.

Dado que se parte de una población finita y conocida, la ecuación que aplica es la (7). Así, se procede a determinar el tamaño de la muestra de edificaciones a evaluar en la zona de estudio.

CUADRO 16.0. TAMAÑO ÓPTIMO DE MUESTRA.	
PARÁMETRO	VALOR
N	15012
Z	1.96
p (se desconoce)	0.5
q	0.5
i (previsto)	4%
n' (calculado)	374.60
n	375

Fuente: Microsoft Excel 2013.

Se establece de este modo que la muestra óptima es de 375 edificaciones, para la población considerada y los parámetros envueltos en el cálculo realizado; entonces este es el número mínimo de formularios que se deben aplicar en las encuestas de inspección.

Una vez que se conoce la muestra óptima se debe proceder a determinar la distribución de inspecciones, esto es, establecer en qué punto se encuentra ubicada cada una de las unidades que conforman a la muestra. Lo anterior es importante

porque en el estudio no basta con contar con una serie de datos parcializados, y conocer el número de estructuras a evaluar no indica nada sobre las localidades en las cuáles dichas estructuras deben estar ubicadas; es por esto que se debe implementar un método efectivo que permita la obtención de los sitios a evaluar.

Los sitios considerados para el análisis deben estar distribuidos uniformemente a lo largo del área de estudio, para lograr así representatividad general a través de la muestra óptima.

Para poder definir los puntos de aplicación de formularios, así como el criterio para la evaluación de los mismos, es necesario aplicar un método de segregación del territorio estudiado, con el fin de separar los sectores a evaluar de aquellos que no entran en el análisis debido a los tipos de construcciones que poseen o debido a consecuencias directas del método de elección de sectores.

El método utilizado para la selección se ha denominado “Muestreo de asistencia”, y consiste en el uso de una muestra complementaria que permite definir un marco de acción y limitación para la muestra óptima, validando los puntos en los cuales la muestra óptima puede ejercerse.

El primer paso para la implementación de este método es segregar el área de estudio en lotes individuales, considerando para esto fronteras convenientes, definidas por las carreteras y calles circundantes a cada uno de los cuadrantes o polígonos estimados, aunque es preciso mencionar que en los casos en que no hay fronteras evidentes y resulta impráctico extender un polígono debido a sus dimensiones o su poca relevancia individual (esto por poseer una baja relación entre edificaciones y área) se puede definir una frontera de clausura para optimizar el espacio total considerado.

En las figuras 46.0 y 47.0 se pueden observar los lotes resultantes del proceso de seccionamiento aplicado en el área de estudio. El territorio mostrado corresponde a la ciudad de San Isidro de El General. Cada lote considerado es localizado e individualizado en imágenes satelitales de alta definición, provenientes, para este caso, del software Google Earth.

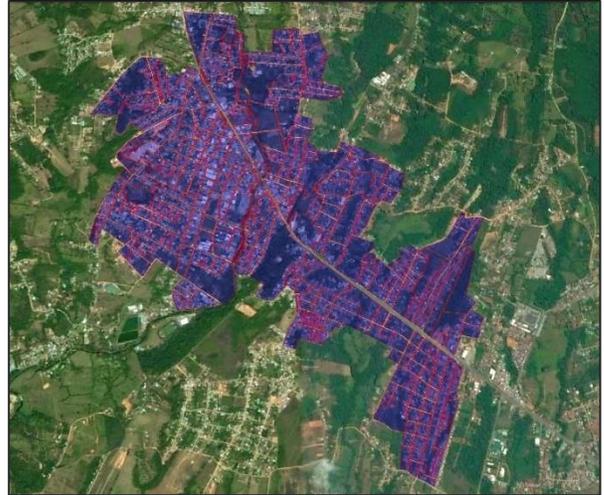


Figura 46.0. Área de estudio seccionada en polígonos individuales para la determinación de la muestra de asistencia.
Fuente: Google Earth.



Figura 47.0. Lotes del área de estudio resaltados para evidenciar las fronteras de la misma.
Fuente: Google Earth.

Tras haber delimitado cada uno de los polígonos que definen a los lotes del área, se debe disponer de la información brindada por estos, y clasificarlos en dos grandes categorías: una en la que se ubiquen los lotes que poseen edificaciones y características espaciales compatibles con aquellas dentro del alcance de los objetivos de este proyecto, y otra en la que se ubiquen los lotes que no pueden formar parte del proyecto, debido a que en ellos se hallan edificaciones especiales o no se halla edificación alguna.

Para llevar a cabo este procedimiento de clasificación es necesario manipular los datos adquiridos en las imágenes satelitales a través de un sistema de información geográfica. En este caso, como se anunció en secciones anteriores, el programa para el manejo de datos geospaciales escogido es el QGIS 2.14.

Lo primero que debe hacerse es exportar el archivo con las capas de polígonos de Google Earth hacia QGIS, para esto es necesario guardar dicho archivo como una extensión .KML, con lo cual se vuelve posible ingresar a él desde QGIS.

En QGIS, tras abrir el archivo .KML es necesario transformar el mismo a un formato de fácil manipulación en el programa, un archivo de tipo shape, identificado por la extensión .SHP.

Para generar el archivo tipo shape simplemente se debe utilizar la opción *Guardar como* y asegurarse de cambiar el formato del archivo a *archivo shape de ESRI*.

Teniendo la capa de lotes como shape, se pasa a georreferenciar los datos de esta, pasando al sistema de coordenadas CRTM05. Este SRC posee coordenadas geodésicas referidas a la elipsoide WGS84 y coordenadas de cuadrícula definidas por la proyección Transversal Mercator.

Una vez que se cuenta con la proyección horizontal deseada, se procede a enlistar los atributos individuales de todos los lotes que conforman el área de estudio, para así categorizarlos en uno de los dos grupos definidos previamente.

Se enumera cada lote producido por la segregación del área de estudio, y a través de observaciones se determina la presencia de tipologías constructivas estandarizadas en cada uno. Los lotes que no posean relevancia en este aspecto son

ignorados a la hora de realizar el análisis de la población asistente.

En el caso de la ciudad de San Isidro de El General, inicialmente se contabilizó un total de treientos treinta y tres polígonos resultado de la segregación. En estos polígonos se identificaron las distintas edificaciones construidas, las zonas verdes y las superficies inhóspitas existentes; con lo cual fue posible eliminar veinticinco lotes de las consideraciones preliminares de viabilidad. Esto significa que cerca de un 7.5% del total parcial/inicial de lotes fue descalificado, y no se tomó en cuenta para formar parte de la población de asistencia.

Así, los lotes descartados pasan a ser simples terrenos incluidos dentro del área de estudio, pero sin relevancia a la hora de escoger los sitios de aplicación de formularios.

Los lotes que resultan ser viables para la aplicación de formularios se numeran uno por uno, con el fin de definir la población de asistencia a utilizar y ubicar los sitios de inspección.

En la figura 48.0 se puede contemplar el resultado de digitalizar los lotes que componen el sitio de estudio, incluyendo la georreferenciación y la clasificación de cada terreno según su funcionalidad como sitio de inspección.

La desestimación de los lotes demarcados en rojo obedeció principalmente al criterio de estructuras especiales; entre estos lotes descartados están: la propiedad de la catedral y el parque central de Pérez Zeledón, el terreno del estadio municipal de Pérez Zeledón, el lote en el que se ubica el hospital Escalante Pradilla, el lote del cementerio municipal, etc.

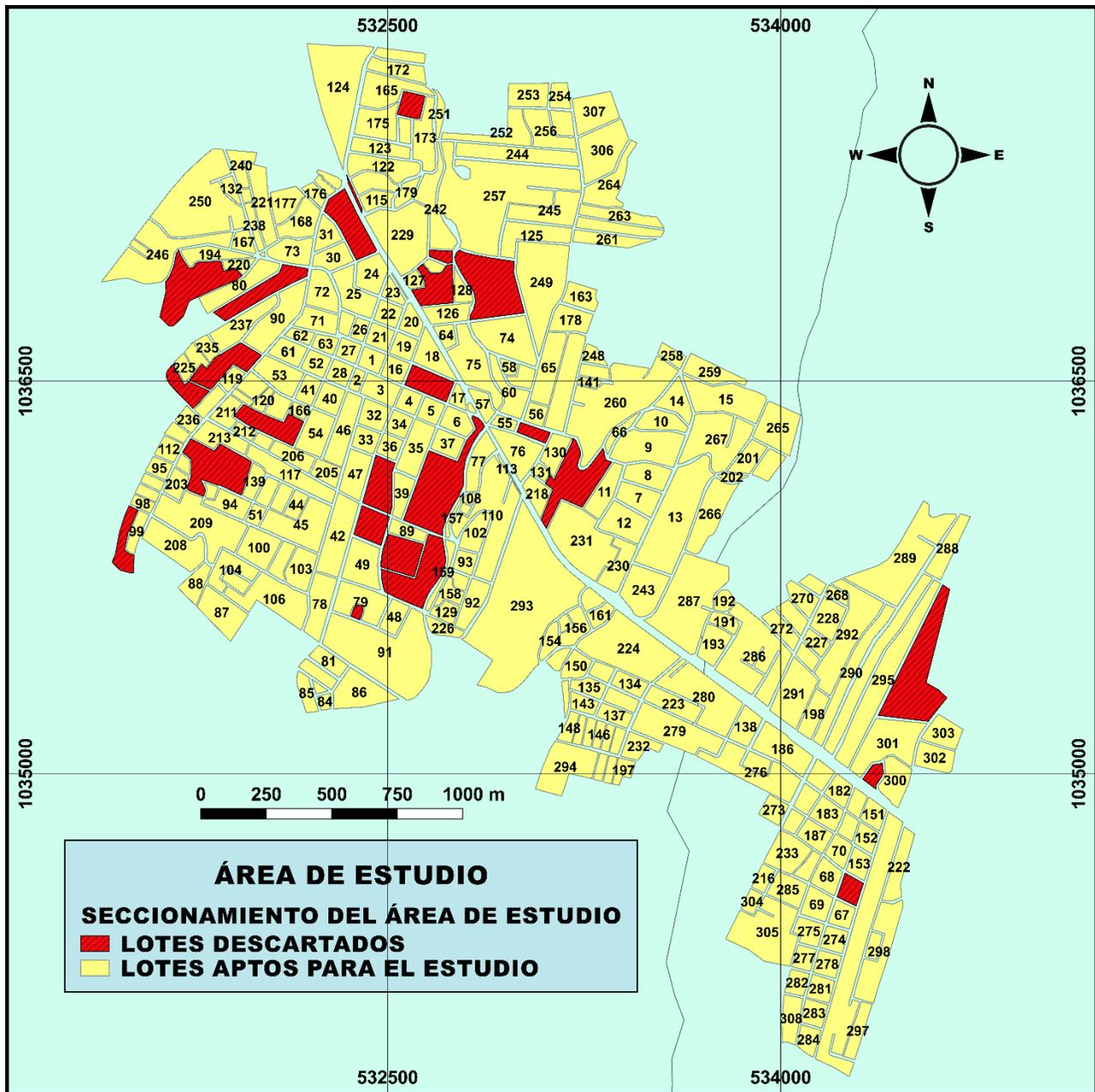


Figura 48.0. Clasificación de lotes del área de estudio y numeración de los lotes viables para inspección.
Fuente: QGIS 2.14.

Como se puede apreciar, a cada lote se le ha asignado un código de identificación numérico, con el fin de conocer la población absoluta de lotes, después del recorte de lotes descartados.

El siguiente paso de este proceso depende de la identificación de una propiedad descriptiva de cada uno de los lotes del sitio: el área superficial.

El cálculo del área de cada lote se puede realizar con las herramientas de QGIS, asignando el operador matemático de área a cada objeto espacial (lote) de la capa de lotes.

Tras determinar las áreas se agrupan los lotes entre rangos aceptables. Esta subdivisión según el atributo del área es importante para definir el número de encuestas a aplicar en cada sitio.

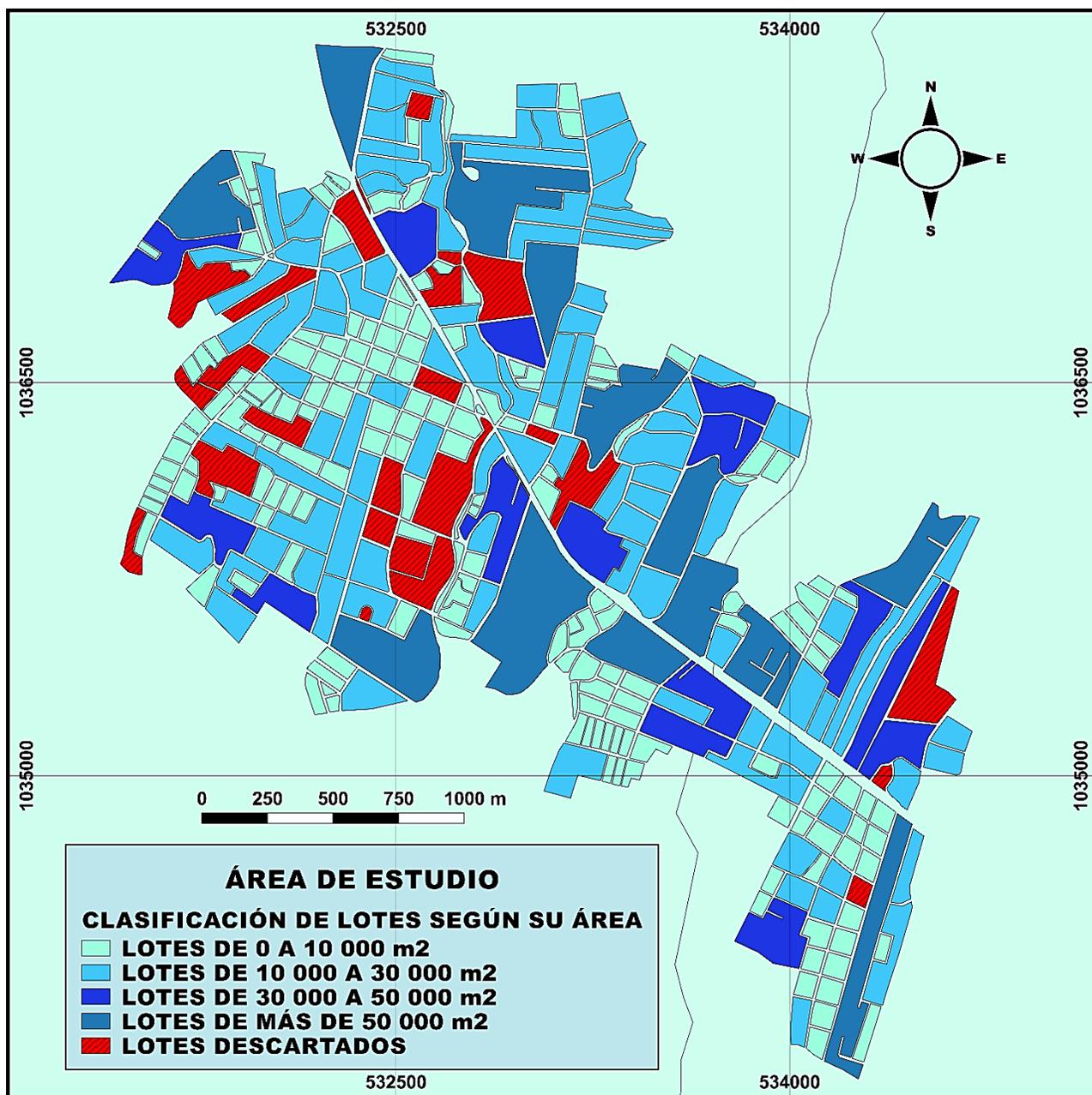


Figura 49.0. Clasificación de lotes en relación con un rango de área establecido para la aplicación de inspecciones.
Fuente: QGIS 2.14.

Al contar con la división de lotes según su extensión en metros cuadrados, se puede definir de qué forma se llevarán a cabo las encuestas en cada sector que termine siendo escogido como una de las unidades de la muestra de asistencia.

Para definir tal aspecto, en este caso, se toman como referencia las asignaciones presenta-

das en el informe de Jiménez (2012). Se consultaron las pautas indicadas por la Comisión Nacional de Emergencias en el estudio de diagnóstico de la vulnerabilidad en Cartago, Costa Rica, realizado en 2012, y con base en estas se definieron valores ajustados al alcance de este proyecto para la cantidad de inspecciones e llevar a cabo en cada lote de la muestra de asistencia.

CUADRO 17.0. FORMULARIOS A APLICAR SEGÚN EL TIPO DE LOTE.			
Tipo de lote	Cantidad de formularios	Cantidad de lotes	Representación
ÁREA<10000m ²	5	179	58,1%
10000m ² <ÁREA<30000m ²	10	104	33,8%
30000m ² <ÁREA<50000m ²	15	14	4,5%
50000m ² >ÁREA	20	11	3,6%
POBLACIÓN TOTAL		308	100%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

Un rango de áreas de entre de menos de 10000 m² y hasta más de 50000 m² es óptimo para el desarrollo de las inspecciones. Estos datos de área fueron definidos en función de las medidas obtenidas en QGIS, gracias a la digitalización de los lotes de la ciudad de San Isidro de Pérez Zeledón y la referencia de la Comisión Nacional de Emergencias, que sirvió como un elemento externo al proyecto para fortalecer el criterio de elección de los rangos de área.

Al definir una relación directa entre el número de encuestas a realizar (muestra óptima) y los lotes viables para inspección (población de asistencia) se prosigue con la definición de la muestra de asistencia, parámetro final que delimitará los sectores a visitar en campo para la aplicación de formularios.

El procedimiento para calcular la muestra de asistencia es sencillo, y fue desarrollado para este proyecto con base en procedimientos de estadística y muestreo aplicables a múltiples disciplinas.

Se procede mediante la asignación de un número aleatorio decimal a cada uno de los códigos numéricos previamente dados a los lotes. No se hace uso de la generación de números aleatorios entre un rango porque una de las características que se busca con este muestreo es que cada número asignado a los códigos de identificación sea único, y mediante funciones de generación de números aleatorios entre rangos un riesgo y problema común es la aparición de un mismo valor en varias ocasiones para un mismo rango, lo cual es problemático porque además de que se corre el riesgo de tener un mismo número para dos o más lotes, deja en claro un hecho inadmisibles en este tipo de determinación muestral: la selección de un

componente de la población no disminuye su probabilidad de ser elegido nuevamente en una iteración siguiente. Esto significa, que para cada iteración cada valor de la población tendría una probabilidad de 1/N de ser elegido, sin importar el número de iteración y sin importar si el valor ya ha sido elegido en una iteración previa, lo cual es un error.

Es por lo anterior que se asigna a cada código un valor aleatorio con decimales indefinidos, lo cual hace que la probabilidad de repetición de dos valores sea infinitesimalmente pequeña, despreciable, ya que no se cuenta con un rango como limitación, y todos los números reales son elegibles.

Después de haber generado y asignado los números aleatorios a cada lote, se define una jerarquía de los números generados, en función de los códigos asociados a cada lote. Así se obtienen las unidades posibles de la muestra de asistencia, y su orden de elección.

Finalmente, la forma para conocer la cantidad de lotes que conforman a la muestra de asistencia es haciendo uso de la condición determinante que da fundamento a este procedimiento: la cantidad de formularios a aplicar. Siendo que se tiene un número definido de formularios para realizar las encuestas y que el orden la jerarquía de códigos ha sido establecida aleatoriamente, es suficiente con seleccionar los lotes uno por uno, en orden descendente según la jerarquía obtenida por la relación número aleatorio-código de identificación. Los lotes se seleccionan comprobando al final de cada selección la condición del número mínimo de formularios a aplicar; la cantidad de formularios asociados a los lotes se acumulan hasta que el sumatorio de los formularios a aplicar sea igual o mayor al valor de la muestra óptima.

CUADRO 18.0. ATRIBUTOS DE LOS LOTES SELECCIONADOS COMO MUESTRA COMPLEMENTARIA			
Unidad	ID de lote	Cantidad de encuestas	Área individual (m²)
1	296	5	4464,15
2	173	10	17422,68
3	1	5	6855,64
4	256	10	16401,69
5	55	5	3698,06
6	106	10	31245,64
7	259	10	13938,14
8	230	10	14034,17
9	42	10	26818,51
10	194	10	10601,75
11	242	10	21848,57
12	231	15	46255,8
13	261	10	11620,22
14	262	10	12142,97
15	297	5	9754,78
16	110	15	47638,29
17	225	5	4356,01
18	51	5	3905,89
19	102	10	11030,77
20	130	10	10253,17

21	307	10	20194,25
22	11	10	13715,26
23	286	20	56248,29
24	22	5	7563,46
25	41	5	6994,2
26	182	5	7936,31
27	228	10	13417,22
28	275	5	8885,07
29	189	5	6081,45
30	50	5	5570,78
31	78	10	18667,64
32	140	5	5138,72
33	112	5	6510,87
34	75	10	27763,98
35	221	10	17610,17
36	120	5	3658,03
37	138	10	11285,54
38	123	10	11486,65
39	129	5	6011,94
40	280	15	41568,55
41	247	10	26177,5
42	3	10	11663,95
43	278	5	7961,18
44	174	5	4089,23
Σ		375	670487.14

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 19.0. CANTIDAD DE ENCUESTAS A APLICAR SEGÚN EL TIPO DE LOTE.			
Rango de área (m²)	Tipo de encuesta	Cantidad de encuestas	Representación
LOTE<10000	INSPECCIONES = 5	18	40.9%
10000<LOTE<30000	INSPECCIONES =10	22	50.0%
30000<LOTE<50000	INSPECCIONES =15	3	6.8%
LOTE>50000	INSPECCIONES = 20	1	2.3%
TOTAL		44	100%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

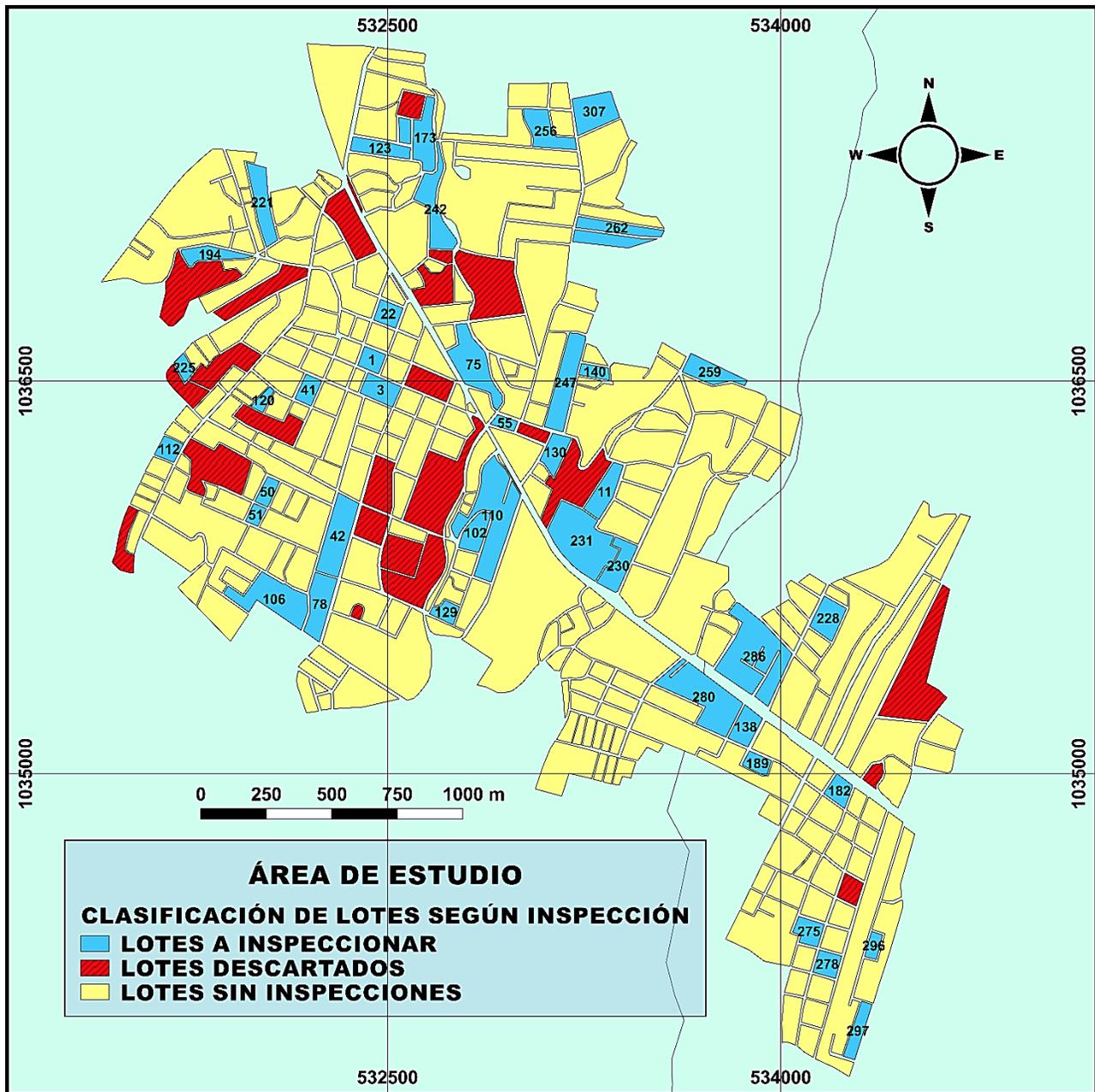


Figura 50.0. Clasificación de lotes según la muestra de asistencia definida.
Fuente: QGIS 2.14.

Se puede apreciar en la figura 50.0 la distribución uniforme de lotes que conforman a la muestra de asistencia. En el cuadro 20.0 se tiene la representación porcentual de los tipos de lote en la muestra de asistencia. Es importante notar que se obtuvo una distribución porcentual acorde con los valores

representativos de la población total, si se considera la cantidad de lotes existentes dentro de cada rango en la población de asistencia.

También es importante resaltar que la distribución de lotes a inspeccionar a lo largo y ancho del área de estudio posee una uniformidad aceptable, tal y como se puede apreciar también en la figura 50.0.

Finalmente, tras haber obtenido la localización de los lotes a inspeccionar, y con esto el conjunto de edificaciones entre las cuales se encuentran las trecientas setenta y cinco a analizar, se debe definir el modo de evaluación a emplear en las encuestas, es decir, establecer los aspectos específicos que se evalúan, el modo en que estos se evalúan, y cómo los mismos se correlacionan con la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Evaluación de las unidades muestrales

Las unidades de la muestra óptima deben ser inspeccionadas una a una, haciendo uso de una metodología que trabaje acorde con las necesidades a satisfacer en el proyecto. Ya se ha establecido que en proyectos que buscan evaluar la vulnerabilidad sísmica regional (riesgo) lo más recomendable es usar una metodología determinística para la evaluación individual del parámetro de la vulnerabilidad. Sin embargo, definir el tipo de metodología es simplemente un condicionante inicial, ya que una vez declarado este se requiere proceder con una serie de decisiones más puntuales.

La metodología determinista indica la ausencia de un análisis matemático extenso relacionado con las estructuras, ya que se busca una inspección funcional y breve. Esto, en otras palabras, se traduce en el uso de métodos cualitativos para la evaluación de la vulnerabilidad.

En este estudio se toman como referencia los estudios elaborados por Jiménez (2012) y Villanueva (2015); investigaciones teórico/prácticas sobre la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, desarrolladas dentro de las fronteras del territorio costarricense, y con resultados válidos para la ciudad de Cartago específicamente.

En Jiménez (2012) se lleva a cabo una revisión exhaustiva de diversos parámetros y datos relevantes sobre el tema de vulnerabilidad sísmica y la evaluación de esta, con el fin de confeccionar un formulario de inspección de edificaciones con el cual sea viable evaluar las construcciones encontradas en sectores dentro de los límites fronterizos de Costa Rica. El formulario desarrollado encuentra sus fundamentos en el procedimiento presentado en el FEMA 154: INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA, mismo que fue citado brevemente en el capítulo de generalidades de este informe.

El formulario diseñado por Jiménez (2012) es seleccionado para realizar las inspecciones necesarias en el área de estudio de este proyecto, debido a que se adapta a las condiciones del sitio e incluye la evaluación de datos propios de Costa Rica, permitiendo, por ejemplo, la determinación de la edad de las estructuras en función del código sísmico, clasificando cada una según la reglamentación estructural vigente al momento en que dichas estructuras fueron construidas. Además de la edad, el formulario considera los resultados del informe técnico T2-5 de ERN-CAPRA para clasificar cada uno de los tipos constructivos encontrados en la región, e incluye la evaluación del estado de conservación de cada edificación.

Los parámetros dados en el formulario de inspección tienen, por supuesto, la intención de reunir la información pertinente para determinar la vulnerabilidad individual de cada edificación estudiada, a través de correlaciones entre los parámetros registrados en las encuestas y valores teóricos asociados a la vulnerabilidad obtenidos según el criterio de profesionales especializados en estudios de amenaza y riesgo sísmico y, deducciones inferidas con la revisión de las fuentes bibliográficas.

Empleando el formulario de inspección, se busca crear un inventario que contenga toda información requerida para estimar apropiadamente la vulnerabilidad sísmica regional en el centro urbano de Pérez Zeledón.

El formulario utilizado para las encuestas de este proyecto se muestra en el Anexo 4. En el mismo se consideran, además de los aspectos mencionados anteriormente, datos sobre la configuración de las estructuras, el número de pisos de estas, el tipo de diafragmas que poseen, sus cubiertas, suelo, fuentes de riesgo no estructurales, etc.

Para evaluar los inmuebles necesarios, es decir, la cantidad especificada en la muestra óptima, se localizaron estos a través de una aplicación GPS, en campo, para verificar la ubicación de cada unidad según lo estipulado en las imágenes satelitales georreferenciadas del área de estudio.

Además de esta verificación, fue necesario definir un cronograma de visitas, para poder organizar la información de manera eficaz y rápida.

Las visitas se realizaron en un lapso comprendido entre el viernes 13 de mayo de 2016 y el viernes 27 de mayo del mismo año. Para seleccionar la cantidad de lotes a inspeccionar en cada fe-

cha del cronograma, así como la distribución geográfica de estos se tomaron en cuenta los resultados del cruce de información entre la muestra óptima y la muestra de asistencia (inspecciones por lote) y, así, se confeccionaron grupos de inspección diarios, sumando en cada día veinticinco encuestas al total acumulado.

En el cuadro 20.0 es posible observar el desglose completo de los grupos de inspección diarios, así como la fecha en que cada uno de estos grupos fue visitado y evaluado.

CUADRO 20.0. PROGRAMACIÓN DE LAS VISITAS DE INSPECCIÓN				
Grupo	Fecha	ID de lote	Parcial	Total
I-1	13/05/16	123	10	25
		173	10	
		174	5	
I-2	14/05/16	22	5	25
		262	10	
		256	10	
I-3	15/05/16	55	5	25
		221	10	
		307	10	
I-4	16/05/16	225	5	25
		194	10	
		242	10	
I-5	17/05/16	3	10	25
		41	5	
		261	10	
I-6	18/05/16	42	10	25
		78	10	
		120	5	
I-7	19/05/16	259	10	25
		75	10	
		1	5	
I-8	20/05/16	106	10	25
		50	5	
		51	5	
		112	5	
I-9	21/05/16	130	10	25

		140	5	
		247	10	
I-10	22/05/16	110	15	25
		102	10	
I-11	23/05/16	231	15	25
		11	10	
I-12	24/05/16	189	5	25
		286	20	
I-13	25/05/16	228	10	25
		280	15	
I-14	26/05/16	138	10	25
		230	10	
		129	5	
I-15	27/05/16	182	5	25
		275	5	
		278	5	
		296	5	
		297	5	

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

Tras haber inspeccionado cada lote incluido en la muestra de asistencia y haber elaborado el inventario de edificaciones del área de estudio, es indispensable categorizar cada una de las tipologías constructivas encontradas en la región, ya que a partir de este procedimiento se definen, no solo los tipos de estructuras representativos del cantón de Pérez Zeledón, sino también, en un nivel más puntual, las características dominantes de cada lote u unidad de terreno en términos de materiales y tipologías constructivas. En otras palabras, un lote es considerado una unidad de terreno, y para cada unidad de terreno, en función de los resultados de campo obtenidos con las inspecciones, se define una estructura tipo, cuyas propiedades se aplican por extensión a la totalidad de la unidad de terreno en la cual se encuentra inscrita.

Lo anterior, claro, sin olvidar que esta asignación se realiza acorde a los objetivos de este estudio en específico, por lo que debe comprenderse que las propiedades establecidas para cada unidad de terreno o cuadrante están limitadas por los tipos de vivienda y edificaciones de comercio encontrados en la zona —así como la cantidad de los mismos— y no se pretende asignar propiedades a los cuadrantes y declararlas como absolutas, sino

que dichas asignaciones son una consecuencia directa del alcance de este proyecto y la metodología empleada para realizarlo.

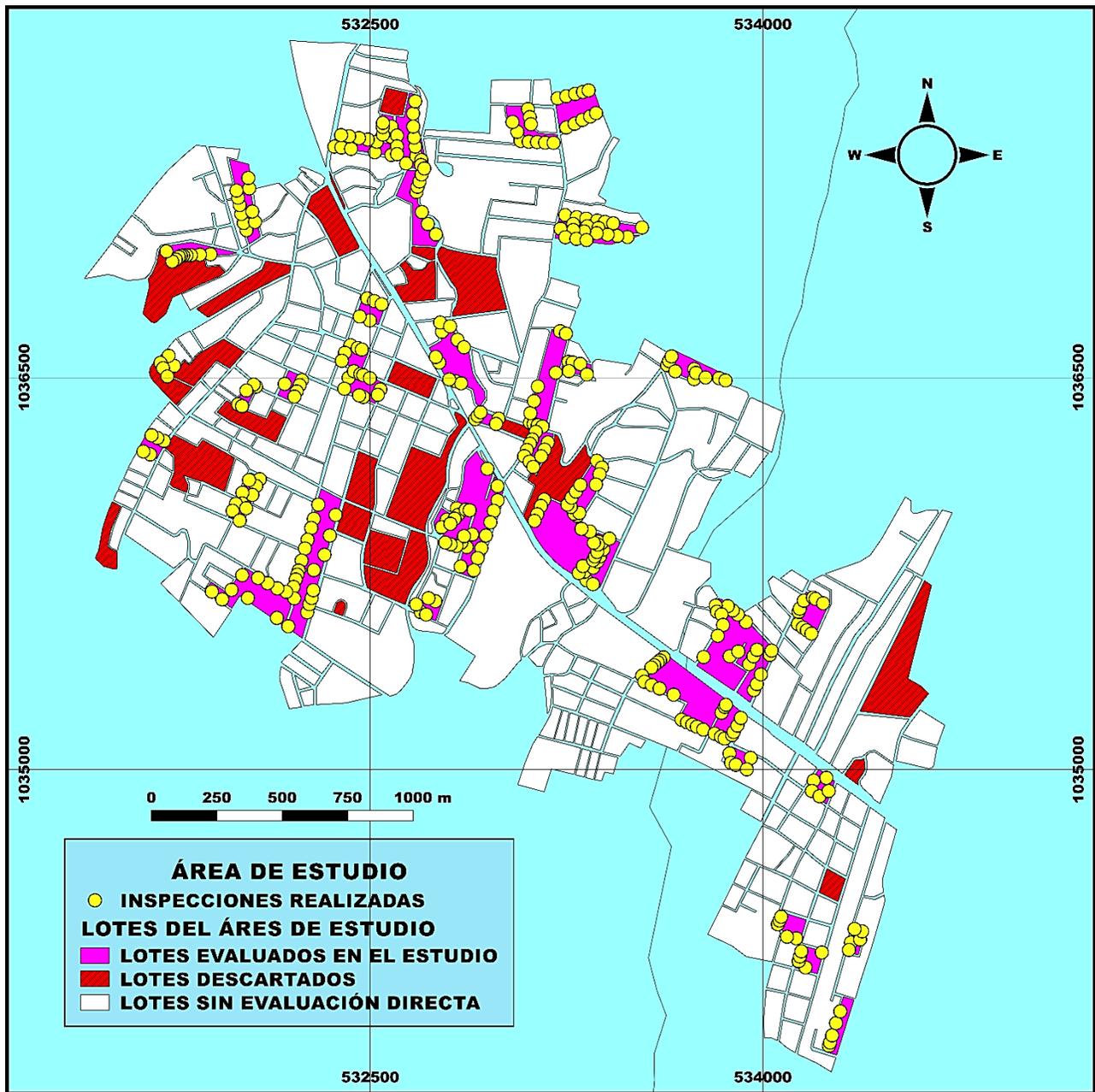


Figura 51.0. Inspecciones realizadas dentro del área de estudio.
Fuente: QGIS 2.14.

Al realizar una revisión de cada unidad de terreno, evaluando las tipologías presentes en estas y, seleccionando los tipos constructivos que prevalecen

como dominantes en cada caso, se llega a la determinación de cuarenta y cuatro unidades de terreno identificadas, inspeccionadas y con propiedades definidas, esto es, por supuesto, debido a

que esa es la cantidad de lotes que componen a la muestra de asistencia, lotes sobre los cuales se tienen datos registrados en el inventario de edificaciones desarrollado en este estudio.

Contar con estos resultados permite abordar una nueva cuestión, y esa es, la identificación y asignación de propiedades para aquellas unidades de terreno que no forman parte de la muestra de asistencia y sobre las cuales, por consiguiente, no se cuenta con datos inmediatos. Después de todo, el área de estudio se seccionó inicialmente en treientos ocho lotes, y los productos finales del estudio de vulnerabilidad deben ser válidos para la mayor parte posible de la población de asistencia.

Para solucionar el problema de la ausencia de datos directos en lotes no inspeccionados, se acude a un método de herencia sugerido por la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica (CNE) en Jiménez (2012). El método en cuestión consiste en validar las características asociadas a cada unidad de terreno inspeccionada para aquellas unidades de terreno circundantes y próximas. Así, se permite que la estructura tipo de un lote en específico sea también la estructura tipo de los lotes cercanos que no cuentan con registro alguno, conformándose así subgrupos de tipos constructivos iguales.

No obstante, es importante considerar la incertidumbre y el error asociado a este procedimiento de asignación por herencia. El que ciertas unidades de terreno adopten o hereden las características de aquellas en las que se practicaron encuestas indudablemente representa la inducción de una incertidumbre a los resultados a obtener para estos sectores secundarios, razón por la cual en los mapas de vulnerabilidad se debe diferencia

entre aquellos terrenos cuyas propiedades son determinadas por el análisis de resultados de las inspecciones, y aquellos cuyas características finales son establecidas de manera indirecta.

Además, con el fin de limitar el error en los resultados, el rango de herencia debe ser limitado, en Jiménez (2012) se establece, en promedio, un radio de 400 m de herencia, medido desde un origen ubicado aproximadamente en el centroide de área de los cuadrantes con características proporcionadas como resultado de las encuestas.

En este proyecto, dado el hecho de que el área de estudio posee un área superficial menor a la del territorio estudiado en Jiménez (2012), considerando la proporción entre ambos sitios y también la cantidad de encuestas realizadas, lotes inspeccionados y la distribución de estos, se llega a la conclusión de que un radio de 400 m de longitud es demasiado alto como para ser funcional dentro del marco de trabajo de este estudio, y en cambio, dado que el método de inspección proporcionó una buena cantidad y distribución de encuestas a lo largo de toda el área de estudio, se deduce que numérica e intuitivamente que un radio de herencia con valores máximos entre los 250 m y 300 m es mucho más apropiado para este caso de estudio.

Cabe resaltar, que el procedimiento de herencia no aplica de ningún modo para las unidades de terreno descartadas previo al cálculo de los elementos a inspeccionar, es decir, aquellas que debido a las razones anteriormente especificadas en este apartado no fueron consideradas como unidades potenciales para ser seleccionadas dentro de la muestra de asistencia.

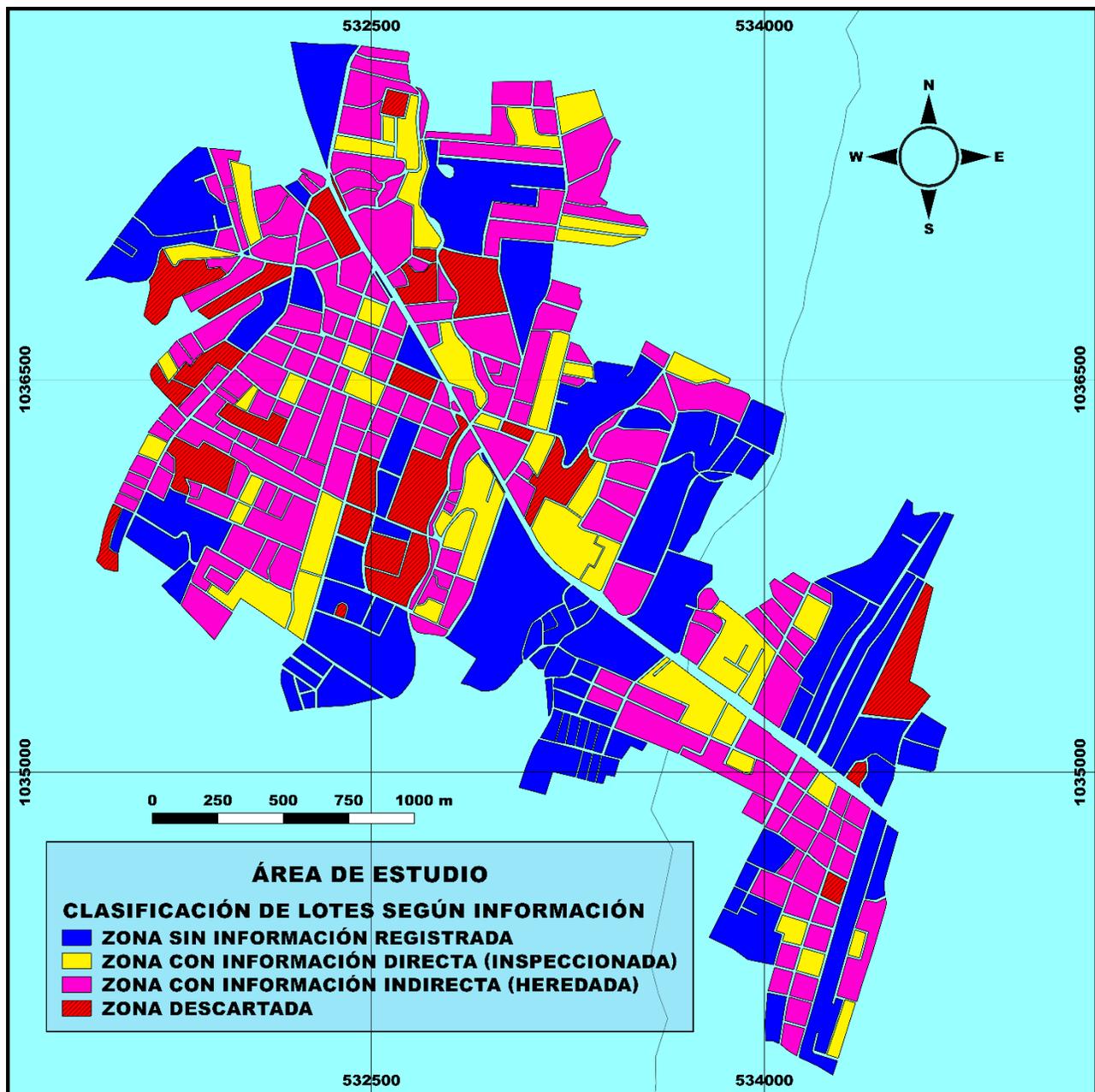


Figura 52.0. Clasificación de unidades de terreno en función del tipo de información asociada a estas.
Fuente: QGIS 2.14.

Tomando en cuenta la distribución de las unidades de terreno, así como las observaciones generales del área de estudio realizadas al momento de efectuar las inspecciones, se concluyó la configuración de las zonas heredadas en los casos en que existía traslape entre dos o más de las superficies imaginarias creadas por el radio de herencia de cada unidad de terreno encuestada. En otras palabras,

en aquellos casos en los que uno de los lotes sin información estaba dentro del rango de herencia de dos o más lotes inspeccionados, la decisión sobre cuál tipo de estructura y características debían ser heredadas se tomó con base en las características físicas observadas en campo durante los recorridos de inspección.

Por otra parte, se tomó la determinación de limitar la validez de las herencias en función del tamaño de las unidades de terreno. Esto significa que en aquellos escenarios en los que un lote sin inspeccionar se encontraba dentro del rango de herencia de uno inspeccionado, pero el área superficial del

mismo era superior a la del lote con características a heredar por más de un 100%, la herencia se consideraba inválida, permaneciendo el lote de mayor tamaño como una zona sin información a pesar de estar dentro del rango de herencia establecido.

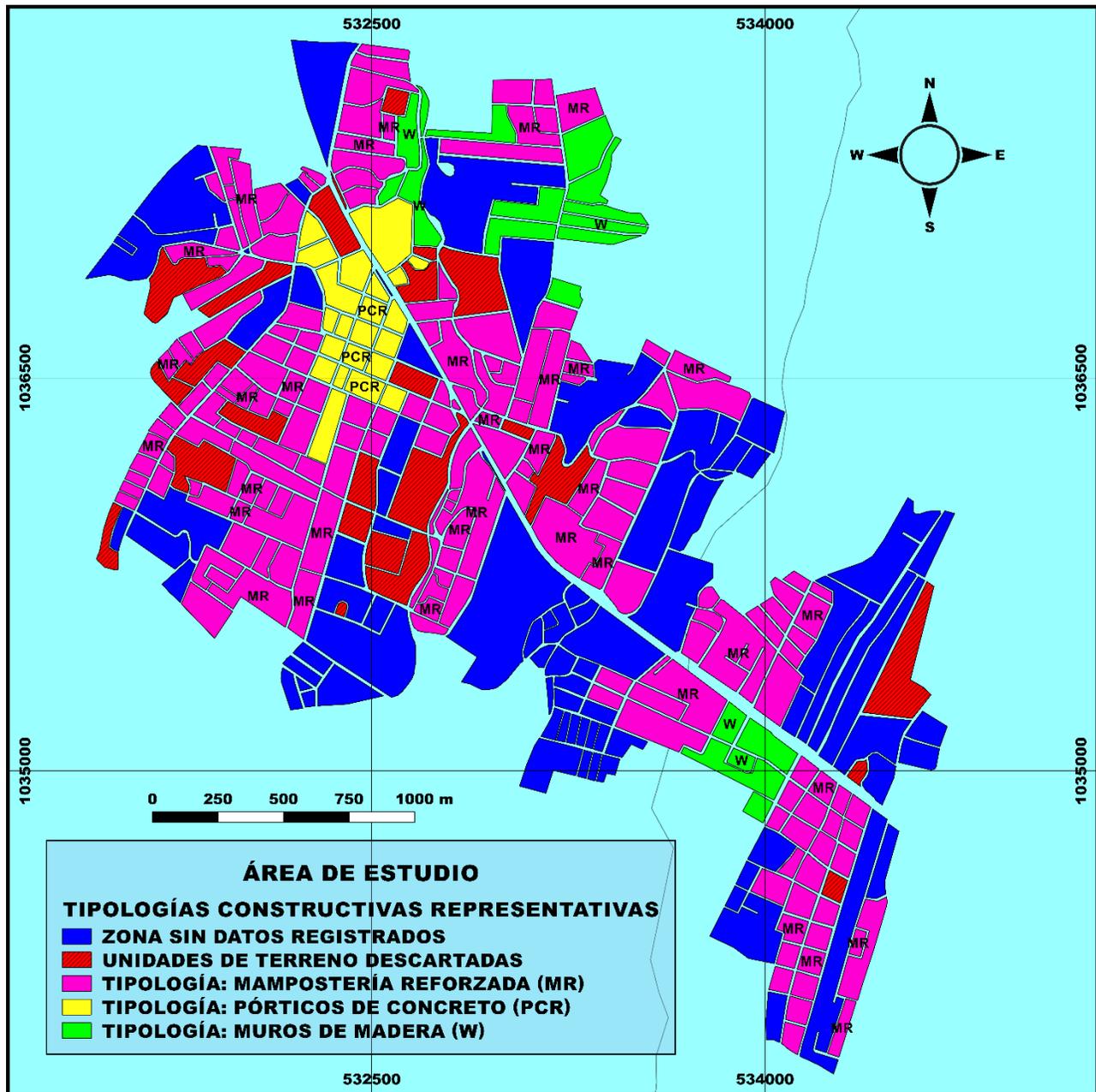


Figura 53.0. Grupos de unidades de terreno clasificados según las tipologías constructivas dominantes en cada uno.
Fuente: QGIS 2.14.

Con las unidades de terreno clasificadas en términos de la tipología constructiva dominante, y con la definición del alcance de esta clasificación dentro del área de estudio, se prosigue con la fijación de un método que permita llevar las observaciones y registros cualitativos relacionados con la vulnerabilidad física de las edificaciones a un resultado numérico a través del cual se posibilita la cuantificación del parámetro para fines analíticos.

El procedimiento para la cuantificación de la vulnerabilidad requiere, en primera instancia, de una escala que refleje los niveles de gravedad probable a los cuales pueden estar expuestas las estructuras en caso de un desastre, dependiendo de sus propiedades al momento de ser analizadas.

En el cuadro 21.0 se muestra la escala de vulnerabilidad utilizada en Jiménez (2012) para expresar el nivel de vulnerabilidad de una estructura.

CUADRO 21.0 ESCALA DE VULNERABILIDAD FÍSICA	
Nivel de vulnerabilidad	Descripción
1	Vulnerabilidad muy baja
2	Vulnerabilidad baja
3	Vulnerabilidad media
4	Vulnerabilidad alta
5	Vulnerabilidad muy alta

Fuente: Jiménez (2012); realizado en Microsoft Excel 2013.

Con la escala de vulnerabilidad física establecida, se procede a concretar el modo en que la posición de cada elemento evaluado se definirá, con lo cual se busca demostrar cómo es que cada uno de los elementos evaluados por medio de este método figura dentro de alguna de las cinco categorías del cuadro 21.0.

Para cuantificar la vulnerabilidad sísmica se asignan valores de peso a los atributos críticos registrados en las inspecciones de campo. En este caso, se considera que los atributos críticos son: edad (E), tipología constructiva (TC) y estado de conservación (EC).

El peso de cada uno de estos atributos se determina en función de la vulnerabilidad sísmica que representan para la estructura que contribu-

yen a describir, considerando no solamente la importancia sísmo-resistente de cada aspecto por separado, sino también el comportamiento y la relevancia de cada uno de ellos desde un punto de vista comparativo entre las distintas tipologías.

El peso de cada atributo crítico se muestra en el cuadro 22.0.

CUADRO 22.0. CONTRIBUCIÓN DE CADA ATRIBUTO CRÍTICO A LA VULNERABILIDAD SÍSMICA		
Parámetro		Peso
Edad	Previa a 1974	4
	Entre 1974 y 2001	3
	Después de 2002	2
Estado de conservación	Excelente	1
	Bueno	2
	Regular	3
	Malo	5
Tipo constructivo	Tugurio	5
	Pórticos de concreto	2
	Mampostería confinada	2
	Mampostería reforzada	3
	Mampostería simple	3
	Muros de madera	3
	Prefabricado	3

Fuente: Jiménez (2012); realizado en Microsoft Excel 2013.

Al contar con los valores de peso expuestos en el cuadro 22.0, el inventario de características cualitativas de las edificaciones encuestadas, así como el área de estudio debidamente seccionada e identificada según los grupos de tipologías constructivas dominantes, se puede calcular la vulnerabilidad sísmica de la región estudiada. Esto a través de la confección de mapas para cada atributo crítico, en QGIS.

Los atributos críticos deben generalizarse, con el fin de adquirir atributos críticos para las unidades de terreno y no solamente para las edificaciones como entes individuales.

Para determinar el valor de los atributos críticos de cada unidad de terreno, se calculó la media ponderada de los factores de peso correspondientes a los atributos críticos de todas las edificaciones inspeccionadas.

Una vez confeccionados los mapas de atributos, estos deben combinarse entre sí, ejecutando para esto una operación de cruce, la cual permite la multiplicación de las características de cada mapa, para obtener un resultado completamente nuevo con las características de sus predecesores.

El mapa resultante del cruce de datos se expresa, para este proyecto, en términos de lo que se ha denominado “Índice grupal de vulnerabilidad sísmica”, que es un parámetro entre 0 y 1 que representa la vulnerabilidad sísmica de una unidad de terreno en general y no de una edificación en particular.

Además, tras la determinación de la vulnerabilidad sísmica, haciendo uso de los resultados dados por el análisis de los tres escenarios sísmicos simulados, se puede diagnosticar la vulnerabilidad sísmica regional —o riesgo sísmico— de la zona central de Pérez Zeledón en términos de vivienda y edificaciones de comercio.

Para realizar lo anterior se proponen niveles de daño estructural en función de la intensidad instrumental de los terremotos simulados.

Los niveles de daño estructural para estos escenarios de riesgo fueron asignados según los datos registrados en la literatura referente al tema de intensidad sísmica y el daño físico asociado a cada valor de la escala sismológica Mercalli Modificada.

CUADRO 23.0. ESCALA DE DAÑO ESTRUCTURAL PARA RIESGO SÍSMICO

Intensidad	Identificador	Daño estructural
Menor a V		Nulo
V		Muy ligero
Entre V y VI		Ligero
V		Leve
Entre V y VII		Intermedio
VIII		Considerable
Entre VIII y IX		Grave
X		Muy grave
X+		Catastrófico

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 24.0. PORCENTAJES DE DAÑO ESPERADOS SEGÚN INTENSIDAD E IDENTIFICADOR ASOCIADO

Intensidad	Identificador	Daño menor	Daño mayor
Menor a V		0%	5%
V		5%	10%
Entre V y VI		10%	15%
V		15%	20%
Entre V y VII		20%	30%
VIII		30%	40%
Entre VIII y IX		40%	60%
X		60%	80%
X+		80%	100%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

Resultados

Mapas de amenaza sísmica

A través del software de manejo de información geográfica se calcularon los mapas de amenaza sísmica para el área central de Pérez Zeledón.

El sector para la cual se realizó el cálculo es más extenso que aquel que fue sometido a la evaluación y el censo para la determinación de la vulnerabilidad sísmica, esto se debe a que el área censada corresponde a la zona de mayor desarrollo urbano del cantón de Pérez Zeledón, mientras que el área para la cual se calculó el efecto de los escenarios sísmicos planteados abarca tanto la región censada como los alrededores de esta, mismos que forman parte del núcleo del cantón, incluyendo así a los distritos de mayor desarrollo. Además, el extender el cálculo de la amenaza representativa de los tres escenarios propuestos es indispensable para poder obtener una noción general de cómo se comporta el territorio estudiado ante la ocurrencia de cada simulación, así como la atenuación o amplificación que podría ser provocada por las condiciones locales del subsuelo, y la disminución de la intensidad sísmica en función de la distancia.

Los mapas realizados, como se estableció en el capítulo anterior, corresponden a escenarios sísmicos de diferentes ubicaciones geográficas y profundidades, y responden a magnitudes de momento (Mw) de 6.3, 5.3 y 5.0 respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan en términos de la aceleración pico del terreno (PGA), expresada tanto en términos del aumento de la velocidad por unidad de tiempo (m/s^2) como de un porcentaje de la gravedad terrestre determinado (%g).

También se incluyen los resultados en función de la intensidad instrumental según la escala sismológica Mercalli Modificada, siendo esta calculada como una medida indirecta, haciendo uso de las relaciones empíricas establecidas en Wald (1999a).

Como complemento para los mapas se presentan las curvas de atenuación —o de movimiento de terreno— obtenidas para las condiciones geológicas de suelo y roca en forma independiente. Estas curvas se calcularon para magnitudes de momento (Mw) entre 5.0 y 7.0 con el fin de representar a las magnitudes de los escenarios sísmicos simulados dentro del rango estimado para las curvas.

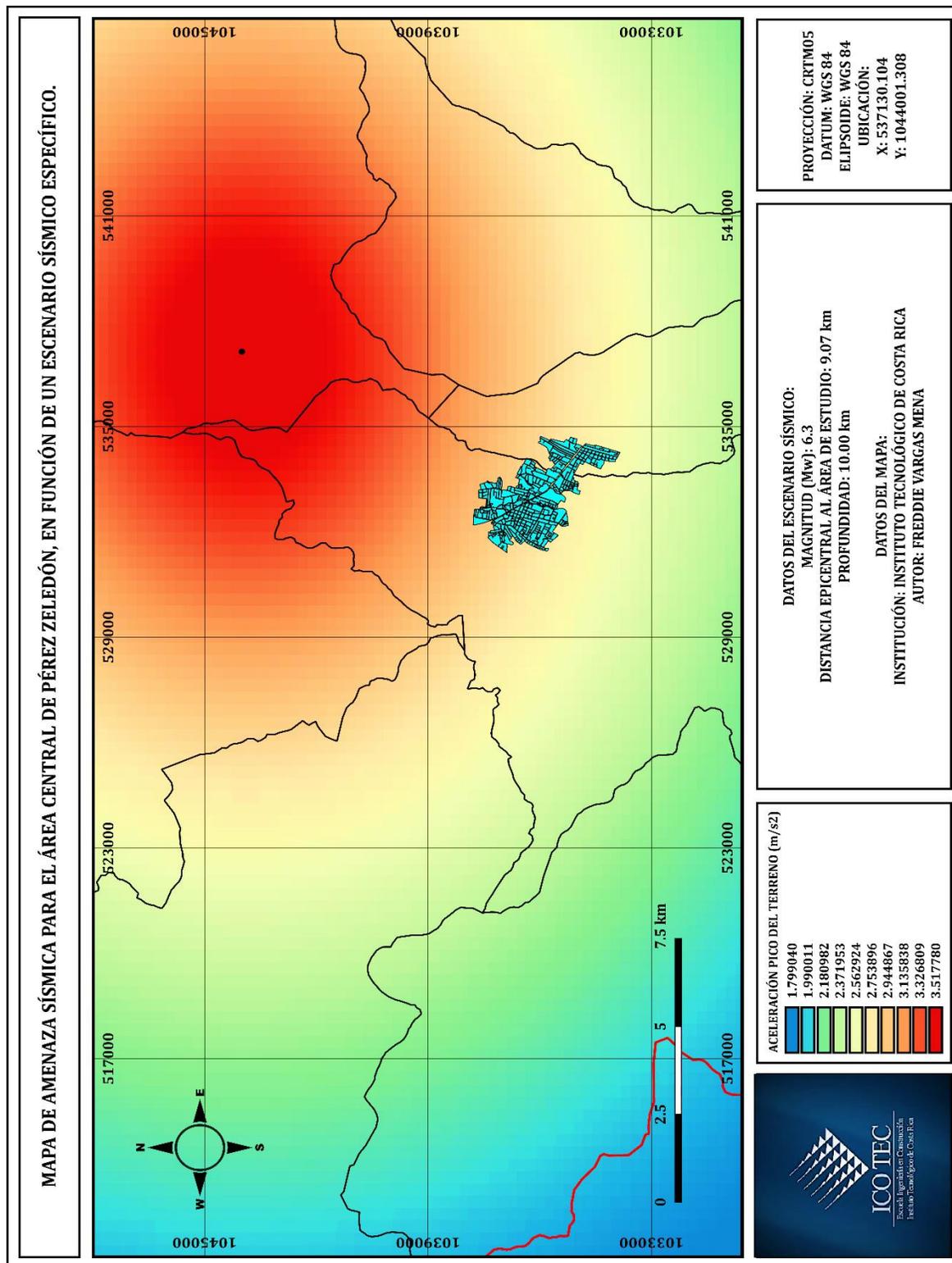


Figura 54.0. Amenaza sísmica para el primer escenario sísmico, en términos de PGA (m/s²)
 Fuente: QGIS 2.14.

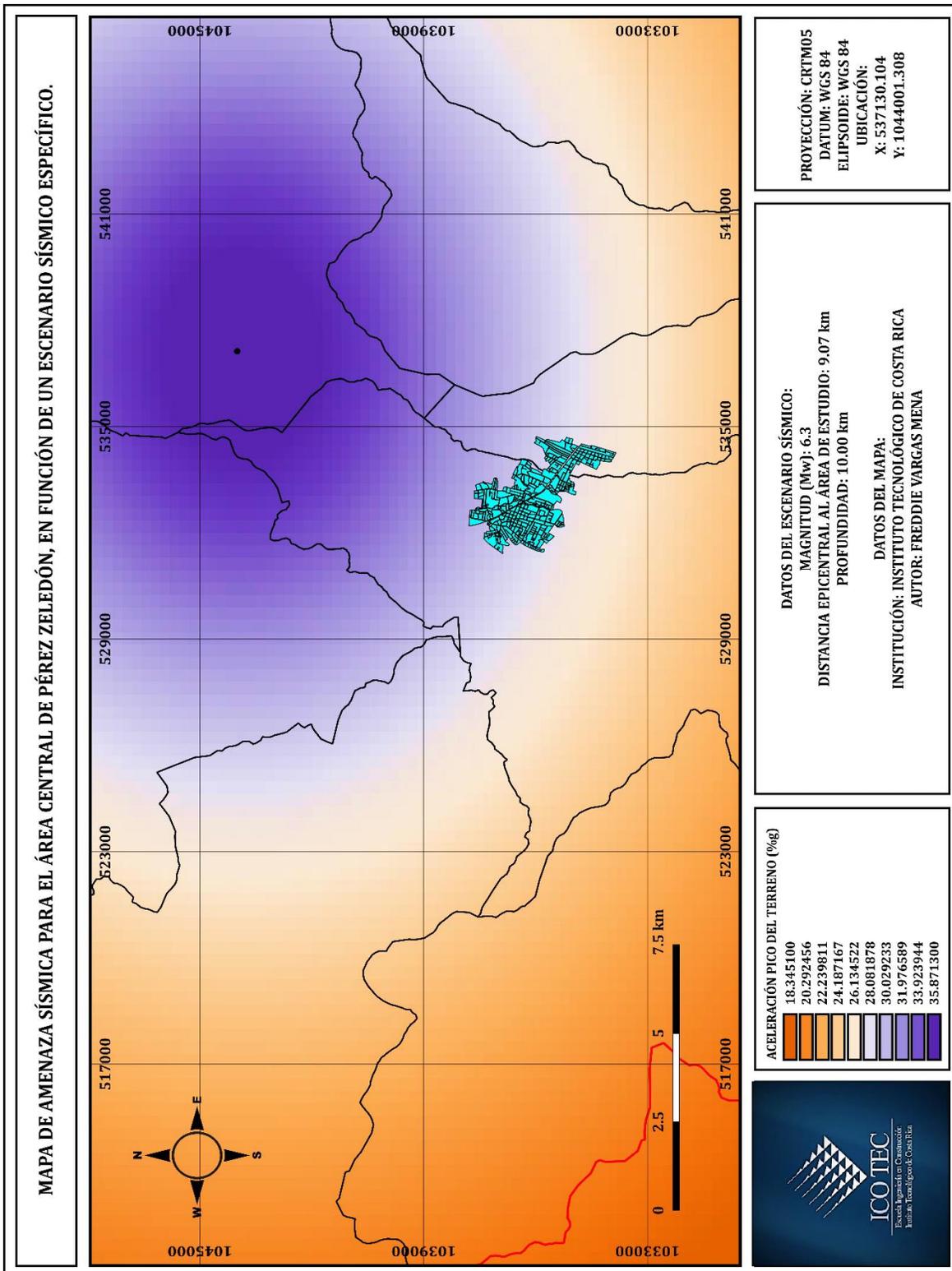


Figura 55.0. Amenaza sísmica para el primer escenario sísmico, en términos de PGA (%g)
Fuente: QGIS 2.14.

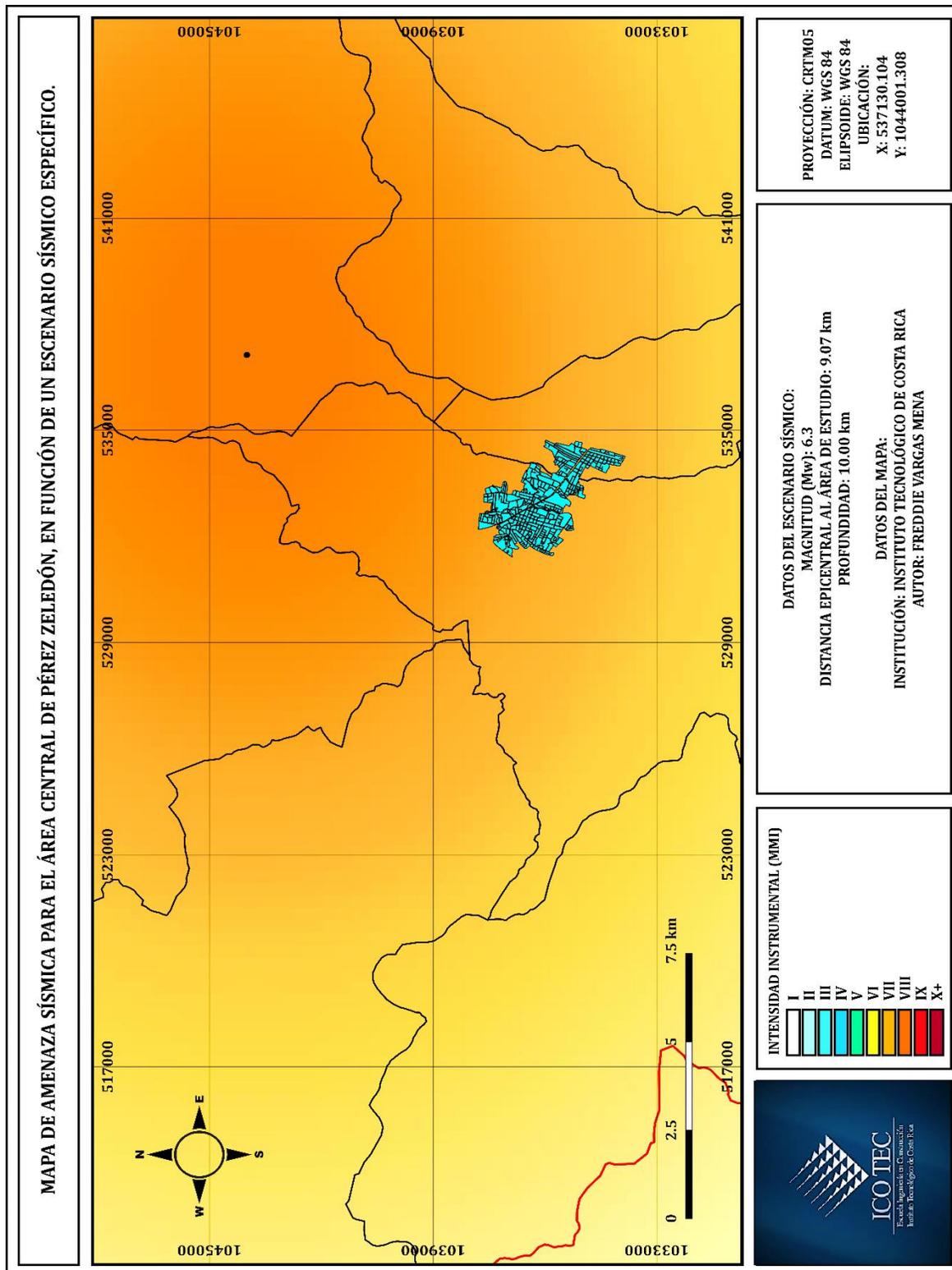


Figura 56.0. Amenaza sísmica para el primer escenario sísmico, en términos de la intensidad instrumental (MMI)
 Fuente: QGIS 2.14.

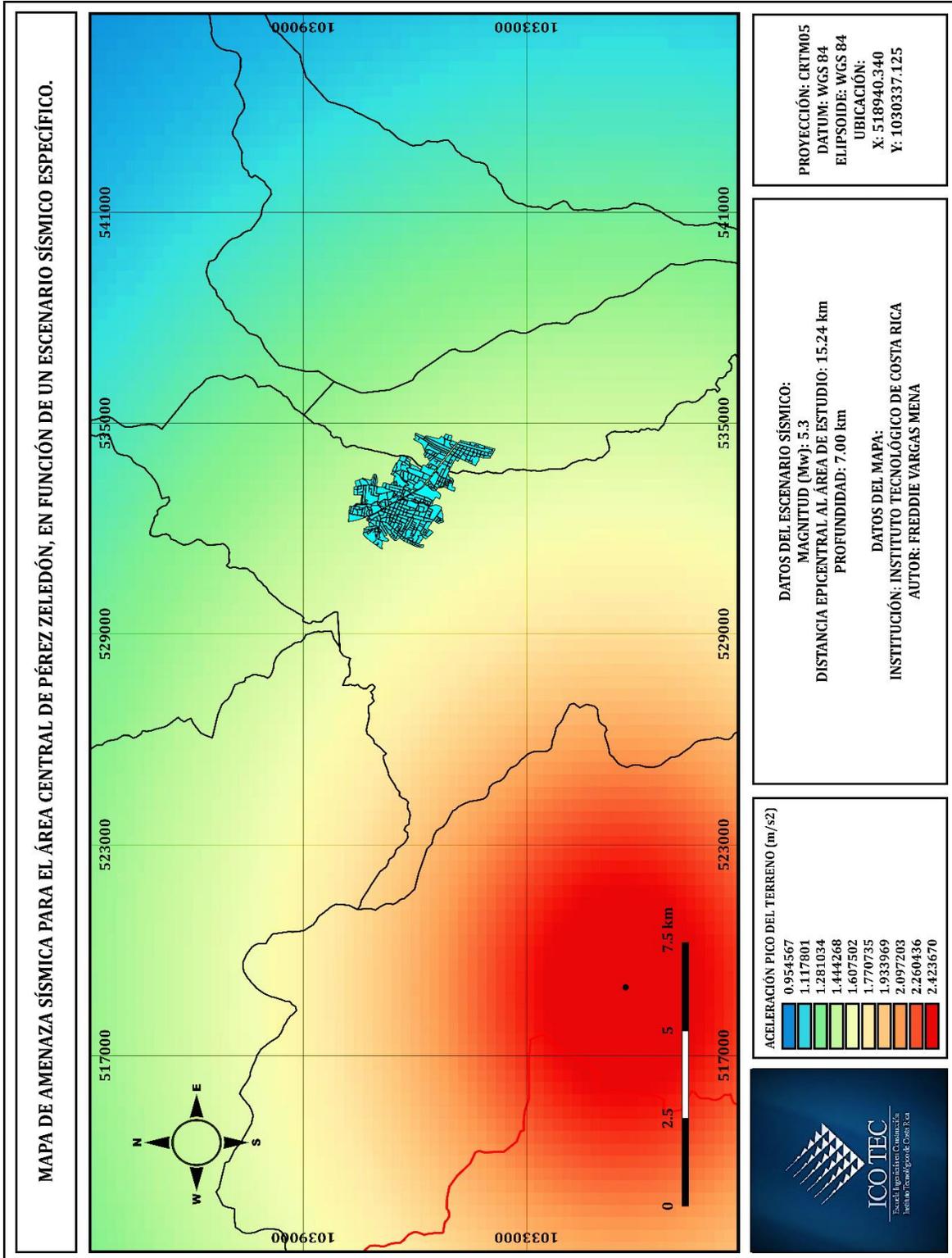


Figura 57.0. Amenaza sísmica para el segundo escenario sísmico, en términos de PGA (m/s²)
 Fuente: QGIS 2.14.

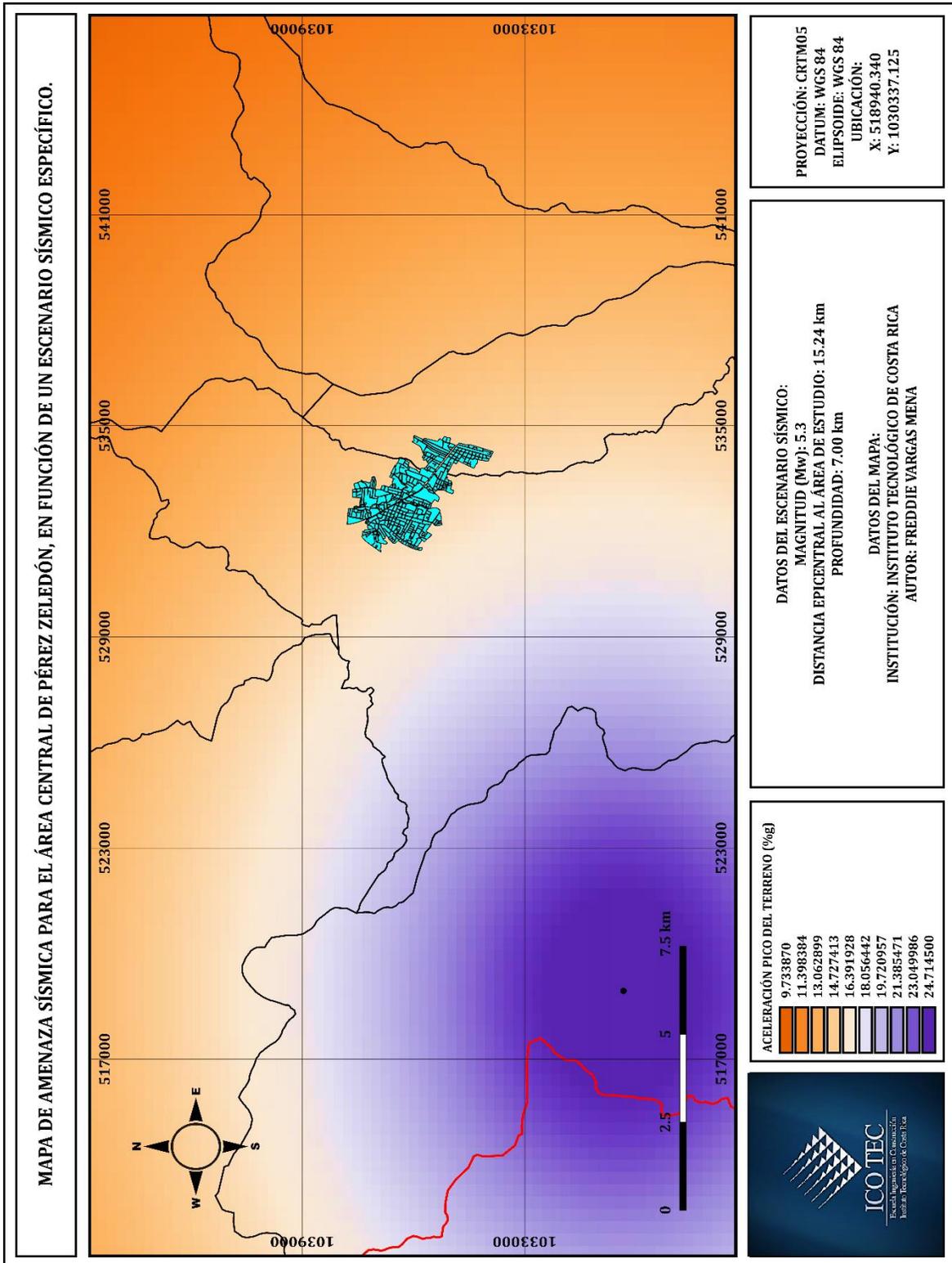


Figura 58.0. Amenaza sísmica para el segundo escenario sísmico, en términos de PGA (%g)
Fuente: QGIS 2.14.

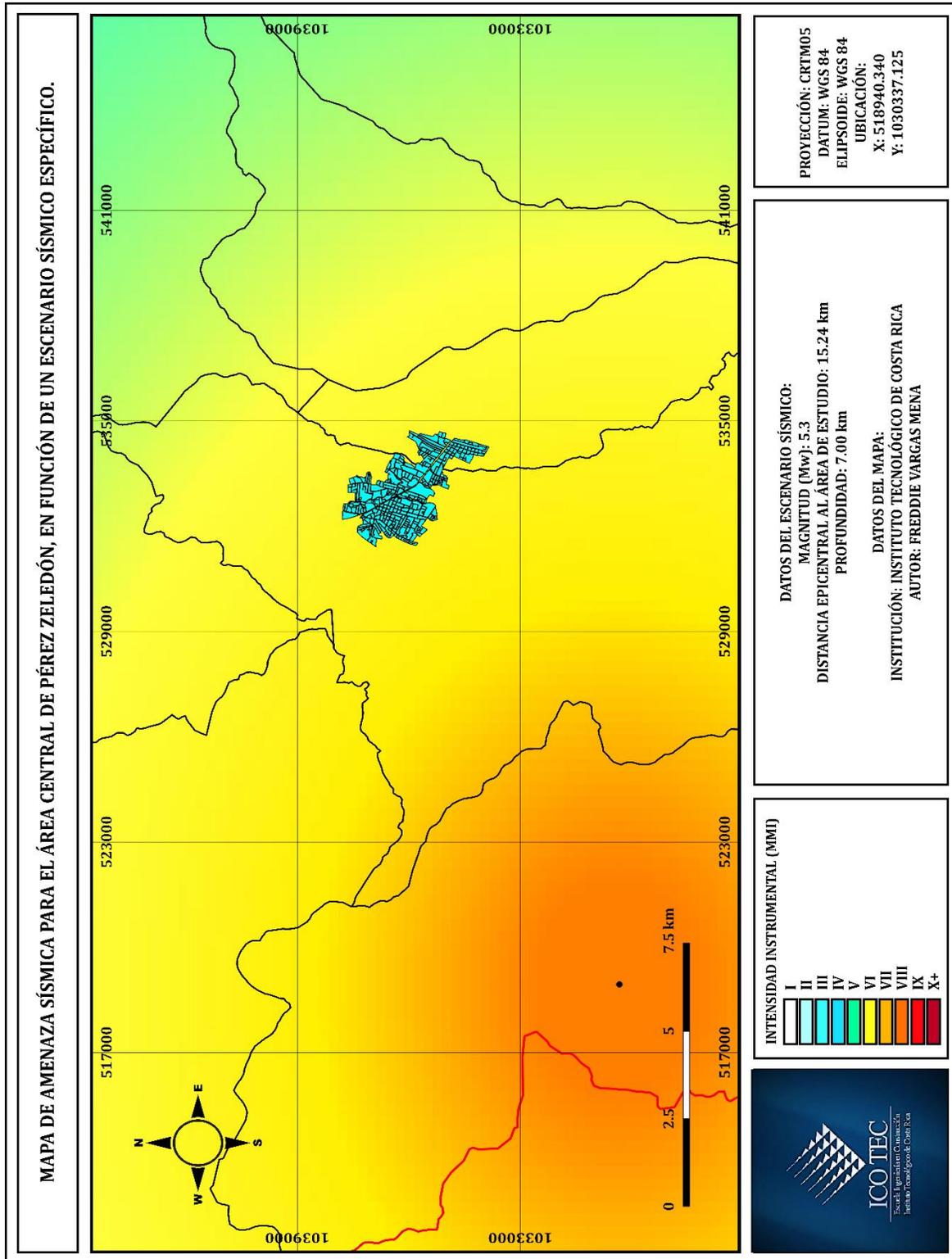


Figura 59.0. Amenaza sísmica para el segundo escenario sísmico, en términos de la intensidad instrumental (MMI)
 Fuente: QGIS 2.14.

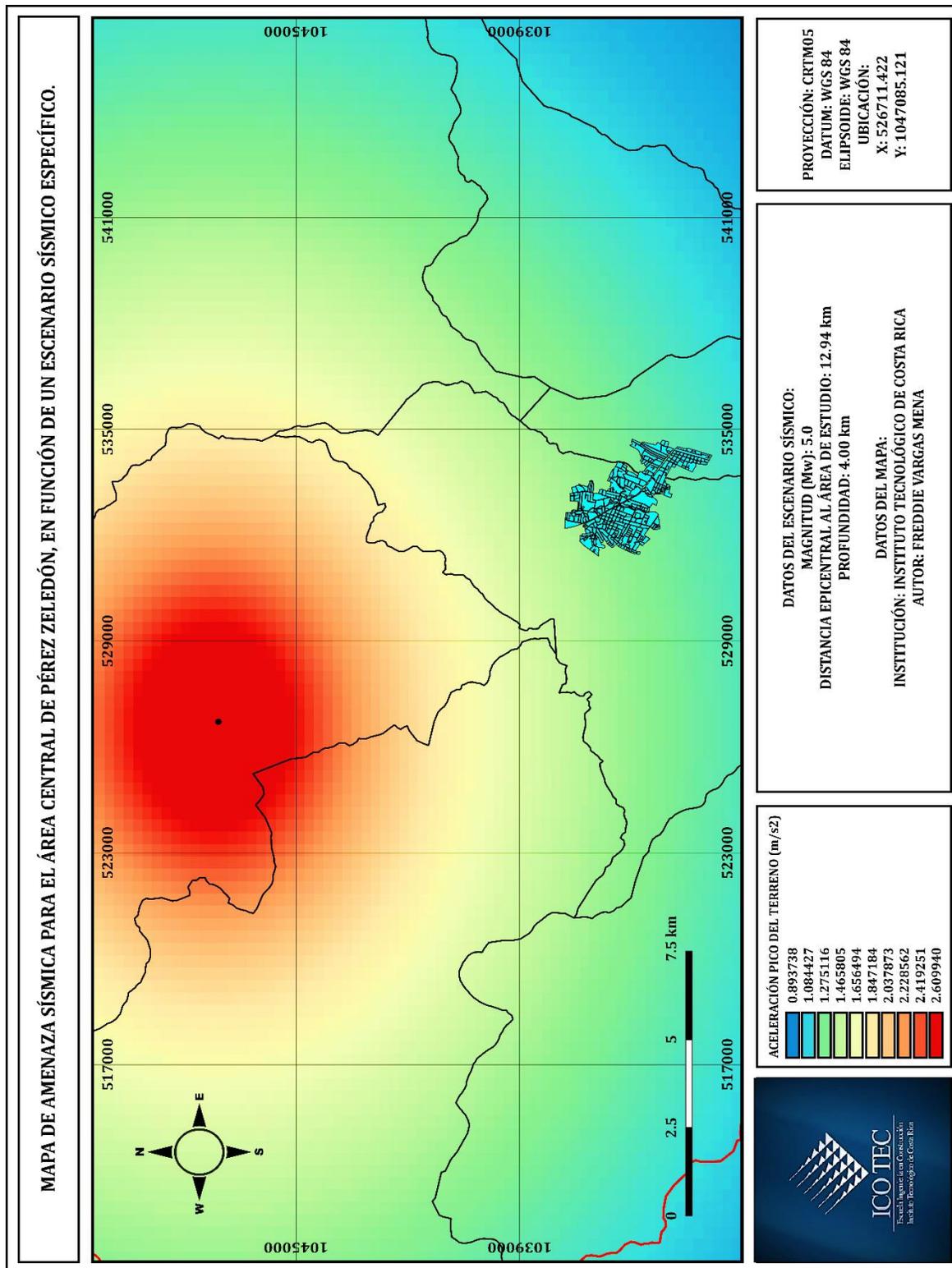


Figura 60.0. Amenaza sísmica para el tercer escenario sísmico, en términos de PGA (m/s²)
 Fuente: QGIS 2.14.

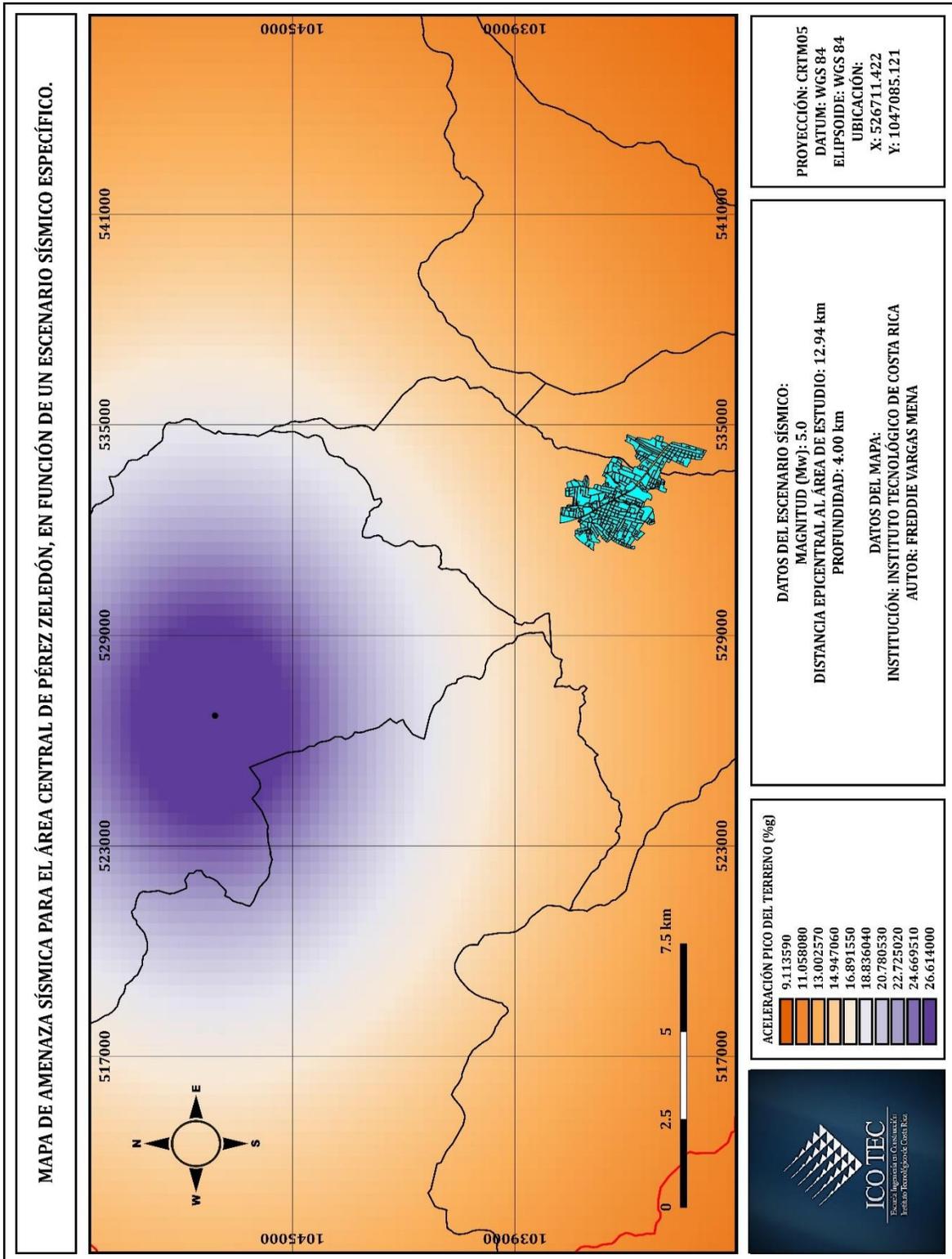


Figura 61.0. Amenaza sísmica para el tercer escenario sísmico, en términos de PGA (%)
Fuente: QGIS 2.14.

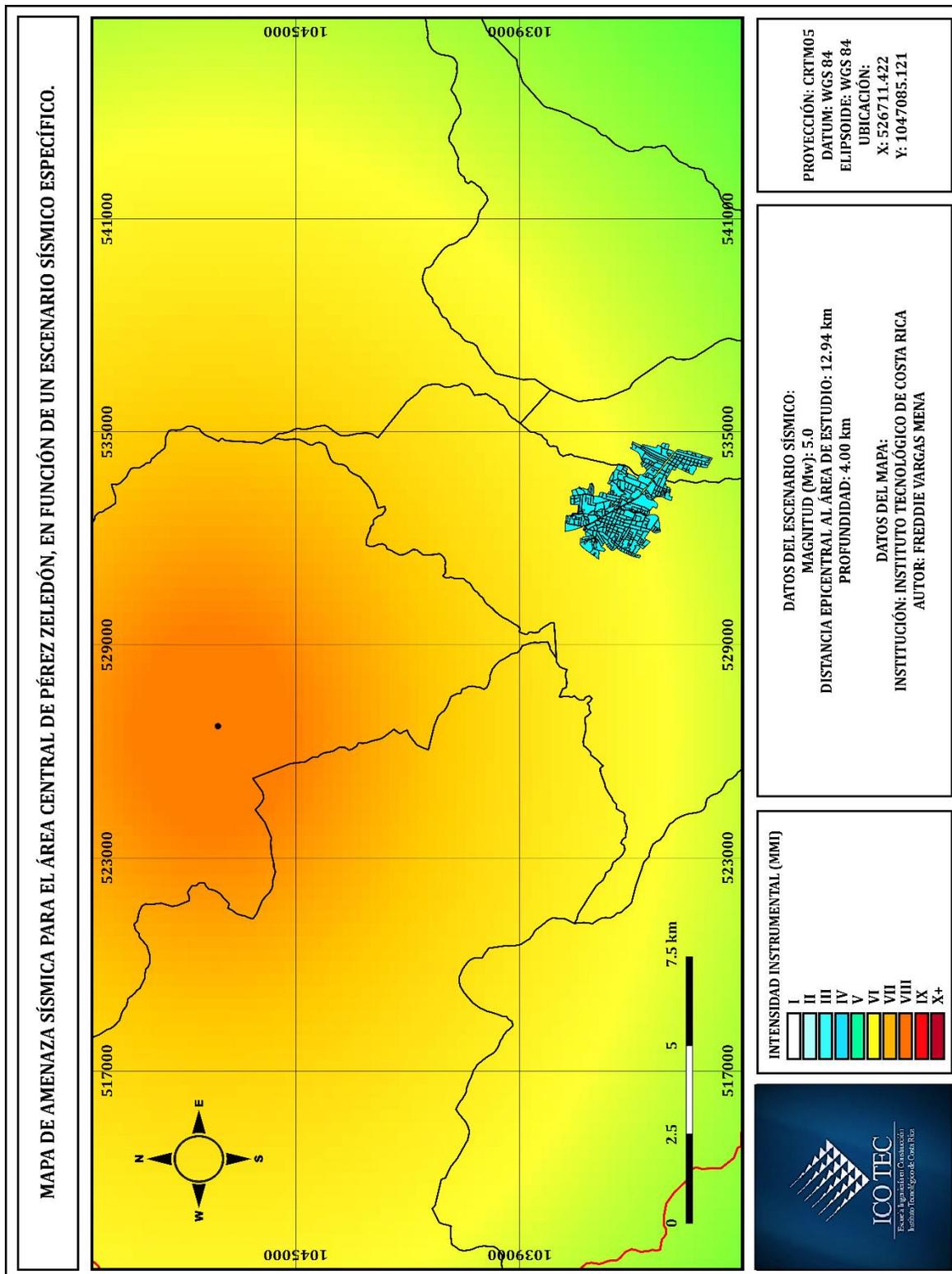


Figura 62.0. Amenaza sísmica para el tercer escenario sísmico, en términos de la intensidad instrumental (MMI)
Fuente: QGIS 2.14.

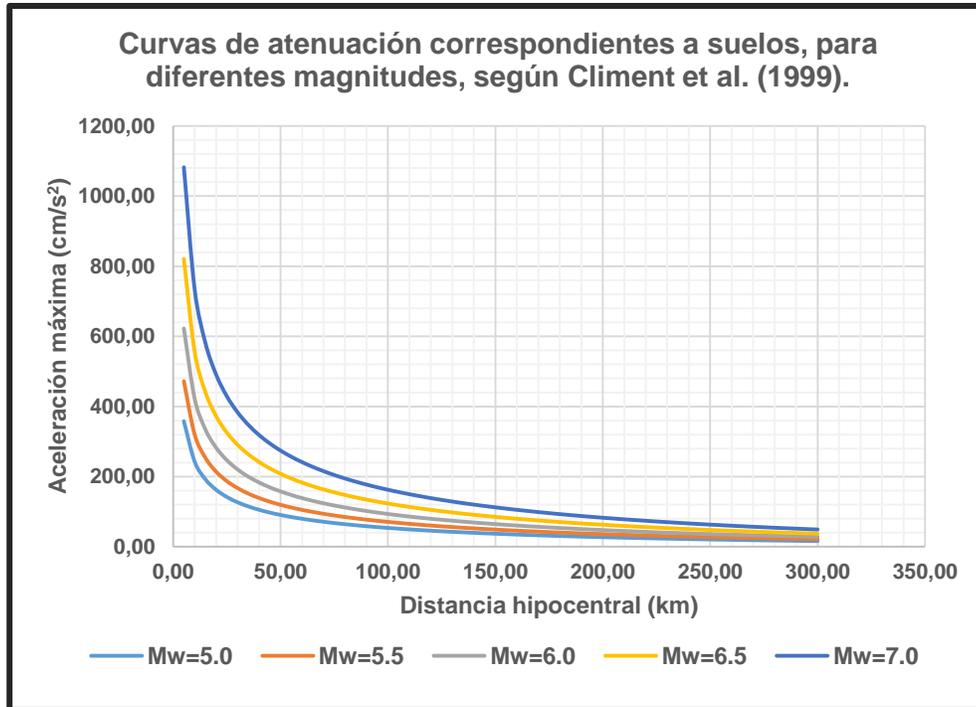


Gráfico 4.0. Relación empírica entre PGA y R para condiciones locales de suelo.
Fuente: Microsoft Office, Excel 2013.

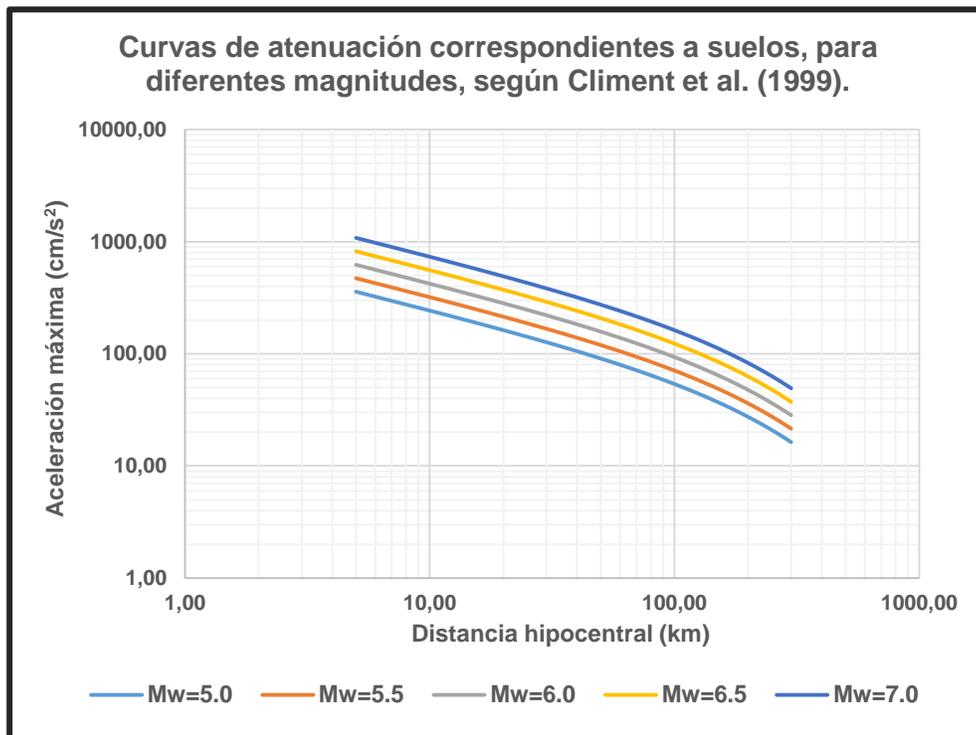


Gráfico 5.0. Relación empírica entre PGA y R para condiciones locales de suelo (escala logarítmica).
Fuente: Microsoft Office, Excel 2013.

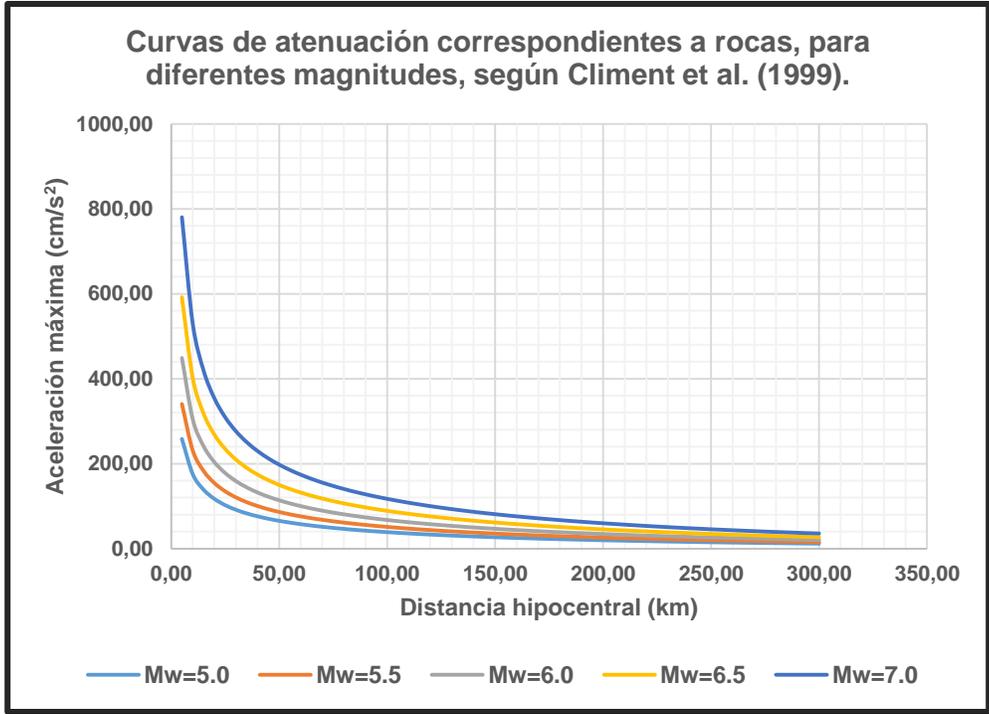


Gráfico 6.0. Relación empírica entre PGA y R para condiciones locales de roca.
Fuente: Microsoft Office, Excel 2013.

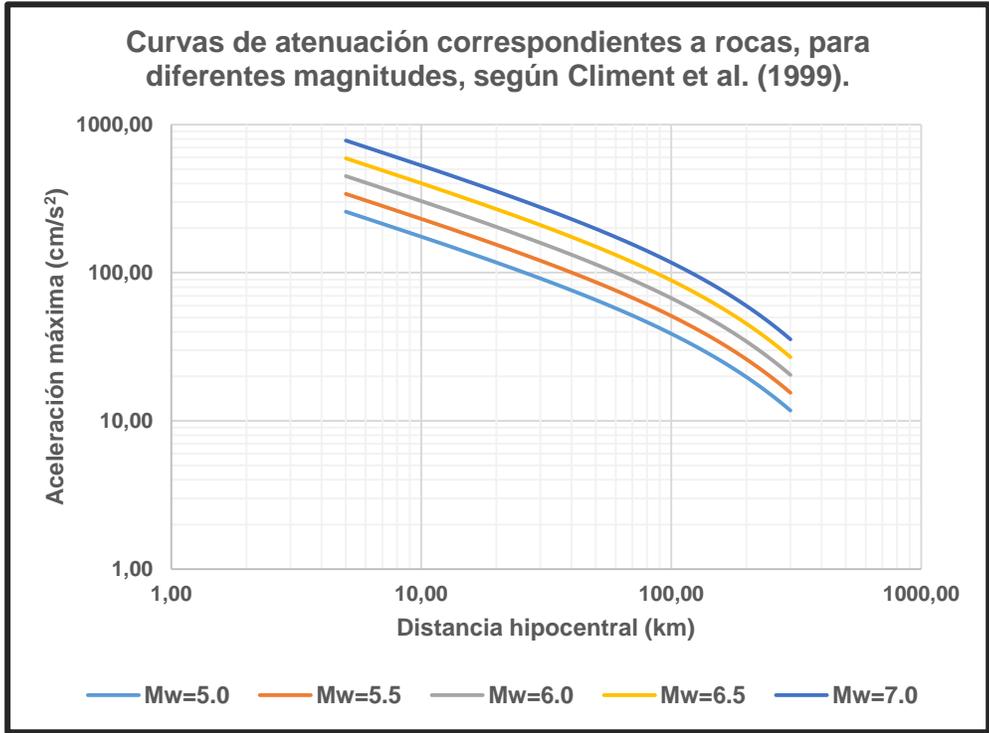


Gráfico 7.0. Relación empírica entre PGA y R para condiciones locales de roca (escala logarítmica).
Fuente: Microsoft Office, Excel 2013.

Mapas de vulnerabilidad sísmica

En este apartado se presentan los resultados del estudio de vulnerabilidad sísmica realizado para el área central del cantón de Pérez Zeledón.

La vulnerabilidad sísmica, se estimó, tal y como se describió en la metodología, partiendo de la contribución de tres atributos críticos y determinantes para la vulnerabilidad física de las edificaciones: el tipo constructivo, la edad y el estado de conservación.

Para cada edificación de la muestra óptima se determinaron los valores de los tres atributos, para posteriormente calcular la media ponderada de cada uno y así asignar a los lotes sus respectivos factores de peso grupales, con lo cual se consideró la contribución de todas las estructuras inspeccionadas a la vulnerabilidad regional.

Los mapas de atributos para cada lote se muestran en esta sección de resultados. Además, se muestran los resultados de las encuestas a través de cuadros resumen, con la intención de mostrar las cantidades y proporciones de cada uno de los atributos considerados como críticos.

El mapa de índices de vulnerabilidad física grupal contiene los valores determinados tras cruzar los mapas de atributos, y funciona como indicador gráfico de la vulnerabilidad sísmica del área de estudio.

Finalmente, se muestra el impacto de los terremotos planteados en el centro urbano del cantón. Se exhibe el daño esperado en el área de estudio en función de cada uno de los escenarios sísmicos modelados.

CUADRO 25.0. VALORES ABSOLUTOS DE TIPO CONSTRUCTIVO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO		
Tipo constructivo (TC)	Cantidad	Porcentaje
Tugurio	2	0,53%
Muros de madera	80	21,33%
Mampostería simple	1	0,27%
Mampostería confinada	12	3,20%
Mampostería reforzada	241	64,27%
Pórticos de concreto	25	6,67%
Prefabricado	14	3,73%
TOTAL	375	100,00%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 26.0. VALORES ABSOLUTOS DE EDAD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO		
Edad (E)	Cantidad	Porcentaje
Previo a 1974	49	13,07%
Entre 1974 y 2001	188	50,13%
Después de 2002	138	36,80%
TOTAL	375	100,00%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 27.0. VALORES ABSOLUTOS DE ESTADO DE CONSERVACIÓN PARA EL ÁREA DE ESTUDIO		
Estado de conservación (EC)	Cantidad	Porcentaje
Excelente	72	19,20%
Bueno	187	49,87%
Regular	79	21,07%
Pobre	37	9,87%
TOTAL	375	100,00%

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 28.0. RESULTADOS DESCRIPTIVOS DE LAS EDIFICACIONES INSPECCIONADAS EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y LA EDAD, EN TÉRMINOS DE CANTIDAD.							
Tipo constructivo	Estado de conservación				Código sísmico vigente		
	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Después DE 2002	Entre 1974 Y 2001	Previo a 1974
R	0	0	0	2	0	0	2
W	5	21	27	27	8	34	38
MS	0	0	1	0	0	1	0
MC	1	8	2	1	4	8	0
MR	61	132	41	7	109	125	7
PCR	2	17	6	0	5	18	2
CP	3	9	2	0	12	2	0
SUBTOTAL	72	187	79	37	138	188	49
TOTAL	375				375		

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

CUADRO 29.0. RESULTADOS DESCRIPTIVOS DE LAS EDIFICACIONES INSPECCIONADAS EN FUNCIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y LA EDAD, EN TÉRMINOS DE PORCENTAJE.							
Tipo constructivo	Estado de conservación				Código sísmico vigente		
	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Después de 2002	Entre 1974 Y 2001	Previo a 1974
R	0,00%	0,00%	0,00%	0,53%	0,00%	0,00%	0,53%
W	1,33%	5,60%	7,20%	7,20%	2,13%	9,07%	10,13%
MS	0,00%	0,00%	0,27%	0,00%	0,00%	0,27%	0,00%
MC	0,27%	2,13%	0,53%	0,27%	1,07%	2,13%	0,00%
MR	16,27%	35,20%	10,93%	1,87%	29,07%	33,33%	1,87%
PCR	0,53%	4,53%	1,60%	0,00%	1,33%	4,80%	0,53%
CP	0,80%	2,40%	0,53%	0,00%	3,20%	0,53%	0,00%
SUBTOTAL	19,20%	49,87%	21,07%	9,87%	36,80%	50,13%	13,07%
TOTAL	100%				100%		

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

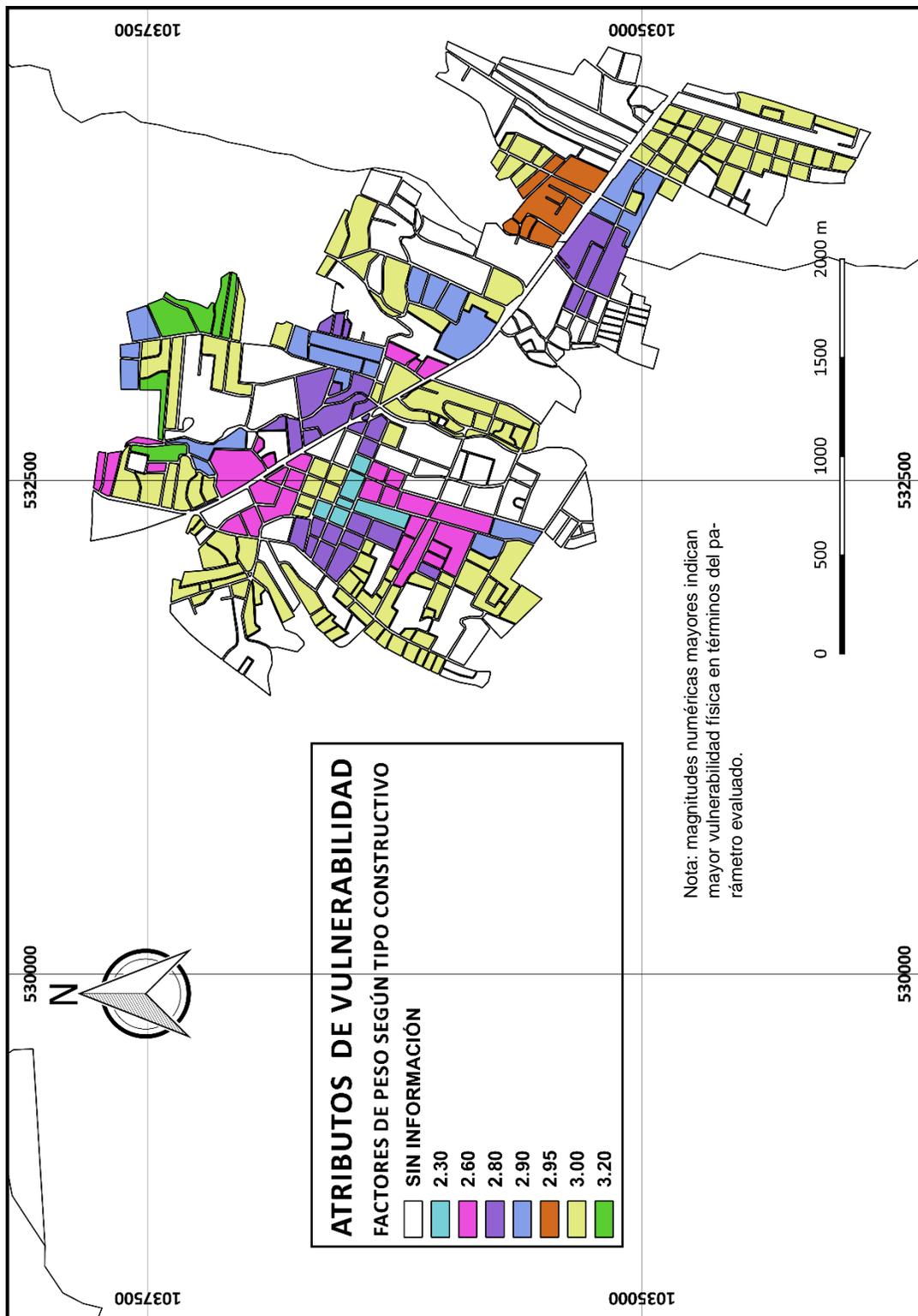


Figura 63.0. Mapa de atributo crítico (TIPO CONSTRUCTIVO) para cuantificar la vulnerabilidad física de las edificaciones.
 Fuente: QGIS 2.14.

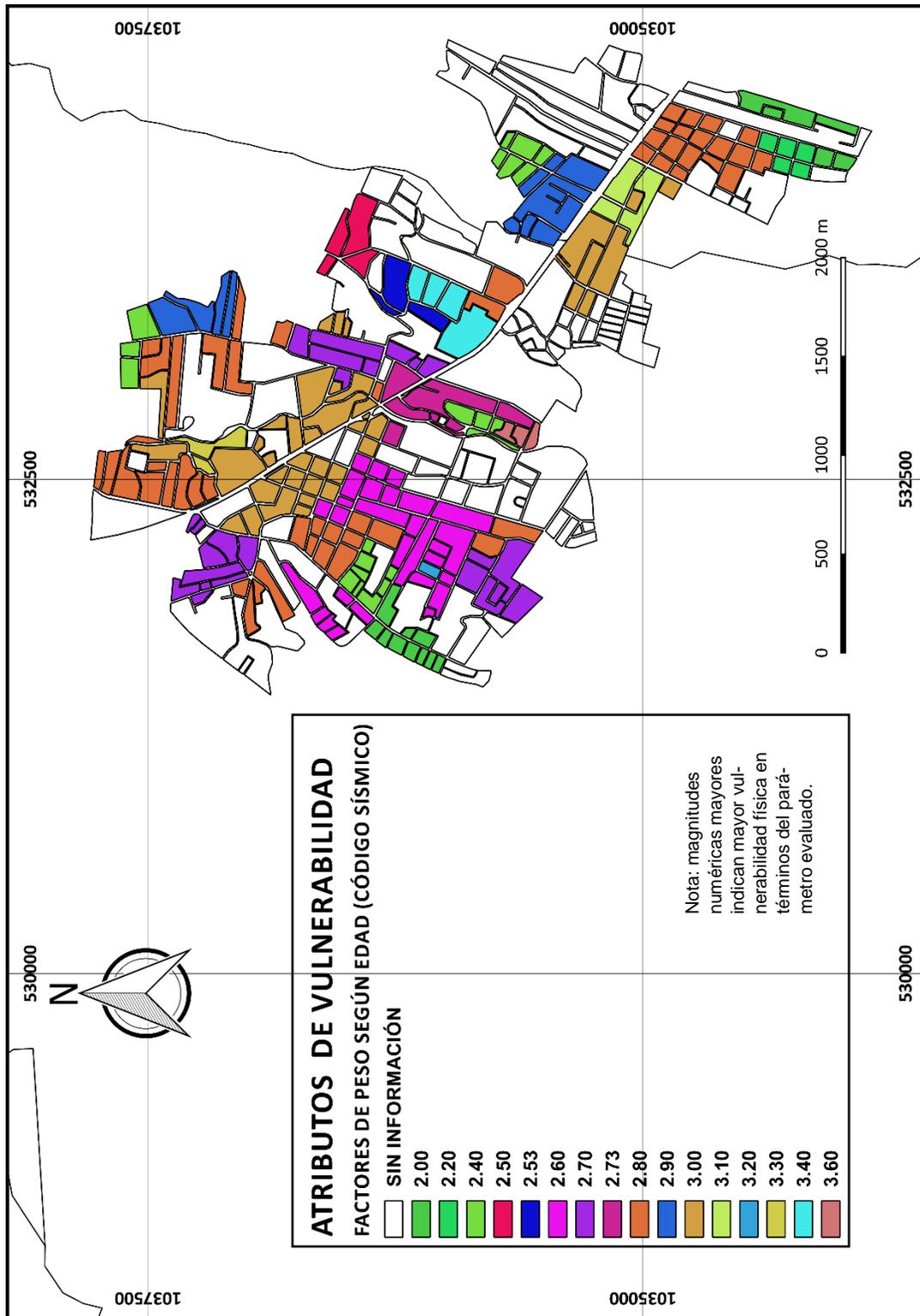


Figura 64.0. Mapa de atributo crítico (EDAD) para cuantificar la vulnerabilidad física de las edificaciones.
Fuente: QGIS 2.14.

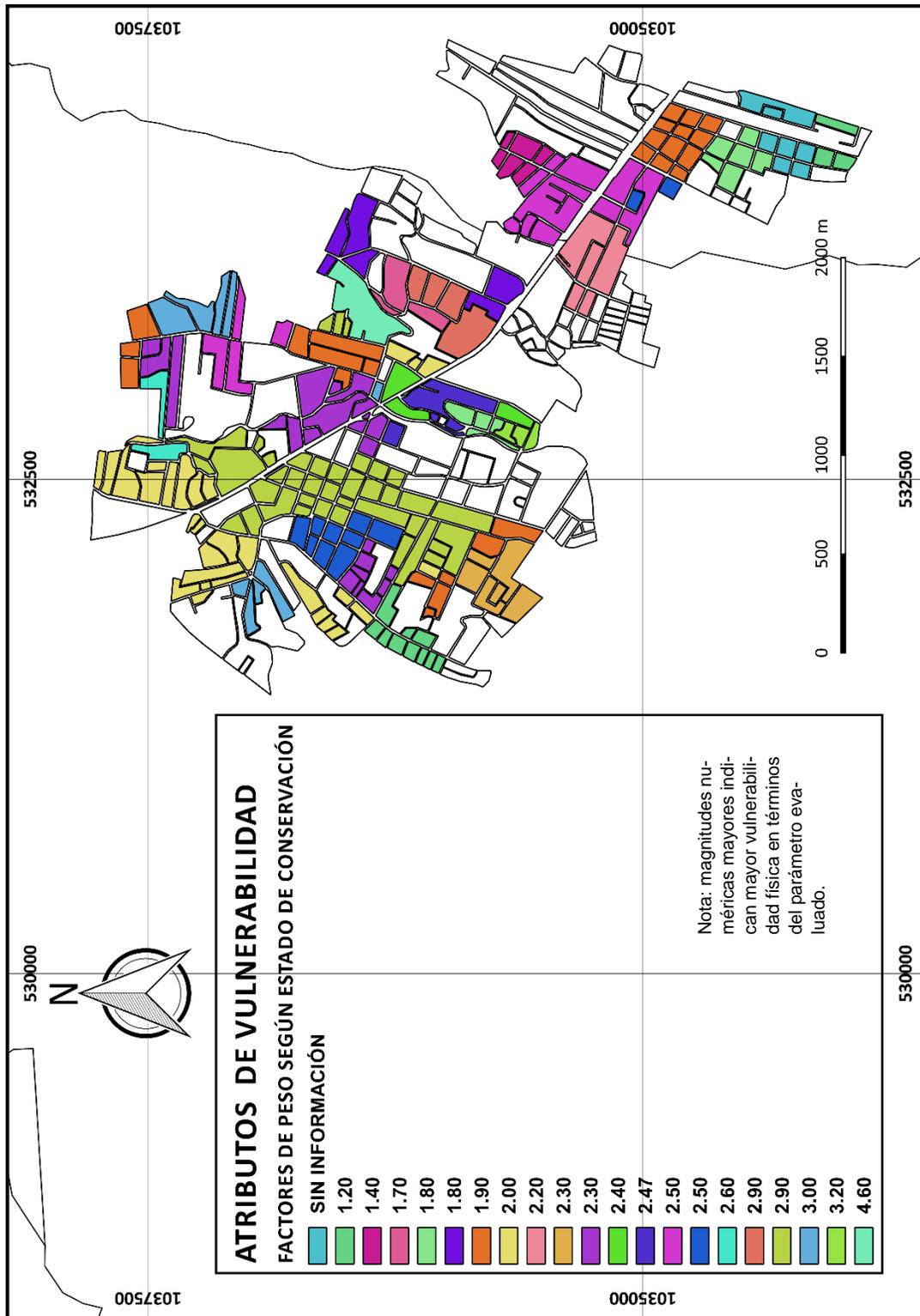


Figura 65.0. Mapa de atributo crítico (ESTADO DE CONSERVACIÓN) para cuantificar la vulnerabilidad física de las edificaciones.
Fuente: QGIS 2.14.

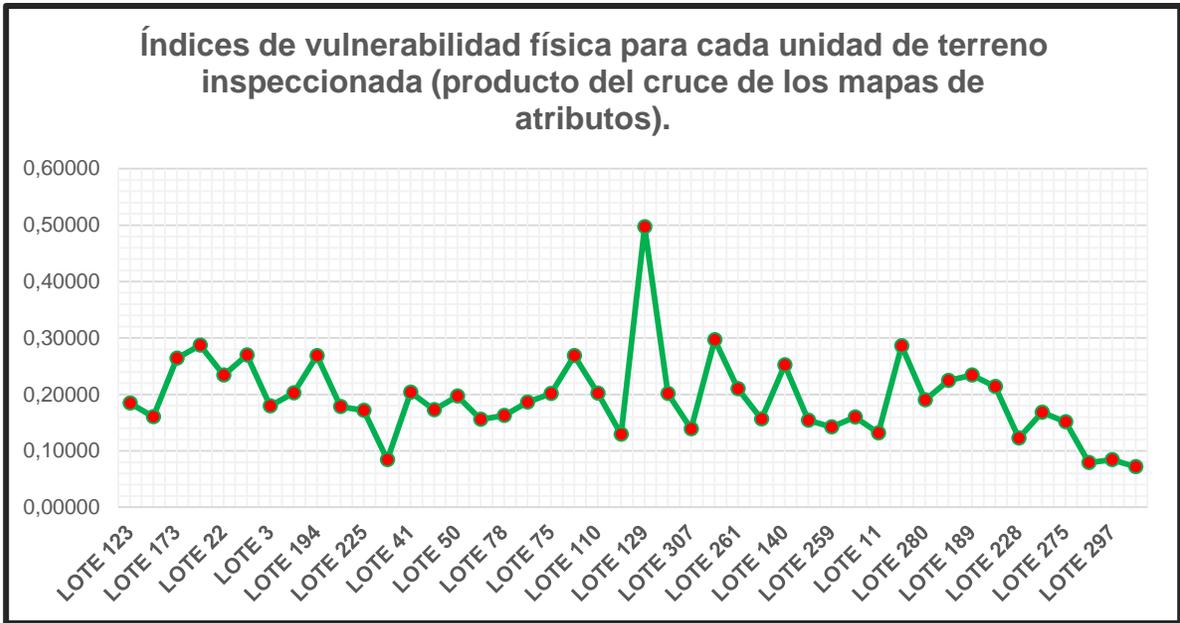


Gráfico 8.0. Índice de vulnerabilidad física calculado para las unidades de terreno inspeccionadas.
Fuente: Microsoft Office, Excel 2013.

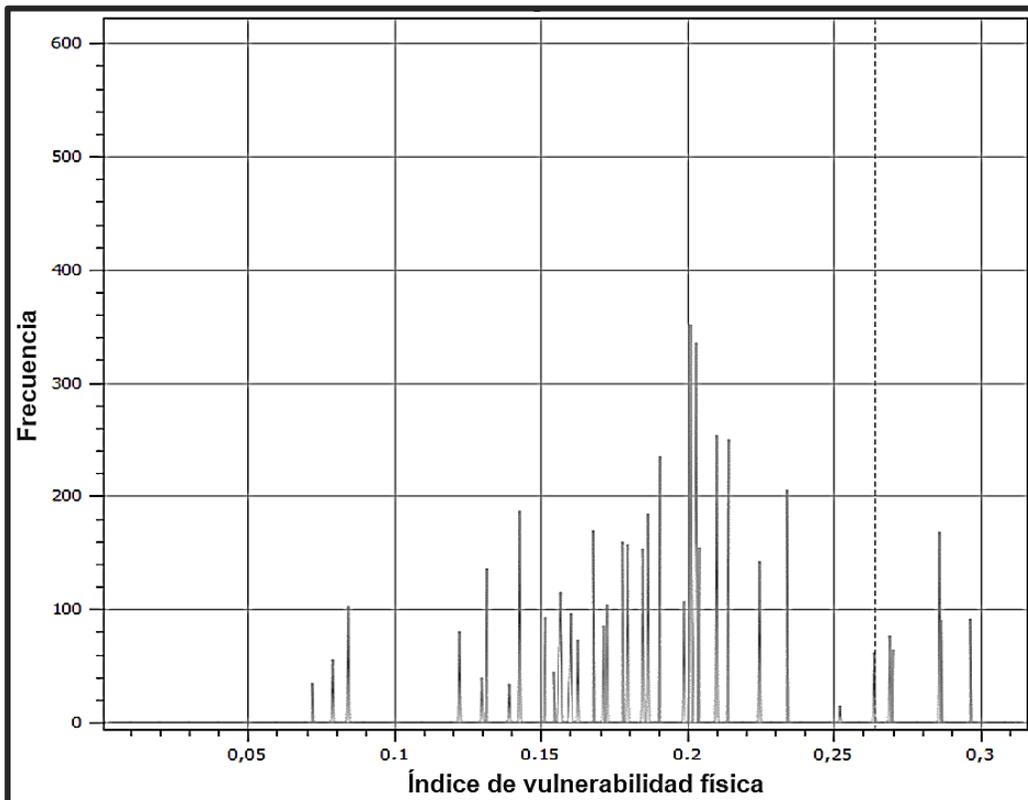


Figura 66.0. Distribución de frecuencias del índice de vulnerabilidad física en unidades de terreno inspeccionadas y heredadas.
Fuente: QGIS 2.14.

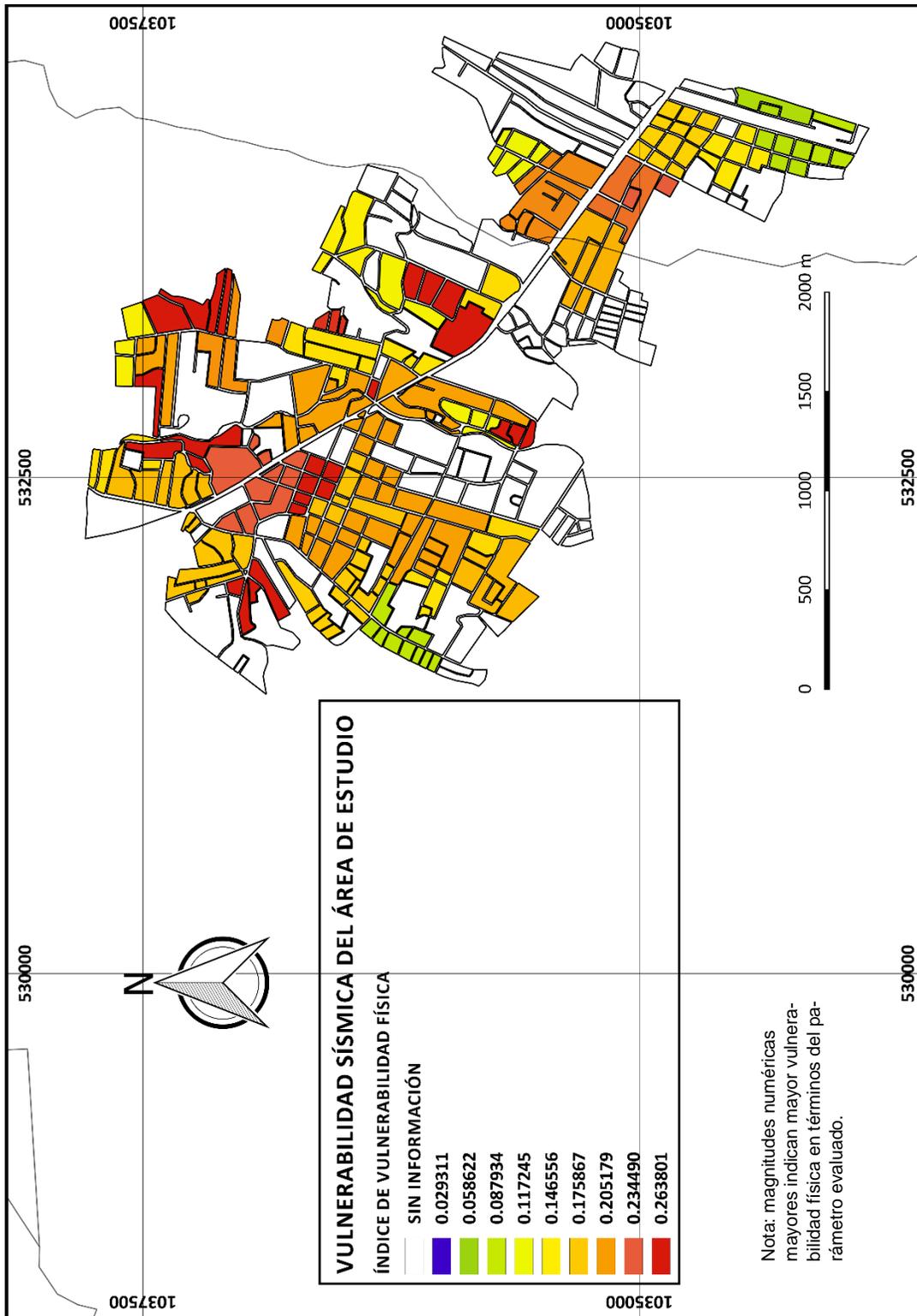


Figura 67.0. Índice de vulnerabilidad física para el área de estudio.
Fuente: QGIS 2.14.

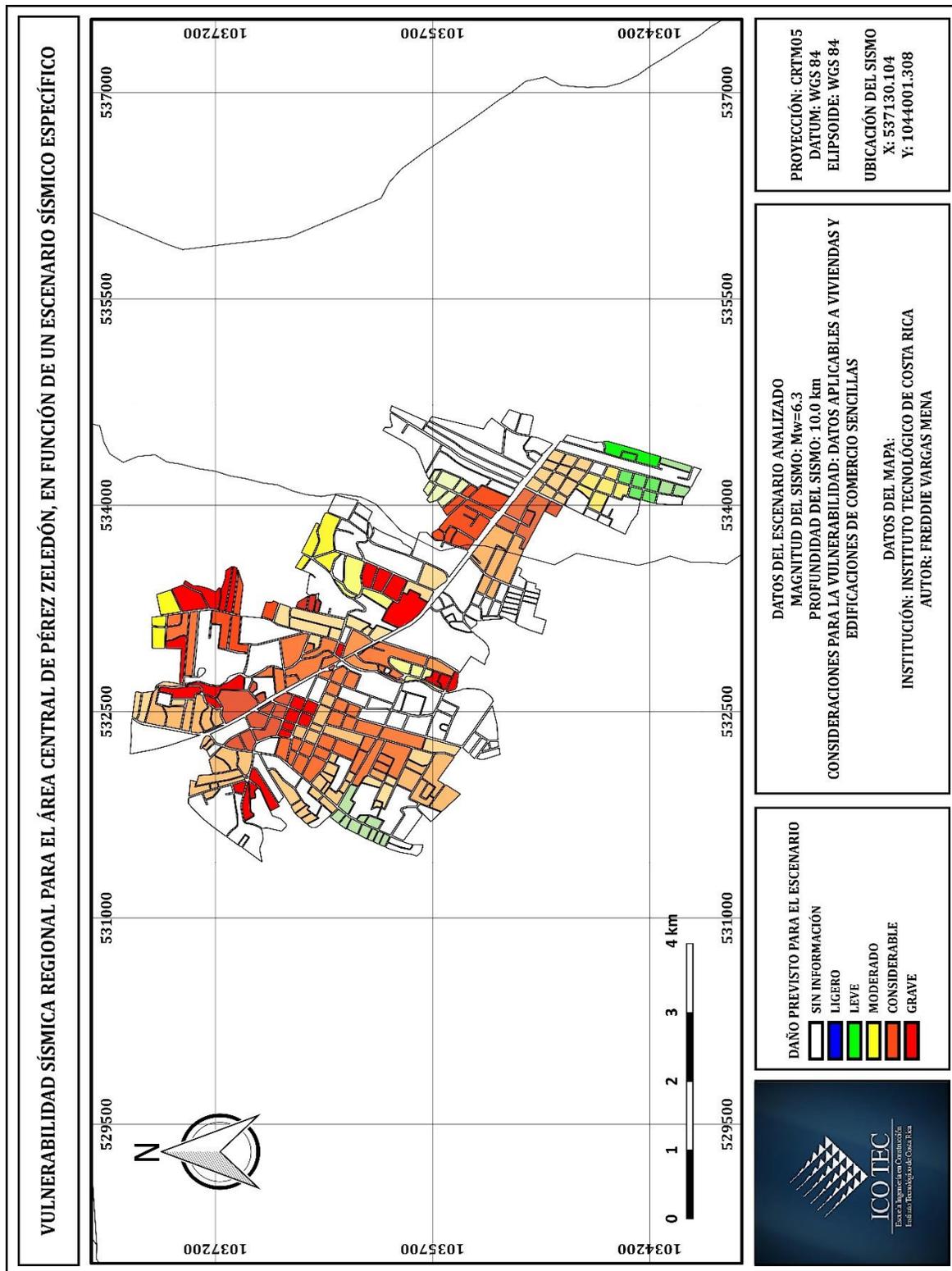


Figura 68.0. Mapa de vulnerabilidad sísmica regional (riesgo sísmico) para el primer escenario sísmico.
 Fuente: QGIS 2.14.

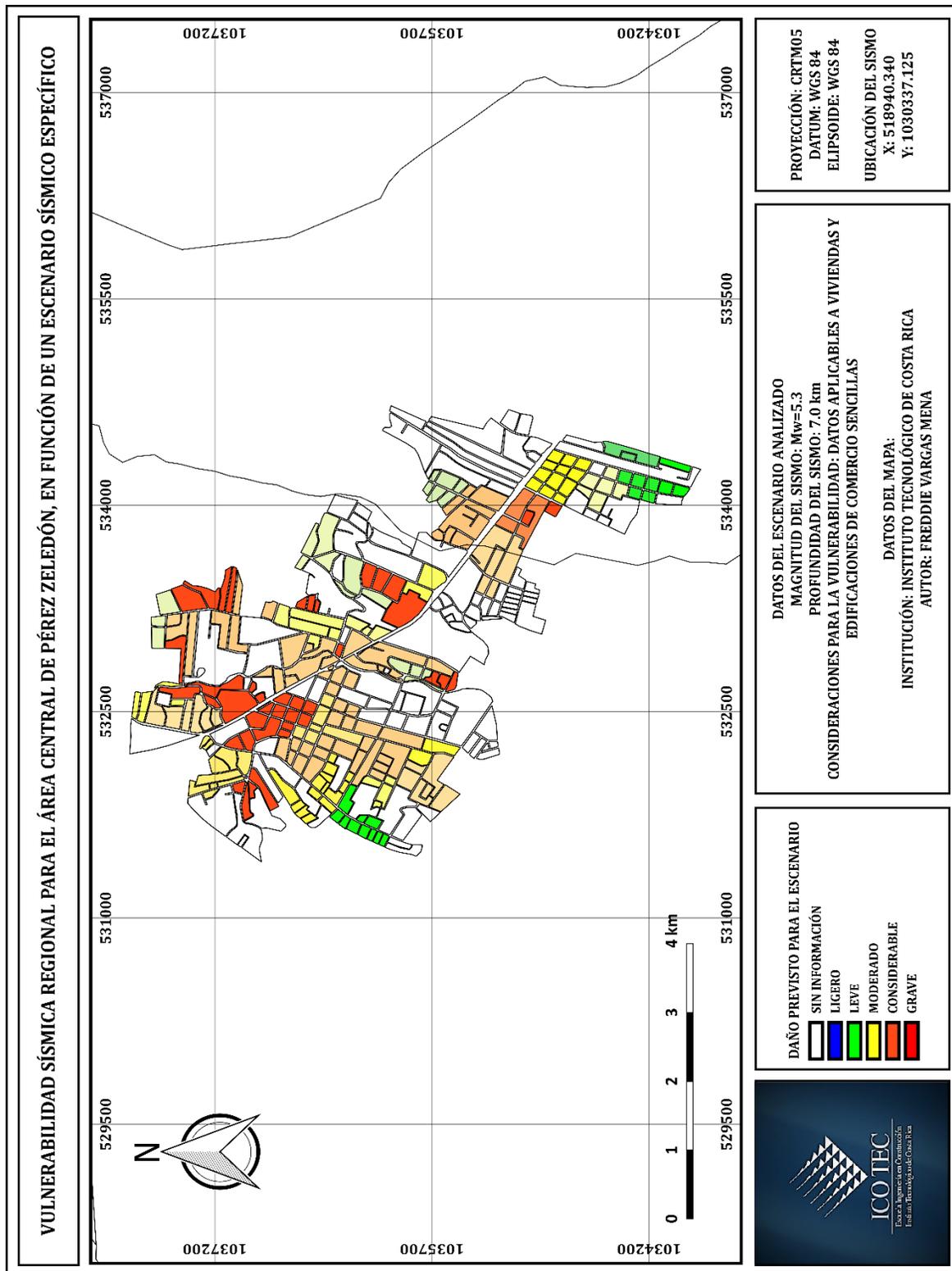


Figura 69.0. Mapa de vulnerabilidad sísmica regional (riesgo sísmico) para el segundo escenario sísmico.
 Fuente: QGIS 2.14.

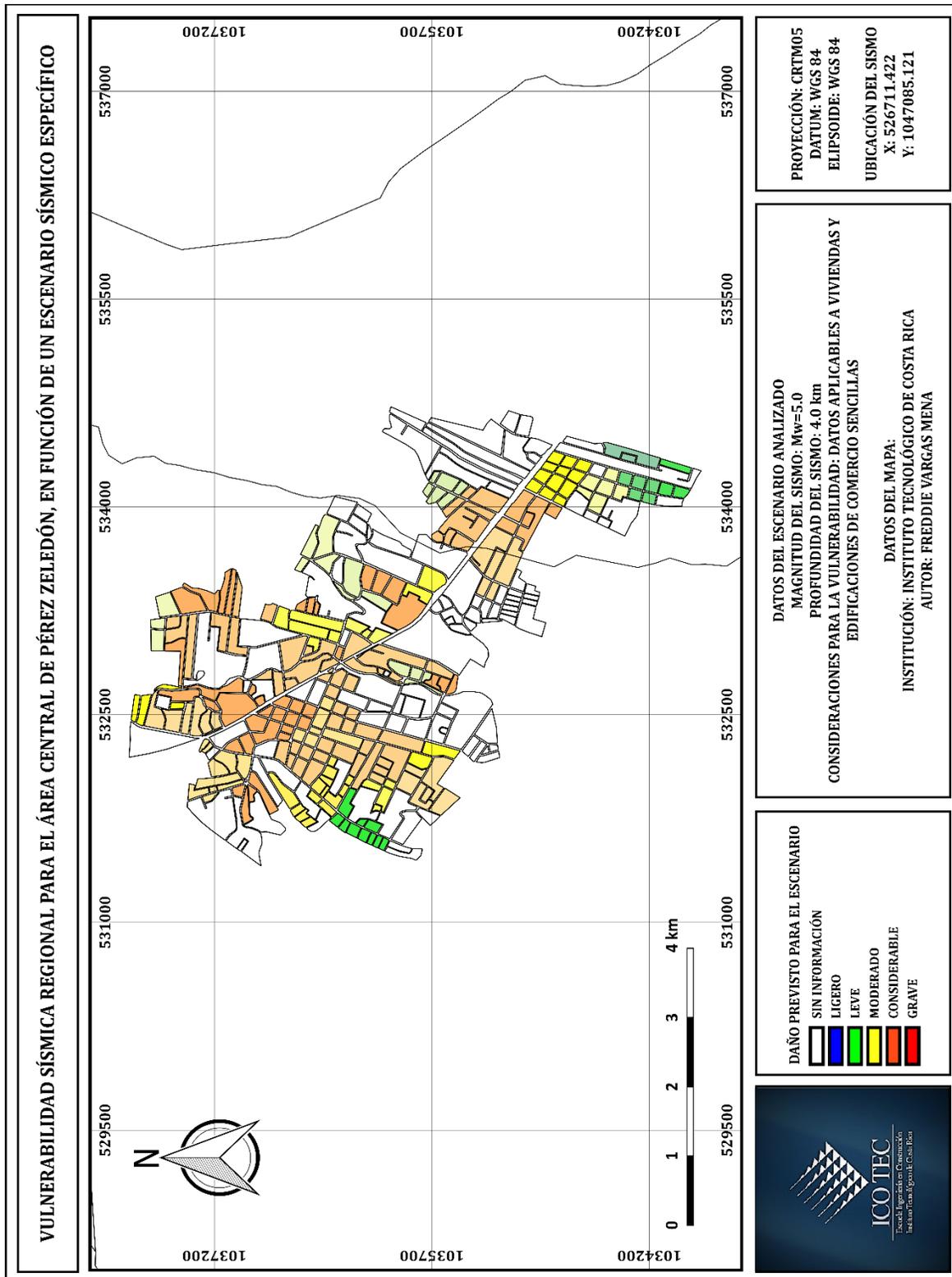


Figura 70.0. Mapa de vulnerabilidad sísmica regional (riesgo sísmico) para el tercer escenario sísmico.
 Fuente: QGIS 2.14.

Análisis de resultados

Mapas de amenaza sísmica

Al comparar los valores de aceleración máxima del terreno resultantes del análisis de los tres escenarios sísmicos planteados, es sencillo apreciar una particularidad esperada desde el momento en que los escenarios sísmicos fueron modelados: el primer escenario es el que posee los mayores valores de aceleración, ubicándose estos en un rango de entre 180 cm/s^2 (Gal) y 352 cm/s^2 .

Estos valores de aceleración están relacionados con intensidades instrumentales de escala sismológica Mercalli Modificada, y corresponden a los niveles de intensidad VII y VIII respectivamente, lo cual indica que en caso de que un terremoto con las características del escenario planteado llegase a ocurrir dentro del territorio abarcado por la zona de estudio, el fenómeno sería fuertemente percibido por toda la población del lugar, provocando repercusiones serias en el sitio, entre las cuales se pueden destacar las siguientes: pérdida de balance en las personas; dificultad para levantarse en el caso de personas que no se encuentren de pie al momento del evento o aquellas que debido a la sacudida pierdan el equilibrio y caigan al suelo; daños severos en estructuras pobremente construidas; daños considerables —aunque sin riesgo de colapso— en las estructuras ordinarias de usos variados que cuenten con un diseño sismo-resistente realizado acertadamente, siguiendo las reglamentaciones y pautas especificadas en la versión vigente del código sísmico de Costa Rica.

Las estructuras especializadas, como hospitales, estadios, fábricas y demás también se verían afectadas en cierta extensión, tanto en sus elementos estructurales (nivel de daño: leve) como en sus elementos no estructurales o no diseñados para no contribuir activamente al sistema sismo-resistente de la edificación, lo cual, en este tipo de

edificaciones puede representar pérdidas económicas importantes, que finalmente pueden resultar siendo incluso mayores que aquellas asociadas a los daños estructurales, debido al alto costo de los equipos utilizados en este tipo de edificaciones.

Estos daños son estimados con respecto a la literatura, es decir, utilizando como base para el criterio de estimación los registros históricos de daños causados por sismos con magnitudes iguales o aproximadas a la definida para la primera simulación; misma que en función de la distancia se puede ajustar a los niveles de daño para las intensidades VII y VIII, tomando los valores de aceleración pico y relacionándolos a través de regresiones empíricas con la escala sismológica Mercalli Modificada.

En términos del porcentaje de la aceleración de la gravedad, los valores de aceleración mínimo y máxima para este escenario corresponden a un 18.34% y un 35.87%, lo cual indica que el terreno estaría vibrando, en la zona de estudio y para la aceleración pico horizontal, a alrededor de una tercera parte de la aceleración provocada por la gravedad terrestre.

Debido a la ubicación del epicentro, se reconoce que el barrio San Andrés sería el sitio que experimentaría las mayores aceleraciones del terreno debido a la dirección de incidencia de las ondas sísmicas causadas por este primer sismo hipotético.

Las áreas circundantes y hacia el noreste del Liceo Unesco de Pérez Zeledón y el barrio Sinaí también estarían sufriendo de intensidades altas, dentro del rango correspondiente a una intensidad de VII pero cercanas a VIII.

En relación con los escenarios sísmicos dos y tres, estos no representan un nivel de peligro tal alto como el manifestado por el escenario uno, de he-

cho, ambos escenarios poseen ciertas características similares, en términos de sus aceleraciones e intensidades máximas, siendo la mayor diferencia entre estos, a nivel de percepción esperada, la fuente de origen de la sacudida y la posición de esta.

El segundo escenario registra una aceleración mínima de 95.46 cm/s^2 , lo cual corresponde a un 9.73% de la gravedad terrestre, número que puede asociarse con una intensidad instrumental en el rango de V y VI, y para la cual se considera, desde una perspectiva estructural, que los daños ocasionados a nivel regional serían leves. No obstante, este terremoto, incluso tomando como punto de análisis su menor aceleración, sería experimentado en toda la zona de estudio, causaría una serie de daños en materiales de construcción, así como el desplazamiento de muebles, la caída de objetos y la sensación de temor en la población en general, misma que podría convertirse en sentimientos de ansiedad y pánico en el caso de las personas más sensibles.

Las aceleraciones de menor magnitud se presentarían en la región noreste del área de estudio, cerca de las localidades de Canaán, Herradura y San Gerardo; poblados ubicados a unos 12 km del área de estudio.

Por otra parte, la máxima aceleración asociada a este escenario sísmico sería de 242 cm/s^2 , lo cual significa que la intensidad instrumental más crítica para este escenario sería de VII. Estas aceleraciones no se presentarían en el área central del cantón, sino en las regiones de Pacuar y Tinamaste, regiones que forman parte de Pérez Zeledón pero que cuentan con un desarrollo urbano mucho menor a aquel encontrado en los puntos correspondientes a los distritos de Daniel Flores y San Isidro de El General.

Con respecto al tercer escenario sísmico simulado, este presentaría aceleraciones que variarían entre los 89 cm/s^2 y 260 cm/s^2 , presentando así aceleraciones mínimas menores a las del segundo escenario, pero superando a este en el extremo más crítico de los valores de aceleración e intensidad sísmica.

Para el tercer escenario, las aceleraciones más altas dentro del área de estudio, se sentirían nuevamente en el barrio San Andrés y principalmente en los terrenos aledaños al Liceo Unesco. No obstante, es importante prestar atención al hecho de que este escenario incide al área de estudio en sentido sureste por lo que “ingresaría” al centro urbano del cantón siguiendo, por decirlo de

alguna manera, la ruta definida por la autopista interamericana sur, por lo que las vibraciones del terreno estarían afectando a esta obra de infraestructura directamente, no solamente causando daños como agrietamientos y desprendimiento de la carpeta asfáltica, sino provocando la ocurrencia de deslizamientos y derrumbes de material que podrían inhabilitar la ruta de acceso a San Isidro de El General, con lo cual se garantizaría la existencia de un grave efecto colateral del sismo: el impacto socioeconómico asociado a los trabajos de rehabilitación, limpieza y reparación de la vía.

Para el tercer escenario los porcentajes de aceleración en términos de la gravedad terrestre serían de 9.11% y 26.61% para los extremos superior e inferior del rango de aceleraciones.

La intensidad instrumental máxima sería ligeramente mayor a VII desde una perspectiva numérica, pero en general podría considerarse como un sismo con intensidades de entre V y VII, similar al sismo planteado para el segundo escenario.

Las relaciones de regresión usadas para calcular la intensidad instrumental fueron las propuestas en Wald et al. (1999), específicamente la relación propuesta para el rango $V \leq I_{mm} \leq VIII$, ya que si bien las relaciones expuestas en Linkimer (2008) fueron desarrolladas con datos regionales y específicamente para el territorio costarricense, estas no contaban con datos referentes a sismos de intensidades mayores a VII, por lo que no se podían asumir como confiables para intensidades superiores a este nivel.

Los resultados de este estudio están por debajo de valores de aceleración pico encontrados en Climent et al. (2008), en donde se utilizó un método probabilístico y se concluyó que en el área a la cual pertenece Pérez Zeledón se podrían experimentar aceleraciones de hasta 500 cm/s^2 para un período de retorno de quinientos años.

Esta diferencia, aunque no representa una contradicción, si incentiva a plantearse cuáles son las limitaciones de este estudio en cuanto a evaluación de la amenaza sísmica se refiere.

Tal y como se mencionó brevemente en el capítulo de metodología, para este estudio, siendo que no se considera la duración del sismo, se desconoce el tiempo durante el cual el terreno estaría vibrando y, por ende, los daños asociados a los períodos cíclicos probables de la intensidad. Además, siendo que se desconoce la frecuencia de la actividad sísmica en la región, no se pueden establecer o proponer de un modo apropiado y

confiable, períodos de retorno para eventos sísmicos con características equivalentes a las de aquellos modelados en esta evaluación de peligro sísmico.

Además, con respecto a los fenómenos de amplificación de la velocidad y aceleración pico del terreno, ninguno de los aspectos, criterios y parámetros expuestos como influyentes en el comportamiento de las ondas sísmicas es tratado o evaluado de manera prioritaria y pertinente en el método de cálculo propuesto en Climent et al. (1994).

La ecuación de atenuación utilizada para calcular la aceleración pico del terreno no considera las condiciones topográficas del sitio. Utiliza la distancia hipocentral como indicador de la relación distancia-profundidad entre la zona de estudio y la fuente sismogénica, sin embargo, tal relación no considera los accidentes topográficos de la región circundante al área de estudio, o del área de estudio en sí misma. Esto es un aspecto de importante consideración debido a que, como se explica en Sauter (1989) las condiciones topográficas de un sitio influyen en gran medida en el modo de propagación de las ondas sísmicas descriptivas de un evento ocurrido o con efectos directos sobre dicho sitio. Sumado a esto, en este informe, específicamente en la sección referente a la formación, topografía y marco tectónico de la región en estudio, se menciona de manera explícita el hecho de que Pérez Zeledón es una zona llena de tropiezos y cambios abruptos de pendiente entre distancias relativamente cortas. Según Sauter (1989) esto tendría afectaciones importantes en el modo en que un sismo sería percibido, y en los daños que este podría causar. En las regiones altas se experimentaría un efecto amplificador de las ondas sísmicas, dependiendo claro, del sentido y el ángulo de incidencia de las ondas vibratorias; y la frecuencia oscilatoria del movimiento sísmico. Por otra parte, en los llanos se podría presentar un efecto atenuador.

Considerando que el centro urbano de Pérez Zeledón se encuentra en el valle de El General, pero rodeado por formaciones montañosas altas y de configuración irregular y asimétrica, sería muy interesante el poder cuantificar el comportamiento de este terreno al incluir este parámetro de forma activa en el análisis y determinación de las aceleraciones pico para los escenarios sísmicos planteados.

Considerar una metodología que permita cuantificar la influencia de la topografía de la zona dentro del marco de estudio sería un modo de mejorar los resultados obtenidos en este proyecto.

Otro parámetro que tiene influencia sobre la intensidad de las sacudidas sísmicas es el subsuelo. Este aspecto, puede argumentarse, se encuentra incluido en la ecuación de atenuación de Climent et al. (1994), ya que el factor descriptivo de la geología de la zona cumple con la función de asignarle un peso al sitio en función de la litología del mismo. En el caso de la región en estudio, se determinó a través de la información incluida en el ATLAS DE COSTA RICA, que la zona correspondiente al centro de Pérez Zeledón está compuesta por material rocoso principalmente, en términos de estratigrafía.

Rocas intrusivas, rocas sedimentarias volcánicas, rocas sedimentarias de aguas profundas y rocas de origen volcánico son, a nivel global, los materiales que componen la región. Esto, como podría preverse según los fundamentos teórico-prácticos de este estudio, causó un efecto atenuador en las aceleraciones del terreno, ya que en suelos de alta rigidez (rocosos) la velocidad de las ondas sísmicas disminuye y, por lo tanto, también lo hace la tasa de aumento por unidad de tiempo.

Los escenarios sísmicos propuestos tampoco consideran una causa específica para los terremotos planteados, sino que únicamente se toman en consideración las características físicas de las fuentes sismogénicas, lo cual quiere decir que no se cuenta con un mecanismo de falla que describa el origen de los sismos. Datos precisos relacionados a la causalidad de los sismos podrían indicar la direccionalidad de las ondas sísmicas en el terreno, volviendo más exactas las predicciones de aceleración e intensidad instrumental.

En general, considerar los fenómenos de amplificación, y con base en ello proponer y ejecutar una metodología que permita determinar la influencia de estos en los escenarios modelados y simulados para evaluar la amenaza sísmica, sería una forma ideal de mejorar los productos obtenidos en este estudio.

Otra forma de optimización para estudios cuyo objetivo sea la evaluación del peligro sísmico de una zona determinada, es la aplicación de metodologías probabilísticas, que aunque demandan el uso de más recursos y la ejecución de procedimientos de cálculo más complejos y detallados, no poseen las limitaciones antes mencionadas.

No obstante, el hecho de que existan limitaciones en los resultados y que estos puedan ser optimizados hasta cierto grado no significa que estos carezcan de un alto nivel de validez y representati-

dad. Los productos obtenidos en este estudio poseen una exactitud adecuada y suficiente para funcionar como guías precisas en la toma de decisiones relacionadas con la prevención y el diseño de planes estratégicos para mitigación de los efectos de sismos como los planteados.

Una forma de verificar la exactitud de los escenarios simulados es mediante la comparación de los resultados obtenidos con datos conocidos, es decir, con información referente a eventos sísmológicos de propiedades similares. En este caso, la mejor forma de llevar a cabo una comprobación así es tomar los datos resultantes de la evaluación basada en el primer sismo hipotético y los datos del terremoto de Buenavista ocurrido en 1983, y revisar punto por punto la equivalencia o diferencia entre estos.

El terremoto de Buenavista fue una de las principales referencias empleadas para definir las características del primer escenario sísmico. Este terremoto tuvo una magnitud de ondas superficiales de $M_s = 6.1$ e intensidades máximas oscilantes entre VIII y IX en la región epicentral.

En la ciudad de San Isidro de El General las intensidades variaron entre V y VII.

Según la relación empírica propuesta por Peraldo y Montero (como se citaron en Mora y Peraldo, 2011), la magnitud macrosísmica del terremoto fue de $M_s = 6.3$. Este resultado se aproxima a la magnitud instrumental medida para el sismo al momento de su ocurrencia, sin embargo es ligeramente mayor.

Teniendo en cuenta esta diferencia es posible estimar diferencias entre las intensidades reportadas por el estudio macrosísmico de Mora y Peraldo (2011) y la intensidad verídica del evento en cuestión. No obstante, en todo caso, los resultados del estudio de 2011 son congruentes con lo ocurrido y registrado en 1983.

Ahora, las intensidades máximas reportadas para el escenario hipotético fueron de VII y VIII en el área epicentral. Estas intensidades muestran la

equivalencia directa que existe entre los registros de un evento real y el modelado por la ecuación de atenuación de Climent et al. (1994), siendo que, la magnitud de $M_s = 6.1$ corresponde a una magnitud de momento de $M_w = 6.4$, según las relaciones de regresión ortogonales estándar encontradas en Das et al. (2011).

Estos datos muestran que en términos numéricos la diferencia entre las intensidades del terremoto simulado y el ocurrido en Buenavista tres décadas atrás está justificada.

La interrogante que surge es en relación con lo reportado por la Red Sísmológica Nacional, institución que indica que la falla de Buenavista posee un potencial sísmico máximo de $M_w = 6.3$ (valor utilizado para modelar el primer sismo hipotético), sin embargo, los datos referentes al terremoto de Buenavista indican una magnitud de $M_s = 6.1$ (medición instrumental equivalente a $M_w = 6.4$) y $M_s = 6.3$ (medición indirecta resultante de una correlación propuesta por Peraldo y Montero, equivalente a $M_w = 6.5$ según las OSR encontradas en Das (2011) y mostradas en el Anexo 2).

Una explicación viable para la discrepancia de los valores máximos es que el dato provisto por la Red Sísmológica Nacional es una subestimación del potencial real de la falla Buenavista, ya que el potencial de $M_w = 6.3$ supone una longitud de falla de 11 km, valor indeterminado en términos exactos, siendo que la falla Buenavista es inferida según las condiciones del terreno y no observada; lo cual indica que su longitud exacta se desconoce. Incluso, se han asociado a esta falla longitudes de 7 km, 15 km y 30 km, además de los 11 km supuestos para el cálculo de su potencial máximo.

A pesar de esto, el punto más importante a resaltar es la correspondencia que muestran las predicciones de la función de atenuación utilizada para evaluar la amenaza sísmica de la región y los registros históricos de eventos ocurridos en dicha zona geográfica.

Mapas de vulnerabilidad sísmica

Los productos de mayor relevancia en este estudio son los mapas de vulnerabilidad física de las edificaciones desarrollados para cada uno de los escenarios sísmicos propuestos; estos mapas representan el cumplimiento del objetivo principal del proyecto: la generación de una herramienta —o herramientas— que facilite el diseño de medidas de mitigación de riesgo sísmico estructural para reducir el daño probable en las estructuras del sitio analizado.

Estos mapas denotan un rango esperado de daño estructural en función de la relación desarrollada entre un parámetro denominado índice de vulnerabilidad física grupal y el valor de las aceleraciones pico del terreno.

Con respecto a los resultados asociados a las aceleraciones máximas del terreno, su descripción, significado e importancia dentro del marco de análisis de este proyecto han sido examinados y explicados en la sección anterior sobre los mapas de amenaza sísmica.

En el caso del índice de vulnerabilidad física grupal, este parámetro se calculó mediante el cruce de características críticas de las diferentes unidades de terreno inscritas en el área de estudio.

Así, se partió de la definición de una población global de edificaciones y una población de asistencia que correspondió al total de lotes de entre los cuales se seccionó el área a ser inspeccionada.

La población de edificaciones, en teoría, debía abarcar el número total de estructuras cuyo propósito fuese uno de los siguientes: 1 - vivienda, tanto de uso individual como colectivo; 2 - comercio. Sin embargo, la información requerida para definir tal población no existe dentro de las bases de datos del INEC o las de la Municipalidad de Pérez Zeledón u alguna otra fuente nacional. Debido a esto, fue necesario utilizar los valores provistos por el INEC correspondientes a los resultados del censo 2011 y referentes al número total de viviendas ubicadas en el cantón de Pérez Zeledón; este valor no incluye las edificaciones dedicadas al comercio, sin embargo, incluye la totalidad de viviendas del cantón, y siendo que el área de estudio corresponde al centro urbano y no a la extensión territorial completa de este, no es del todo erróneo

asociar estos datos con la población de edificaciones requerida (aunque no fue posible aproximar la incertidumbre correspondiente a esta suposición debido a la ausencia de información).

El hecho de que los resultados obtenidos del sitio web del INEC se refieran a información del 2011 representaba otra fuente de error. Pero en este caso fue posible actualizar la información con ayuda de la municipalidad del cantón.

A partir de la población de edificaciones se calculó una muestra óptima representativa de la información total del área de estudio. A esta muestra le corresponde un 95% de confiabilidad y un error admisible equivalente a 5%.

En conjunto con la muestra óptima, se tuvo que determinar una muestra de asistencia, diseñada para establecer el número y la distribución de lotes a inspeccionar cualitativamente.

Los lotes o unidades de terreno a inspeccionar fueron asociados a cantidades prefijadas de inspecciones individuales en función de su superficie (área).

En total 375 edificaciones fueron encuestadas en la región, distribuidas proporcionalmente entre 44 unidades de terreno. Estas unidades de terreno representan, en términos numéricos, un 14.29% del total de lotes habilitados para ser parte de la muestra de asistencia.

Este procedimiento resume los pasos seguidos para la determinación de la vulnerabilidad física de las edificaciones, esto desde una perspectiva unitaria, es decir, de cada edificación en solitario. Hacer una breve mención a este proceso es importante ya que del procedimiento utilizado para diagnosticar la vulnerabilidad sísmica de una región depende la confianza que es razonable proporcionar a los resultados de dicho diagnóstico.

Seguido al proceso de levantamiento de datos en campo vino el procesamiento de los mismos. Tras haber inspeccionado la totalidad de edificaciones que formaban parte de la muestra óptima se procedió a determinar la tipología constructiva más representativa de cada uno de los lotes encuestados. Para esto se tomaron en consideración el número de encuestas realizadas por lote, tomando las características físicas de las edificaciones encuestadas y, en los casos en los cuales el número de encuestas indicaba la presencia

de tipologías diferentes en proporciones similares para un mismo lote, el criterio propio del investigador, asignando el tipo constructivo dominante en función de lo presenciado en el área de estudio al momento de realizar las inspecciones.

Además, con la información recolectada en campo se realizó una base de datos de edificaciones, en la cual se identificaron los puntos más relevantes e influyentes en la vulnerabilidad de las estructuras, y se almacenaron estos para su posterior uso en la determinación de las características dominantes en los lotes de análisis.

El inventario, basado en las encuestas de campo, permitió obtener valores representativos relacionados con las tipologías constructivas de mayor presencia a lo largo del área de estudio.

Siete tipos constructivos distintivos fueron identificados al organizar y revisar los datos del inventario de edificaciones, siendo estos categorizados según los datos provistos en el informe técnico ERN-CAPRA T2-5:

- Tugurio (R)
- Muros de madera (W)
- Mampostería simple (MS)
- Mampostería confinada (MC)
- Mampostería reforzada (MR)
- Pórticos de concreto (PCR)
- Prefabricado (CP)

Las proporciones en las cuales estos tipos constructivos se presentan en el centro de desarrollo urbano de Pérez Zeledón fue inferida tomando la muestra óptima y cuantificando los resultados de las encuestas. En general, se tiene que la mampostería reforzada es el tipo constructivo más utilizado en la región, tanto para viviendas como para edificaciones relativamente pequeñas dedicadas al comercio (con áreas entre 75 m² a 150 m² aproximadamente). En los sitios de mayor densidad comercial se tiene la presencia clara del sistema de pórticos o marcos de concreto, utilizado en estructuras de dos o más niveles y para usos variados, entre los que se pueden mencionar oficinas, hoteles, tiendas departamentales, etc.

La madera es el otro sistema de presencia recurrente a lo largo del cantón, y en general es posible ubicar construcciones con muros de madera en todos los sectores del área de estudio, salvo por el centro de la ciudad, donde el desarrollo comercial a través de los años ha desplazado a este sistema constructivo para reemplazarlo con los previamente mencionados.

La madera, sin embargo, aunque se puede encontrar en toda la región, no es dominante como tipología constructiva. Una observación importante que se relaciona con este hecho es que la mayoría de viviendas construidas en madera datan de años previos al siglo XXI e incluso previos al año 1974, lo cual indica que la tendencia a construir con madera ha disminuido progresivamente con el transcurrir del tiempo.

En general, del 100% de edificaciones inspeccionadas, un 64.27% corresponde a edificaciones de mampostería reforzada, un 21.33% a muros de madera y un 6.67% a pórticos de concreto, con lo cual se determina que estos tres son los tipos de mayor presencia en el centro de Pérez Zeledón.

Por otra parte, la mampostería simple constituye un solamente un 0.27% del total de edificaciones; la mampostería confinada un 3.20%; el prefabricado un 3.73% y; los tugurios un 0.53%.

Se puede apreciar que cerca de un 70% de las edificaciones del área de estudio tienen una tipología relacionada con el uso de bloques de concreto modulares. Esto es indicador de la tendencia de construcción que existe en la región y que continúa en crecimiento, además de dar información sobre las condiciones de vulnerabilidad presentes en el sitio.

La mampostería, tal y como es indicado en el informe técnico ERN-CAPRA T2-5 posee una vulnerabilidad física baja, lo cual es muy positivo para la región analizada. Sin embargo, la tipología constructiva no es el único parámetro utilizado en el estudio para estimar la vulnerabilidad sísmica.

Además del tipo constructivo se considera que la edad de las edificaciones y el estado de conservación de las mismas son aspectos determinantes y críticos para determinar el comportamiento de los edificios ante la ocurrencia de sismos y, más importante aún, la extensión del daño estructural que podría esperarse en estos según las condiciones actuales del cantón.

En el área de estudio un 49.87% de las edificaciones se conservan en buen estado (independientemente del tipo constructivo), 19.20% se encuentran en condiciones de preservación excelentes y un 21.07% en estado regular. Solamente un 9.87% están en condiciones de conservación pobres, lo cual es importante porque significa que la mayoría de edificaciones no reúnen condiciones para amplificar el daño en caso de un terremoto, sino que están diseñadas y construidas para soportar estos fenómenos de un modo aceptable.

En relación con la edad, se evidencia nuevamente el desplazamiento de la tendencia a trabajar con muros de madera, ya que estas estructuras son las más representativas de la época correspondiente a la décadas de los ochentas, setentas e incluso sesentas.

Las edificaciones construidas previo a 1974 solamente representan un 13.07% del total de edificaciones, cifra cercana al número de edificaciones con pobre estado de conservación. Un 50.13% de las edificaciones fueron construidas entre los años de 1974 y 2001, magnitud que una puede ser correlacionada con el porcentaje de edificios en buen estado. El restante 36.80% denota a las edificaciones construidas después del 2002.

En términos específicos, para las tipologías predominantes en el centro del cantón, los resultados correspondientes a la mampostería reforzada indican que un 16.27% de las unidades de vivienda y comercio realizadas con este material se hallan en excelentes condiciones, un 35.20% en buen estado, un 10.93% se ubican en el rango de conservación regular, y solamente un 1.87% puede relacionarse con condiciones de conservación pobres.

Los datos investigados sobre conservación, tipología constructiva y edad, describen de manera eficaz a las edificaciones encuestadas, con lo cual, podría llevarse a cabo un estudio puntual para determinar la vulnerabilidad sísmica de cada una de estas. No obstante, el propósito de este proyecto no es ejecutar análisis puntuales sino estimar acertadamente la vulnerabilidad sísmica de la región central del cantón de Pérez Zeledón, en términos de edificaciones para vivienda y comercio.

Los resultados individuales obtenidos con las inspecciones son representativos también de los lotes en los cuales se realizaron las inspecciones. Esto quiere decir que a partir de los atributos críticos de los edificios de un determinado lote, se pudo determinar un valor para los atributos críticos del lote en general.

Para evaluar la vulnerabilidad física de las unidades de terreno inspeccionadas, inicialmente se especificó el tipo constructivo dominante en cada una. Luego, considerando el número de inspecciones, se tomaron los datos individuales de cada atributo crítico y se calculó la media ponderada de estos. Con esto, fue posible obtener un valor de edad (E), estado de conservación (EC) y tipo constructivo (TC) para cada lote, en función de

los atributos individuales de las edificaciones inscritas en estos.

Con los atributos determinados, se realizaron dos pasos más antes de llegar a definir la vulnerabilidad sísmica regional. El primer aspecto que se cubrió fue el del alcance de la información. Los atributos críticos calculados solamente describían las condiciones de los lotes que fueron inspeccionados, es decir, los cuarenta y cuatro lotes que conformaron a la muestra de asistencia. Esta información se expandió hacia aquellos lotes que compartían características similares con los inspeccionados, a través del procedimiento de herencia descrito en la metodología. Usando este proceso se asignó información a 222 lotes en lugar de a 44. Estos doscientos veintidós lotes representaron, en términos de las unidades de terreno, un 72.08% del total de lotes cuya inspección era viable, y un 66.67% de todos los lotes del área de estudio (incluyendo aquellos descartados).

Con la información correspondiente asignada a todos los lotes estudiados se calculó el índice de vulnerabilidad física grupal, un factor obtenido mediante el cruce de los tres atributos críticos obtenidos previamente.

En este caso, cabe resaltar que los atributos críticos de estado de conservación y tipo constructivo podían tener valores máximos, en teórica, de 5, mientras que para el atributo de edad el peso máximo podía alcanzar a 4. En las unidades de terreno con información, estas cifras tope no se alcanzaron en ningún caso. Los factores de peso según edad se encuentran en un rango que va desde 2.00 hasta 3.60; los factores según estado de conservación van desde 1.20 hasta 4.60, siendo este el atributo con mayor variabilidad a lo largo de la zona de estudio. Finalmente, el peso para el atributo de tipo constructivo posee valores entre 2.30 y 3.20. Estas cifras indican que los valores más extremos y de mayor peligro no se alcanzaron, sin embargo, en algunos lotes los atributos superan el punto medio de la magnitud máxima, y esto indica un riesgo elevado en estos sectores.

Con el valor de los atributos —a través del cruce de mapas de atributos— se obtuvo el índice de vulnerabilidad física grupal. Este número busca cuantificar la vulnerabilidad de los lotes a los cuales describe, siendo que un valor de 0.0 indica vulnerabilidad nula y seguridad absoluta, y un valor de 1.0 indica vulnerabilidad absoluta y seguridad nula.

Los resultados de índice grupal para este proyecto se encuentran entre 0.07 y 0.49 para los

lotes de la muestra óptima, y entre 0.06 y 0.26 para el área de estudio en su totalidad. Estos rangos demuestran que algunos sectores, especialmente los ubicados cerca de la ruta que va hacia Dominical y de la ruta que va hacia Palmares, poseen vulnerabilidad sísmica muy baja. Por otro lado, lotes del centro de la ciudad de San Isidro de El General muestran vulnerabilidad moderada, hecho que se asocia principalmente al estado de conservación y la edad de las estructuras allí encontradas.

Con el índice de vulnerabilidad grupal y las aceleraciones pico dadas por los escenarios sísmicos simulados, se realizó el cálculo de la vulnerabilidad regional (riesgo sísmico).

Para cada caso propuesto se obtuvieron los rangos de daño en función de las variables antes citadas.

En el escenario más crítico, se tiene que la mayoría del centro urbano del cantón estaría experimentando daños considerables y también graves, lo cual en términos porcentuales representa rangos definidos por: 30%-40%, en el caso de los lotes con daños considerables; 40%-60%, en el caso de los lotes con daños graves.

Daños graves se estarían presentando en edificaciones de distintos tipos constructivos. En el centro de mayor concentración comercial los pórticos de concreto más antiguos estarían en peligro de sufrir daños que afectarían más del 50% de su integridad como edificación. Este riesgo sería muy similar para los lotes del barrio Sináí (punto en el cual se presentarían aceleraciones elevadas debidas al terremoto modelado) y los ubicados en las proximidades del barrio Valverde, cuyo tipo constructivo predominante es la mampostería reforzada.

Las edificaciones de madera del barrio San Andrés también estarían gravemente comprometidas, y problemáticamente colapsarían.

Por otro lado, los lotes ubicados el suroeste del cementerio municipal estarían sufriendo daños estructurales de un 25%, porcentaje estimado tomando como base inalterada el estado al momento de las encuestas.

En el barrio Laboratorio y sus cercanías el daño asociado al primer escenario sísmico no rebasaría el 22%, en sus puntos de mayor inquietud, y el 18% en los puntos de menor preocupación.

Las regiones de mayor afectación para los escenarios dos y tres serían las mismas, debido a que las distancias relativas entre dos o más puntos del área de estudio nunca están a una separación suficiente como para causar un cambio abrupto en

las regiones de afectación, y siendo así, la vulnerabilidad de los lotes se vuelve el factor más determinante.

Para el escenario sísmico número dos, los mayores daños estarían dentro del rango de 30% y 45%, daños que se toman usando la integridad observada en las estructuras al momento de las inspecciones como base.

Respecto a los porcentajes de daño más bajos para el segundo escenario sísmico, estos estarían ubicados dentro del rango de daño leve, abarcando, tentativamente, valores de daño entre 15% y 20%, aunque según el análisis realizado en QGIS, el valor podría hallarse alrededor de 16% de daño para los lotes con vulnerabilidad sísmica baja.

El tercer escenario sísmico es el que presenta los menores porcentajes de daño para el área en estudio, esto es debido a que a pesar de que si se considera toda la región en general este escenario posee aceleraciones máximas altas, incluso por encima de aquellas calculadas en el segundo escenario, estas aceleraciones corresponden a su zona epicentral. En el área correspondiente a la ciudad de San Isidro de El General y Daniel Flores, las aceleraciones de este sismo son menores a las halladas para los escenarios uno y dos. Esto tiene mucho sentido, ya que, no solamente se trata de un escenario con una magnitud de momento menor a la de sus contrapartes, sino que la profundidad de este es de 4.00 km, lo cual quiere decir que la distancia hipocentral es baja en comparación con aquella de los sismos uno y dos, y esto contribuye a que sus valores de aceleración en el área de estudio sean menores.

Para este escenario, los daños no alcanzan a ubicarse en el rango moderado y, en cambio, si llegase a ocurrir un sismo con un epicentro, foco y magnitud como las descritas para este, los daños en el área de estudio llegarían a un máximo de 27%.

El daño para los lotes de menor vulnerabilidad estaría entre 13% y 18%. Este escenario es el que presentaría mayor uniformidad en cuanto a porcentajes de daño, siendo que cerca de un 80% del territorio analizado presentaría variaciones de daño relativamente pequeñas, entre 5% y 10% (sin considerar el territorio correspondiente a los lotes descartados).

Es importante recalcar un hecho en relación con los mapas de vulnerabilidad sísmica desarrollados para los terremotos hipotéticos: el

daño en términos porcentuales para los lotes analizados y heredados no depende únicamente del tipo constructivo encontrado en estos. De hecho, el caso contrario es verdad. Es posible observar que dentro del área analizada hay zonas con diferentes tipos constructivos que muestran niveles de daño similares e incluso prácticamente iguales.

Lo anterior no es una contradicción o fallo en el procedimiento realizado. Podría argumentarse que, en otros procedimientos para la estimación de la vulnerabilidad, la tipología constructiva es el parámetro determinante para calcular el nivel de daño que sufrirá una estructura ante el efecto de una determinada intensidad de movimiento; un ejemplo de procedimientos como este reside en las funciones de vulnerabilidad.

Las funciones de vulnerabilidad sísmica, citadas en la sección de metodología de este informe, proponen una curva de ajuste que pretende explicar el comportamiento de las diferentes tipologías constructivas ante la incidencia y el efecto de las ondas sísmicas. Esto quiere decir, en síntesis, que la distribución de daños obtenida mediante funciones de vulnerabilidad solamente depende de la tipología constructiva y de la aceleración pico asociada a los escenarios específicos.

Las funciones de vulnerabilidad son de gran utilidad en análisis de edificaciones individuales, en las cuales se puede realizar un estudio detallado y exhaustivo de los componentes y materiales que componen a la estructura y con base en esto determinar el comportamiento que tendrán los elementos sismo-resistentes, y por ende la edificación, ante la ocurrencia de un sismo. Sin embargo, las funciones de vulnerabilidad cuentan con limitaciones de peso, comenzando por el hecho de que son desarrolladas para tipos y localizaciones geo-

gráficas, lo cual quiere decir que su uso en regiones distintas a aquellas para las cuales las fueron diseñadas requiere, como mínimo, de un ajuste de datos. Además, incluso considerando que las funciones propuestas por ERN-CAPRA en el informe técnico T2-5 son válidas para Pérez Zeledón sin hacer un reajuste de curvas y desviaciones, su aplicación en la zona tendría que ignorar parámetros que indudablemente comprometen el desempeño estructural de las edificaciones, como lo son la edad y el estado de conservación.

Es apropiado decir, que basar un estudio de vulnerabilidad regional simplemente en el uso de funciones de vulnerabilidad que han sido desarrolladas para casos externos a los del marco de análisis del estudio en cuestión, sería una práctica apresurada y riesgosa, ya que terminaría por asignar a estructuras con características físicas distintas el mismo modo de reacción ante sacudidas del terreno, lo cual es engañoso porque el simple hecho de que dos o más estructuras compartan la misma tipología y/o sistema sismo-resistente, no significa que su comportamiento ante vibraciones sea equivalente; a no ser, claro, que ambas se encuentren bajo las mismas condiciones de desempeño.

Todo esto quiere decir que considerar atributos influyentes en el desempeño de las estructuras es indispensable para una correcta estimación de la vulnerabilidad sísmica, tanto a nivel individual como regional. Incluso, parámetros además de los considerados en este estudio podrían ser incluidos para aumentar el grado de exactitud de las determinaciones realizadas. Un parámetro que podría considerarse relevante en el comportamiento de la estructura ante sismos es, por ejemplo, el tipo de cimentación de las edificaciones.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- ❖ En este estudio se definió una metodología determinística para evaluar la amenaza y la vulnerabilidad sísmica del sector central del cantón de Pérez Zeledón. La metodología diseñada es dependiente de la región y del área de estudio, en términos generales, y de la población tomada como marco de análisis a partir de la cual extrapolar los resultados, en términos específicos. En esta investigación teórico-práctica se determinó que la población de edificaciones del territorio analizado es de 15012 edificaciones, al momento de realizar el estudio. Una muestra representativa de la población general se calculó, utilizando el procedimiento estadístico conocido como muestreo aleatorio simple, en el cual se consideró un nivel de confianza de 95% y un porcentaje de error igual a 5%. La muestra representativa (óptima) corresponde a un total de 375 edificaciones.
- ❖ Para el estudio de vulnerabilidad se diseñó un procedimiento basado en el uso de una población y muestra de asistencia. La población de asistencia utilizada es de 333 lotes, mismos que engloban todo el territorio referente al centro de concentración urbana del cantón de Pérez Zeledón (la ciudad de San Isidro de El General y parte de Daniel Flores). La muestra de asistencia calculada corresponde a 44 unidades de terreno con áreas superficiales clasificadas en rangos desde 0 a 10000 m² y hasta de 30000 m² a 50000 m². Entre los 44 lotes que componen a la muestra de asistencia se distribuyeron las inspecciones de las 375 edificaciones necesarias para poder realizar el cálculo representativo de la vulnerabilidad sísmica a nivel regional.
- ❖ Se utilizó un formulario de inspección para evaluar y categorizar a las edificaciones. Con base en la información obtenida se confeccionó una base de datos. Esta base de datos, o inventario, permitió la clasificación de las tipologías y sistemas constructivos más comúnmente empleados en el área de estudio. En total, se determinó la presencia de 7 tipos constructivos en la región: tugurio (R) (0.53% de las edificaciones); muros de madera (W) (21.33% de las edificaciones); mampostería simple (MS) (0.27% de las edificaciones); mampostería confinada (MC) (3.20% de las edificaciones); mampostería reforzada (MR) (64.27% de las edificaciones); pórticos de concreto (PCR) (6.67% de las edificaciones) y; prefabricado (CP) (3.73% de las edificaciones).
- ❖ Para la estimación de la vulnerabilidad sísmica se determinaron los pesos de atributos propios de cada edificación (edad, tipo constructivo y estado de conservación), utilizando para ello tablas consultadas en la literatura sobre el tema, elaboradas gracias a investigaciones previas y el juicio de los expertos del Instituto Tecnológico de Costa Rica. En general, un 19.20% de las edificaciones se encuentran en excelentes condiciones; un 49.87% en buenas condiciones; 21.07% en condiciones regulares y; 9.87% de las edificaciones se encuentran en un estado pobre y no recomendado para ocupación.
- ❖ Las edificaciones del cantón del centro de Pérez Zeledón, en su mayoría, han sido

- construidas en el lapso comprendido entre los años de 1974 y 2001; un 50.13% de las edificaciones corresponden a este período. 36.80% de las edificaciones han sido construidas después del 2002, y solamente un 13.07% del total de edificaciones actual fue construido antes de 1974.
- ❖ Se realizó una investigación sobre las fuentes de sismogénicas de la región y sus propiedades, la sismicidad histórica y reciente, así como de la distancia promedio entre las fallas geológicas relevantes y el área de estudio. Esta investigación reveló que la fuente sismogénica más importante de la región es una falla ubicada a unos 15 km de la ciudad de San Isidro, determinada y caracterizada de manera implícita, gracias a evidencias indirectas de la región, como el relieve y la topografía; además de los eventos sísmicos atribuidos a esta. Se concluyó así que la mayor fuente de amenaza para la región es la falla Buenavista, misma que posee una longitud de alrededor de 11 km y un potencial para sismos de hasta 6.3 Mw.
 - ❖ Se investigó la composición geológica de la región en estudio, concluyendo que esta se encuentra compuesta por rocas intrusivas, rocas sedimentarias volcánicas, rocas sedimentarias de aguas profundas y rocas de origen volcánico. Esta configuración estratigráfica indica que el terreno tiene un efecto atenuador en la aceleración pico de eventos sismológicos con influencia sobre la región.
 - ❖ Se determinó, en rasgos generales, la configuración topográfica de la región, la cual incluye variaciones de pendiente muy significativas entre distancias relativamente cortas. Los puntos más altos del cantón varían entre 700 m.s.n.m. y 3821 m.s.n.m., dependiendo de la zona.
 - ❖ Se definieron, con base en las evidencias dadas por la investigación del marco tectónico local, tres sismos hipotéticos para evaluar la amenaza sísmica de la región en estudio. Los escenarios simulados se situaron en puntos estratégicos del sector central del cantón y sus características son las siguientes:
 - escenario 1: Mw = 6.3, ubicado hacia el noreste (NE) de la ciudad de San Isidro de El General, a una distancia epicentral de 9.07 km, en el distrito de Rivas, y a una profundidad de 10 km. Coordenadas geográficas son: Y = 1044001.308 y X = 537130.104.
 - escenario 2: Mw = 5.3, ubicado hacia el norte de Dominical, en el distrito de Platanares (dirección suroeste con respecto a la ciudad de San Isidro), a una distancia epicentral de 15.24 km y a una profundidad de 7.0 km. Coordenadas geográficas: Y = 1030337.125 y X = 518940.340.
 - escenario 3: Mw = 5.0; ubicado a 12.94 kilómetros de la ciudad de San Isidro de El General, hacia el noroeste de esta y en el distrito de Páramo y a una profundidad de 4.0 km. Coordenadas geográficas: Y = 1047085.121 y X = 526711.422.
 - ❖ Los resultados de amenaza sísmica obtenidos para los escenarios planteados son los siguientes:
 - escenario 1: aceleraciones pico del terreno: 180 cm/s² – 352 cm/s². Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: 18.34% – 35.87%. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: VI – VIII.
 - escenario 2: aceleraciones pico del terreno: 95.46 cm/s² – 242 cm/s². Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: 9.73% – 24.71%. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: V – VII.
 - escenario 3: aceleraciones pico del terreno: 89.37 cm/s² – 261 cm/s². Rango de aceleraciones pico del terreno en función de la aceleración asociada a la gravedad terrestre: 9.11% – 26.61%. Rango de intensidades instrumentales según la escala sismológica Mercalli Modificada: V – VII.
 - ❖ Se determinó un índice de vulnerabilidad física grupal para los lotes inspeccionados y aquellos próximos a estos (a una distancia máxima definida por el rango de 250 m a 300 m, medida desde el centroide del lote inspeccionado), en función de las ca-

racterísticas estructurales cualitativas registradas para las edificaciones y tipologías evaluadas (Edad, Tipo Constructivo y Estado de Conservación). El índice de vulnerabilidad indica la susceptibilidad a daños de las tipologías constructivas representativas de los lotes y por ende, en términos generales, de la región en estudio. La vulnerabilidad encontrada para las edificaciones del cantón se encuentra entre baja (índice de vulnerabilidad menor a 0.1) y moderada (índice de vulnerabilidad mayor a 0.2 pero menor a 0.4).

❖ Se calcularon los resultados de riesgo sísmico —o vulnerabilidad regional— para el área de estudio, en términos de edificaciones con fines habitacionales y/o comerciales. Un escenario de riesgo fue obtenido para cada uno de los escenarios de amenaza planteados y sus reportes de daños son los siguientes:

- escenario 1: daños estructurales graves (40% - 60%) para un 17.57% de los lotes con información reportada. Daños estructurales considerables (30% - 40%) para un 57.66% de los lotes con información reportada. Daños estructurales moderados (20% - 30%) para un 7.21% de los lotes con información reportada. Daños estructurales leves (15% - 20%) para un 9.46% de los lotes con información reportada. Daños en rangos medios para el resto del área de estudio (8.1% correspondiente a territorio con daños equivalentes a los valores límite de las categorías, tales como 20%, 30% y 40%).
- escenario 2: daños estructurales entre considerables y de suma importancia (35% - 45%) para un 18.47% de los lotes con información reportada. Daños estructurales moderados (20% - 30%) para un 30.18% de los lotes con información reportada. Daños estructurales leves (15% - 20%) para un 18.09% de los lotes con información reportada. Daños en rangos medios para el resto del área de estudio (33.26% correspondiente a territorio con daños equivalentes a los valores límite de las categorías).
- escenario 3: daños estructurales considerables (35% - 45%) para un 17.57% de los lotes con información reportada. Daños estructurales entre moderados y considerables (25% - 35%) para un 34.23% de los lotes con información reportada. Daños estructurales intermedios (20% - 30%) para un 25.68% de los lotes con información reportada. Daños leves (15% - 20%) para un 18.02% de los lotes con información reportada. Daños en rangos medios para el resto del área de estudio (4.5% correspondiente a territorio con daños equivalentes a los valores límite de las categorías).

Recomendaciones

- ❖ Realizar un estudio de vulnerabilidad física de las edificaciones más detallado, en el cual se pueda determinar e inspeccionar una muestra de la población total con una menor incertidumbre asociada, para así poder disminuir el error relacionado con las determinaciones y conclusiones hechas a partir de los análisis. Esto es importante porque en el caso de este estudio, la incertidumbre de 5% en el muestreo aleatorio simple, fue un valor asumido y no obtenido a partir de alguna clase de proceso estadístico o de investigación.
- ❖ Reportar los resultados de estudios similares en formatos de área más reducidos (tales como comunidades). Realizar mapas específicos de vulnerabilidad de varias zonas dentro de una misma área de estudio es importante porque permitiría el desarrollo de planes de mitigación de riesgo más localizados y exactos, además de describir la realidad de las edificaciones de mejor forma. Por supuesto, para poder emitir mapas más puntuales es necesario un escrutinio mayor de las estructuras localizadas en cada sector.
- ❖ Llevar a cabo un estudio de amenaza sísmica con una metodología de trabajo probabilística, para así poder comparar los resultados del estudio probabilista y determinista y encontrar así factores de equiva-

- lencia y/o divergencia entre ambos métodos, con el fin de determinar el modo más eficaz de enfrentar la amenaza de la región.
- ❖ Elaborar formularios de inspección diseñados para obtener más y mejores datos que puedan indicar el estado y la vulnerabilidad física de una edificación encuestada.
 - ❖ Considerar, en estudios posteriores, no solamente el daño asociado al impacto en las estructuras debido a la intensidad sísmica, sino también los daños probables en función de fenómenos provocados por los sismos, tales como: licuefacción, deslizamientos marejadas, fugas de sustancias tóxicas, incendios y explosiones, etc. O realizar estudios individuales para cada aspecto como parte de un conjunto a través del cual se pueda crear una noción del riesgo general a enfrentar ante desastres naturales y sus consecuencias derivadas para la región.
 - ❖ Capacitar a un comité regional coordinador para la atención de emergencias naturales utilizando los resultados obtenidos en este estudio, así como también, de ser posible, a comités locales pertenecientes a las distintas comunidades del cantón de Pérez Zeledón, para asegurarse de que cuenten con conocimiento y criterio suficiente para actuar en caso de que ocurra un terremoto.
- ❖ Incorporar a las empresas públicas y privadas situadas en la región de estudio a los planes de emergencia. Fomentar su participación y apoyo a los planes, y realizar escenarios de escape específicos para sus edificios.
 - ❖ Utilizar los resultados de los estudios de amenaza y vulnerabilidad sísmica de la región para establecer las reacciones y medidas pertinentes.
 - ❖ Utilizar herramientas tecnológicas para la recolección de datos de campo, por ejemplo celulares inteligentes, ya que esto podría permitir la implementación de un sistema de recolección y actualización de datos más automatizado y eficiente, con el cual se podría almacenar la información de cada encuesta de forma instantánea en una base de datos.
 - ❖ Contar con más investigadores para realizar las encuestas y posiblemente contribuir de manera general en todos los aspectos de un proyecto de esta índole.
 - ❖ Construir las edificaciones de la región apegándose a los diseños aprobados para los proyectos por las instituciones pertinentes, tales como las municipalidades y el Colegio de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA).

Apéndices

Apéndice 1: localización de sísmicos percibidos en el cantón de Pérez Zeledón durante el lapso comprendido entre 2009 y 2016, expresada en grados decimales, grados sexagesimales y el sistema de referencia de coordenadas crtm05.

Apéndice 2: mapas necesarios para calcular la amenaza sísmica en cada escenario propuesto.

- Mapas de distancias epicentrales.
- Mapas de distancias hipocentrales.
- Mapa de clasificación geológica.

Apéndice 3: cuadros de aceleración máxima del terreno, según la ecuación de movimiento de terreno propuesta en Climent et al. (1994), y para diferentes magnitudes sísmicas.

Apéndice 4: ejemplos de los formularios de inspección de edificaciones completados.

Apéndice 5: inventario obtenido tras procesar los datos del censo realizado en la muestra óptima del área de estudio.

Apéndice 6: índices de vulnerabilidad física grupal para los lotes inspeccionados.

APÉNDICE 1

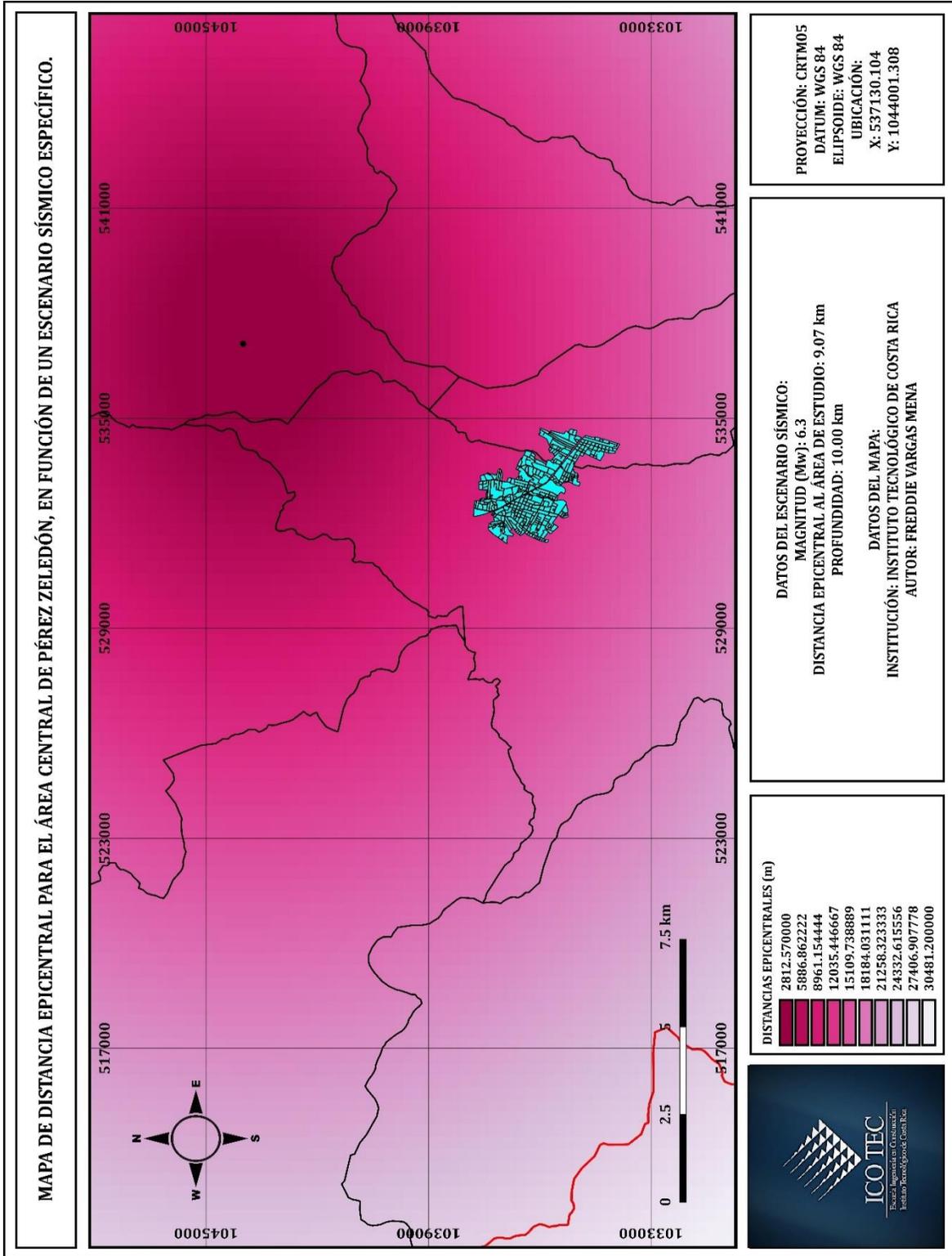
UBICACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS EVENTOS SISMOLÓGICOS RECIENTES PERCIBIDOS EN PÉREZ ZELEDÓN (PERÍODO 2009-PRIMER CUATRIMESTRE DE 2016)									
Coordenadas decimales (SRC: WGS 84)		Coordenadas sexagesimales (SRC: WGS 84)				Sistema de coordenadas UTM para Costa Rica (CRTM05)		Propiedades para clasificación	
Latitud	Longitud	Latitud		Longitud		Y	X	M	Profundidad (km)
8,672	-82,837	8°40'19"	N	82°50'13"	W	959073,299	627989,875	4.7	30.0
9,230	-83,530	9°13'48"	N	83°31'48"	W	1020620,678	551642,577	4.6	15.0
8,607	-83,221	8°36'25"	N	83°13'16"	W	951776,419	585741,670	4.0	30.0
9,524	-83,661	9°31'26"	N	83°39'40"	W	1053119,174	537217,046	2.6	9.0
9,501	-83,677	9°30'04"	N	83°40'37"	W	1050573,805	535462,841	2.4	14.0
9,501	-83,677	9°30'04"	N	83°40'37"	W	1050573.805	535462.841	2.4	14.0
9,500	-83,678	9°30'00"	N	83°40'41"	W	1050463,107	535353,151	2.8	10.0
9,500	-83,683	9°30'00"	N	83°40'59"	W	1050462,602	534804,183	3.2	7.0
9,517	-83,680	9°31'01"	N	83°40'48"	W	1052343,022	535131,829	2.9	8.0
9,480	-83,780	9°28'48"	N	83°46'48"	W	1048242,481	524155,662	4.0	30.0
9,484	-83,833	9°29'02"	N	83°49'59"	W	1048681,620	518336,113	3.8	26.5
9,060	-83,718	9°03'36"	N	83°43'05"	W	1001798,200	531000,041	5.2	29.0
9,222	-84,241	9°13'19"	N	84°14'28"	W	1019710,894	473519,057	6.1	10.0
9,461	-83,680	9°27'40"	N	83°40'48"	W	1046149,700	535137,531	3.8	14.0
9,298	-83,903	9°17'53"	N	83°54'11"	W	1028108,416	510655,990	3.8	12.5
9,298	-83,903	9°17'53"	N	83°54'11"	W	1028108,416	510655,990	3.7	8.0
9,298	-83,878	9°17'53"	N	83°52'41"	W	1028109,264	513402,383	4.2	15.0
9,313	-83,878	9°18'47"	N	83°52'41"	W	1029768,151	513401,812	4.4	12.0
9,300	-83,520	9°18'00"	N	83°31'12"	W	1028363,838	552730,937	3.2	27.0
9,388	-83,335	9°23'17"	N	83°20'06"	W	1038129,422	573036,728	3.5	16.0
9,160	-84,160	9°09'36"	N	84°09'36"	W	1012849,201	482416,260	4.5	25.0
9,973	-83,585	9°58'23"	N	83°35'06"	W	1102786,677	545499,913	4.1	16.0
9,380	-83,376	9°22'48"	N	83°22'34"	W	1037236,367	568535,107	3.0	10.0
9,324	-83,860	9°19'26"	N	83°51'36"	W	1030985,402	515378,650	3.8	10.0
9,437	-83,626	9°26'13"	N	83°37'34"	W	1043501,313	541069,909	3.6	25.0
9,133	-84,137	9°07'59"	N	84°08'13"	W	1009862,185	484942,793	4.2	20.0
9,127	-84,142	9°07'35"	N	84°08'31"	W	1009198,849	484392,998	4.1	20.0
9,119	-84,157	9°07'08"	N	84°09'25"	W	1008314,799	482743,983	4.5	20.0
8,432	-83,066	8°25'55"	N	83°03'58"	W	932459,288	602850,030	4.0	7.0

APÉNDICE 1

9,340	-84,080	9°20'24"	N	84°04'48"	W	1032752,832	491212,606	3.9	37.0
9,933	-83,744	9°55'59"	N	83°44'38"	W	1098345,101	528070,689	4.2	37.0
9,529	-83,821	9°31'44"	N	83°49'16"	W	1053659,006	519651,114	3.1	20.0
9,520	-83,753	9°31'12"	N	83°45'11"	W	1052668,249	527117,090	4.5	19.0
9,464	-83,712	9°27'50"	N	83°42'43"	W	1046478,419	531623,474	4.0	20.0
9,455	-83,721	9°27'18"	N	83°43'16"	W	1045482,265	530636,030	3.3	20.0
9,410	-83,700	9°24'36"	N	83°42'00"	W	1040507,427	532946,258	2.8	8.8
6,592	-82,449	6°35'31"	N	82°26'56"	W	729131,511	671526,013	6.3	5.0
9,531	-83,752	9°31'52"	N	83°45'07"	W	1053884,868	527226,005	4.8	18.0
9,506	-83,754	9°30'22"	N	83°45'14"	W	1051119,848	527008,402	5.2	18.0
9,510	-83,755	9°30'36"	N	83°45'18"	W	1051562,148	526898,299	3.8	19.0
9,487	-83,678	9°29'13"	N	83°40'41"	W	1049025,371	535354,483	2.4	4.0
9,562	-83,618	9°33'43"	N	83°37'05"	W	1057326,739	541933,210	2.5	14.0
9,524	-83,765	9°31'26"	N	83°45'54"	W	1053109,711	525799,353	4.1	16.0
8,819	-83,181	8°49'08"	N	83°10'52"	W	975232,714	590093,829	4.0	60.0
9,470	-83,800	9°28'12"	N	83°48'00"	W	1047135,216	521960,320	4.4	31.0
9,540	-84,245	9°32'24"	N	84°14'42"	W	1054879,986	473104,049	3.7	42.0
9,439	-83,695	9°26'20"	N	83°41'42"	W	1043715,141	533492,571	3.3	7.0
9,425	-83,751	9°25'30"	N	83°45'04"	W	1042161,949	527344,177	3.5	25.0

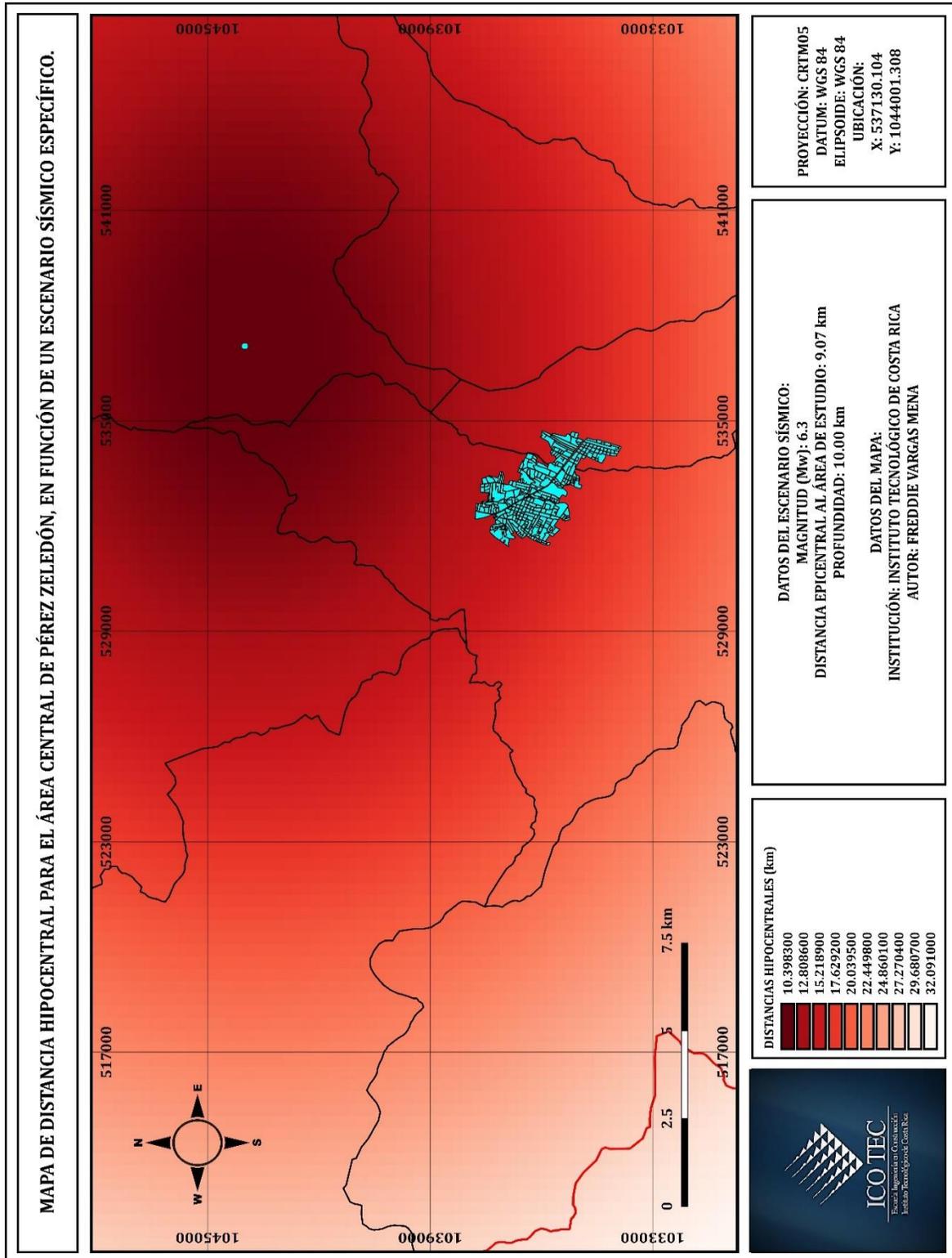
Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

APÉNDICE 2



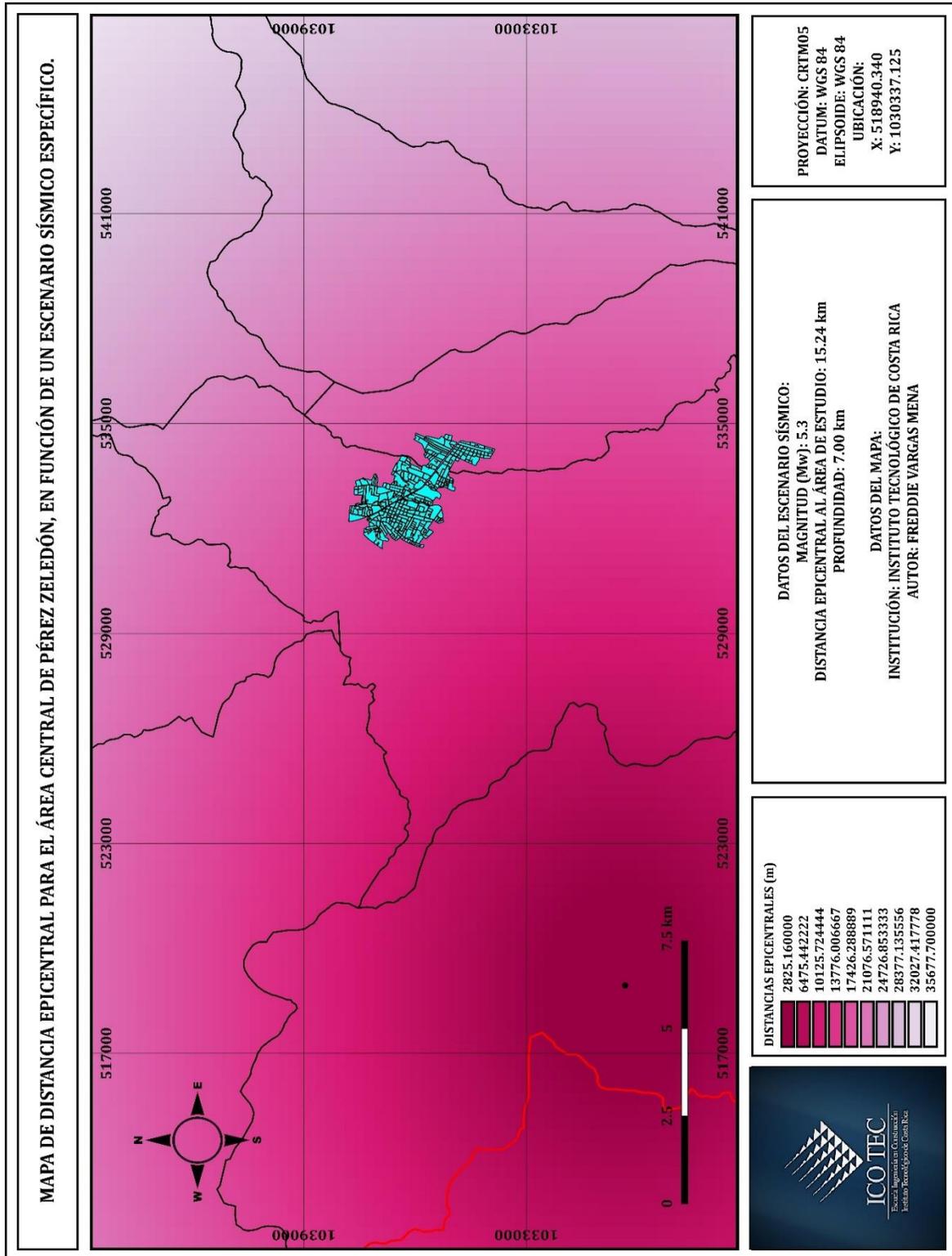
Mapa de distancias epicentrales para el escenario sísmico número uno.
 Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



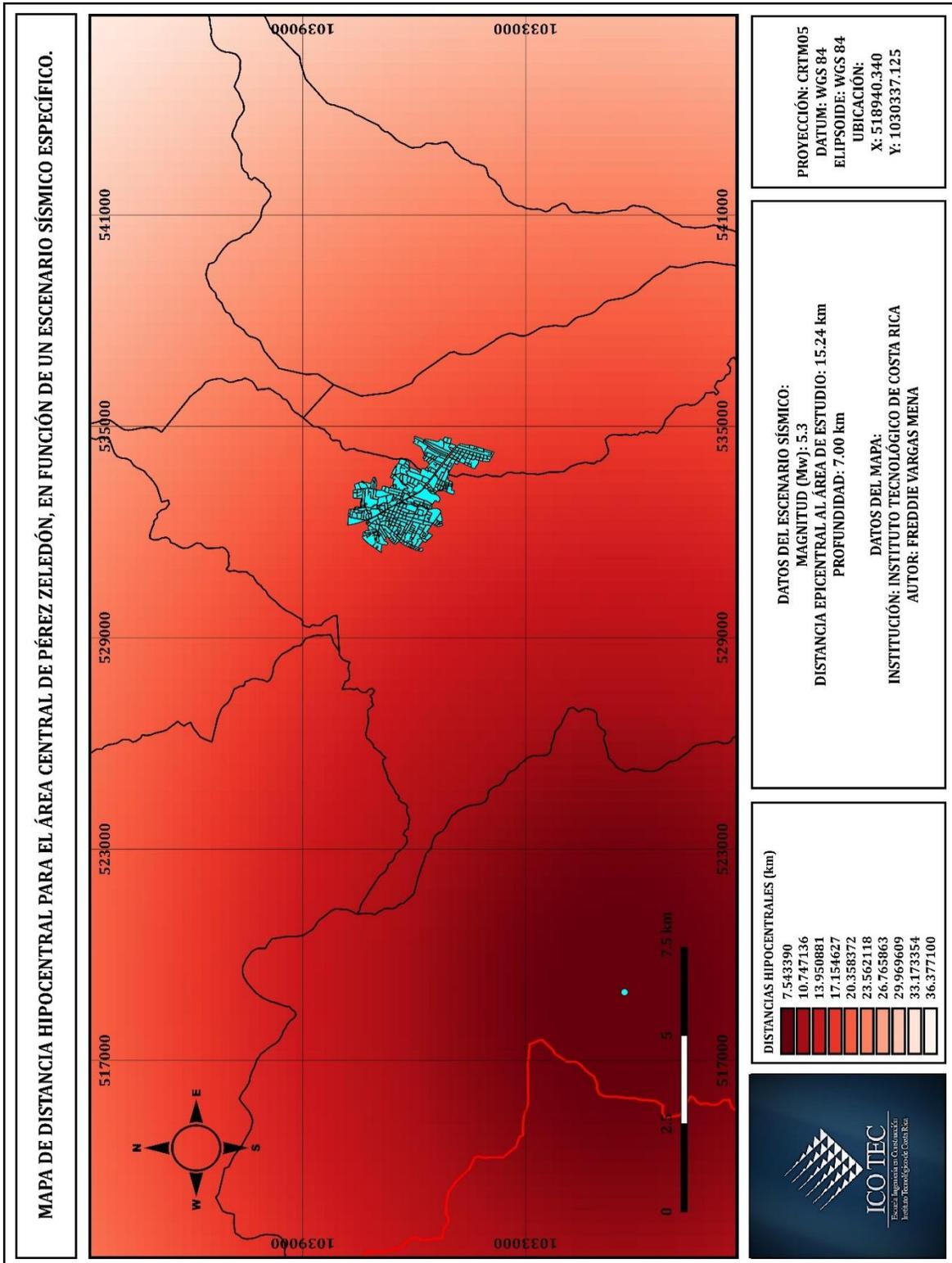
Mapa de distancias hipocentrales para el escenario sísmico número uno.
Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



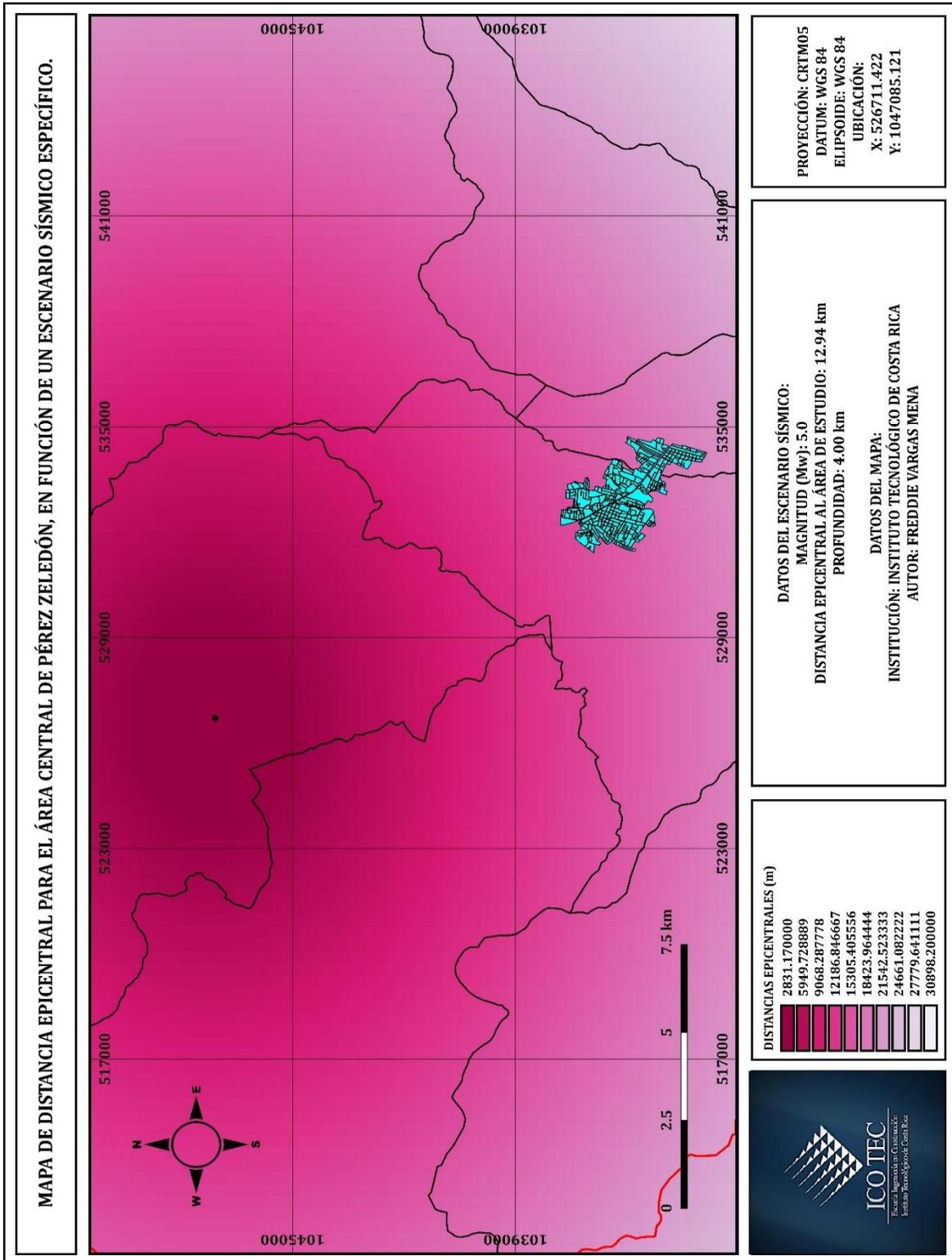
Mapa de distancias epicentrales para el escenario sísmico número dos.
 Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



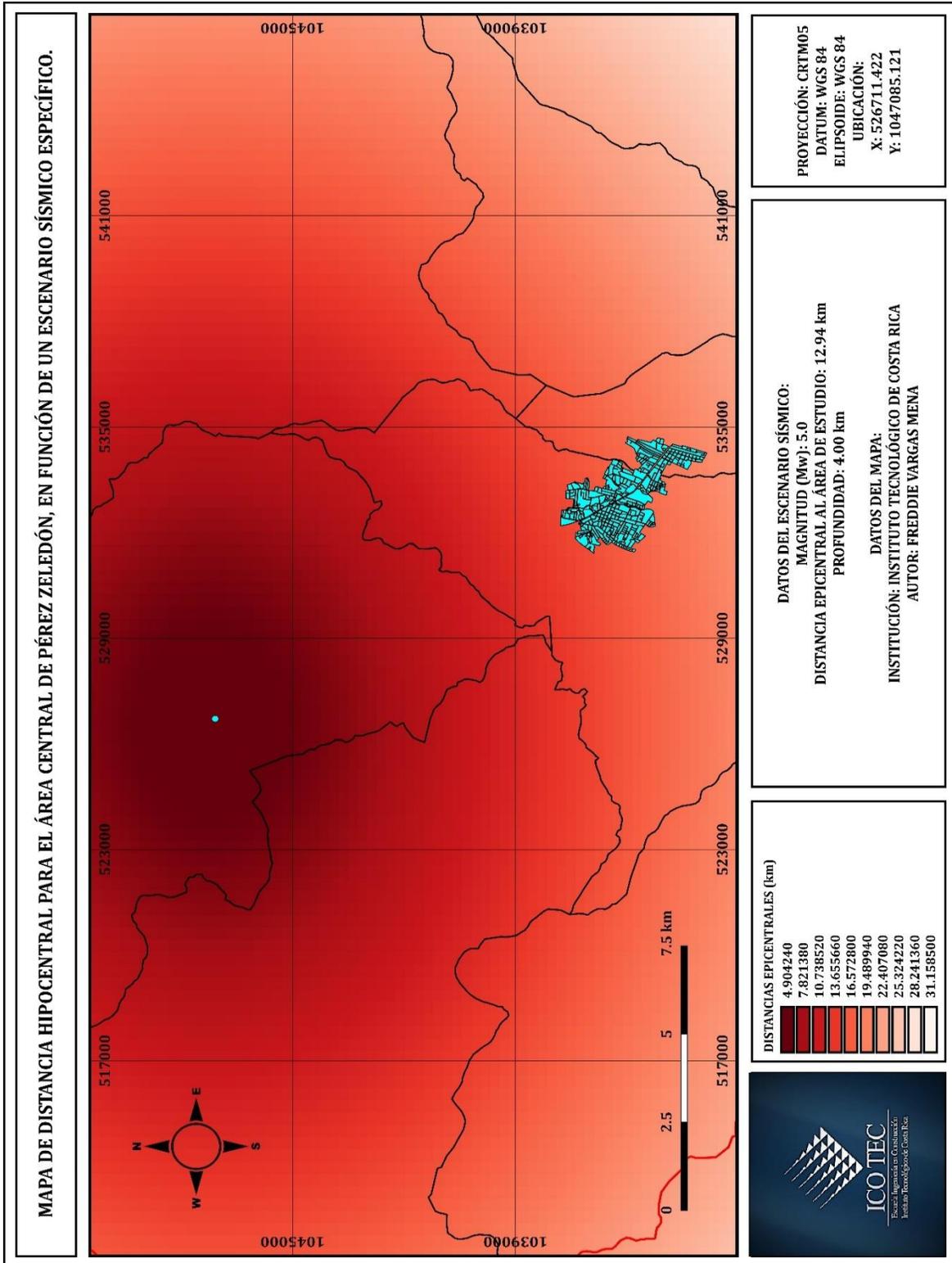
Mapa de distancias hipocentrales para el escenario sísmico número dos.
 Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



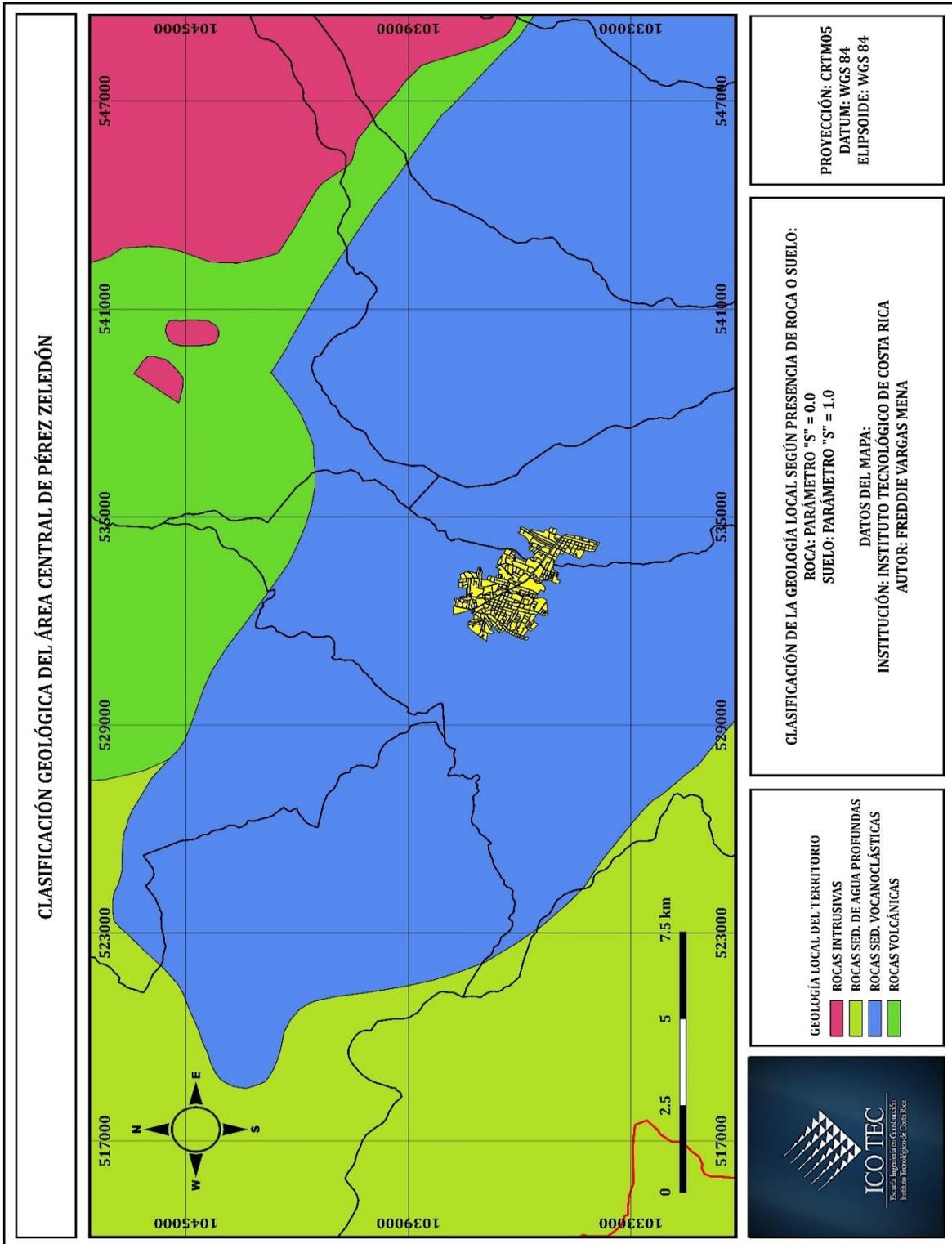
Mapa de distancias epicentrales para el escenario sísmico número tres.
 Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



Mapa de distancias hipocentrales para el escenario sísmico número tres.
 Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 2



Mapa de clasificación geológica del área de estudio, para determinar el coeficiente descriptivo "S" en la ecuación de atenuación de Climent et al. (1994).
Fuente: QGIS 2.14.

APÉNDICE 3

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE SUELO, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 5.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,28	3,58	358,10	36,52
10,00	2,30	0,89	2,43	243,10	24,79
15,00	2,71	0,66	1,93	192,61	19,64
20,00	3,00	0,49	1,63	162,56	16,58
25,00	3,22	0,35	1,42	142,04	14,48
30,00	3,40	0,24	1,27	126,87	12,94
35,00	3,56	0,14	1,15	115,04	11,73
40,00	3,69	0,05	1,05	105,47	10,76
45,00	3,81	-0,03	0,98	97,52	9,94
50,00	3,91	-0,10	0,91	90,78	9,26
55,00	4,01	-0,16	0,85	84,96	8,66
60,00	4,09	-0,22	0,80	79,86	8,14
65,00	4,17	-0,28	0,75	75,36	7,68
70,00	4,25	-0,34	0,71	71,33	7,27
75,00	4,32	-0,39	0,68	67,71	6,90
80,00	4,38	-0,44	0,64	64,42	6,57
85,00	4,44	-0,49	0,61	61,42	6,26
90,00	4,50	-0,53	0,59	58,67	5,98
95,00	4,55	-0,58	0,56	56,14	5,72
100,00	4,61	-0,62	0,54	53,80	5,49
105,00	4,65	-0,66	0,52	51,62	5,26
110,00	4,70	-0,70	0,50	49,59	5,06
115,00	4,74	-0,74	0,48	47,70	4,86
120,00	4,79	-0,78	0,46	45,92	4,68
125,00	4,83	-0,82	0,44	44,25	4,51
130,00	4,87	-0,85	0,43	42,68	4,35
135,00	4,91	-0,89	0,41	41,20	4,20
140,00	4,94	-0,92	0,40	39,79	4,06
145,00	4,98	-0,96	0,38	38,47	3,92
150,00	5,01	-0,99	0,37	37,21	3,79
155,00	5,04	-1,02	0,36	36,01	3,67
160,00	5,08	-1,05	0,35	34,87	3,56
165,00	5,11	-1,09	0,34	33,78	3,44
170,00	5,14	-1,12	0,33	32,75	3,34

APÉNDICE 3

175,00	5,16	-1,15	0,32	31,76	3,24
180,00	5,19	-1,18	0,31	30,81	3,14
185,00	5,22	-1,21	0,30	29,91	3,05
190,00	5,25	-1,24	0,29	29,04	2,96
195,00	5,27	-1,27	0,28	28,21	2,88
200,00	5,30	-1,29	0,27	27,41	2,80
205,00	5,32	-1,32	0,27	26,65	2,72
210,00	5,35	-1,35	0,26	25,91	2,64
215,00	5,37	-1,38	0,25	25,20	2,57
220,00	5,39	-1,41	0,25	24,52	2,50
225,00	5,42	-1,43	0,24	23,86	2,43
230,00	5,44	-1,46	0,23	23,23	2,37
235,00	5,46	-1,49	0,23	22,62	2,31
240,00	5,48	-1,51	0,22	22,03	2,25
245,00	5,50	-1,54	0,21	21,46	2,19
250,00	5,52	-1,57	0,21	20,91	2,13
255,00	5,54	-1,59	0,20	20,38	2,08
260,00	5,56	-1,62	0,20	19,86	2,03
265,00	5,58	-1,64	0,19	19,37	1,97
270,00	5,60	-1,67	0,19	18,89	1,93
275,00	5,62	-1,69	0,18	18,42	1,88
280,00	5,63	-1,72	0,18	17,97	1,83
285,00	5,65	-1,74	0,18	17,53	1,79
290,00	5,67	-1,77	0,17	17,11	1,74
295,00	5,69	-1,79	0,17	16,70	1,70
300,00	5,70	-1,81	0,16	16,30	1,66

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE SUELO, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 5.5					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,55	4,72	472,15	48,15
10,00	2,30	1,16	3,21	320,53	32,69
15,00	2,71	0,93	2,54	253,95	25,90
20,00	3,00	0,76	2,14	214,34	21,86
25,00	3,22	0,63	1,87	187,29	19,10
30,00	3,40	0,51	1,67	167,27	17,06

APÉNDICE 3

35,00	3,56	0,42	1,52	151,68	15,47
40,00	3,69	0,33	1,39	139,07	14,18
45,00	3,81	0,25	1,29	128,59	13,11
50,00	3,91	0,18	1,20	119,69	12,21
55,00	4,01	0,11	1,12	112,01	11,42
60,00	4,09	0,05	1,05	105,30	10,74
65,00	4,17	-0,01	0,99	99,36	10,13
70,00	4,25	-0,06	0,94	94,05	9,59
75,00	4,32	-0,11	0,89	89,27	9,10
80,00	4,38	-0,16	0,85	84,94	8,66
85,00	4,44	-0,21	0,81	80,99	8,26
90,00	4,50	-0,26	0,77	77,36	7,89
95,00	4,55	-0,30	0,74	74,02	7,55
100,00	4,61	-0,34	0,71	70,93	7,23
105,00	4,65	-0,38	0,68	68,06	6,94
110,00	4,70	-0,42	0,65	65,39	6,67
115,00	4,74	-0,46	0,63	62,89	6,41
120,00	4,79	-0,50	0,61	60,55	6,17
125,00	4,83	-0,54	0,58	58,34	5,95
130,00	4,87	-0,57	0,56	56,27	5,74
135,00	4,91	-0,61	0,54	54,32	5,54
140,00	4,94	-0,64	0,52	52,47	5,35
145,00	4,98	-0,68	0,51	50,72	5,17
150,00	5,01	-0,71	0,49	49,06	5,00
155,00	5,04	-0,74	0,47	47,48	4,84
160,00	5,08	-0,78	0,46	45,98	4,69
165,00	5,11	-0,81	0,45	44,54	4,54
170,00	5,14	-0,84	0,43	43,18	4,40
175,00	5,16	-0,87	0,42	41,87	4,27
180,00	5,19	-0,90	0,41	40,63	4,14
185,00	5,22	-0,93	0,39	39,43	4,02
190,00	5,25	-0,96	0,38	38,29	3,90
195,00	5,27	-0,99	0,37	37,19	3,79
200,00	5,30	-1,02	0,36	36,14	3,69
205,00	5,32	-1,05	0,35	35,13	3,58
210,00	5,35	-1,07	0,34	34,16	3,48
215,00	5,37	-1,10	0,33	33,23	3,39

APÉNDICE 3

220,00	5,39	-1,13	0,32	32,33	3,30
225,00	5,42	-1,16	0,31	31,46	3,21
230,00	5,44	-1,18	0,31	30,63	3,12
235,00	5,46	-1,21	0,30	29,82	3,04
240,00	5,48	-1,24	0,29	29,04	2,96
245,00	5,50	-1,26	0,28	28,29	2,89
250,00	5,52	-1,29	0,28	27,57	2,81
255,00	5,54	-1,31	0,27	26,87	2,74
260,00	5,56	-1,34	0,26	26,19	2,67
265,00	5,58	-1,37	0,26	25,54	2,60
270,00	5,60	-1,39	0,25	24,90	2,54
275,00	5,62	-1,42	0,24	24,29	2,48
280,00	5,63	-1,44	0,24	23,69	2,42
285,00	5,65	-1,46	0,23	23,12	2,36
290,00	5,67	-1,49	0,23	22,56	2,30
295,00	5,69	-1,51	0,22	22,02	2,25
300,00	5,70	-1,54	0,21	21,49	2,19

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE SUELO, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 6.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,83	6,23	622,54	63,48
10,00	2,30	1,44	4,23	422,62	43,10
15,00	2,71	1,21	3,35	334,84	34,14
20,00	3,00	1,04	2,83	282,61	28,82
25,00	3,22	0,90	2,47	246,94	25,18
30,00	3,40	0,79	2,21	220,55	22,49
35,00	3,56	0,69	2,00	199,99	20,39
40,00	3,69	0,61	1,83	183,36	18,70
45,00	3,81	0,53	1,70	169,54	17,29
50,00	3,91	0,46	1,58	157,81	16,09
55,00	4,01	0,39	1,48	147,69	15,06
60,00	4,09	0,33	1,39	138,84	14,16
65,00	4,17	0,27	1,31	131,00	13,36
70,00	4,25	0,22	1,24	124,01	12,65
75,00	4,32	0,16	1,18	117,70	12,00
80,00	4,38	0,11	1,12	111,99	11,42

APÉNDICE 3

85,00	4,44	0,07	1,07	106,78	10,89
90,00	4,50	0,02	1,02	102,00	10,40
95,00	4,55	-0,02	0,98	97,60	9,95
100,00	4,61	-0,07	0,94	93,52	9,54
105,00	4,65	-0,11	0,90	89,74	9,15
110,00	4,70	-0,15	0,86	86,21	8,79
115,00	4,74	-0,19	0,83	82,92	8,46
120,00	4,79	-0,23	0,80	79,83	8,14
125,00	4,83	-0,26	0,77	76,93	7,84
130,00	4,87	-0,30	0,74	74,20	7,57
135,00	4,91	-0,33	0,72	71,62	7,30
140,00	4,94	-0,37	0,69	69,18	7,05
145,00	4,98	-0,40	0,67	66,87	6,82
150,00	5,01	-0,44	0,65	64,68	6,60
155,00	5,04	-0,47	0,63	62,60	6,38
160,00	5,08	-0,50	0,61	60,62	6,18
165,00	5,11	-0,53	0,59	58,73	5,99
170,00	5,14	-0,56	0,57	56,93	5,81
175,00	5,16	-0,59	0,55	55,21	5,63
180,00	5,19	-0,62	0,54	53,57	5,46
185,00	5,22	-0,65	0,52	51,99	5,30
190,00	5,25	-0,68	0,50	50,49	5,15
195,00	5,27	-0,71	0,49	49,04	5,00
200,00	5,30	-0,74	0,48	47,65	4,86
205,00	5,32	-0,77	0,46	46,32	4,72
210,00	5,35	-0,80	0,45	45,04	4,59
215,00	5,37	-0,83	0,44	43,81	4,47
220,00	5,39	-0,85	0,43	42,62	4,35
225,00	5,42	-0,88	0,41	41,48	4,23
230,00	5,44	-0,91	0,40	40,38	4,12
235,00	5,46	-0,93	0,39	39,32	4,01
240,00	5,48	-0,96	0,38	38,29	3,90
245,00	5,50	-0,99	0,37	37,30	3,80
250,00	5,52	-1,01	0,36	36,35	3,71
255,00	5,54	-1,04	0,35	35,42	3,61
260,00	5,56	-1,06	0,35	34,53	3,52
265,00	5,58	-1,09	0,34	33,67	3,43
270,00	5,60	-1,11	0,33	32,83	3,35
275,00	5,62	-1,14	0,32	32,02	3,27

APÉNDICE 3

280,00	5,63	-1,16	0,31	31,24	3,19
285,00	5,65	-1,19	0,30	30,48	3,11
290,00	5,67	-1,21	0,30	29,74	3,03
295,00	5,69	-1,24	0,29	29,03	2,96
300,00	5,70	-1,26	0,28	28,34	2,89

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE SUELO, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 6.5					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	2,11	8,21	820,82	83,70
10,00	2,30	1,72	5,57	557,23	56,82
15,00	2,71	1,48	4,41	441,49	45,02
20,00	3,00	1,32	3,73	372,62	38,00
25,00	3,22	1,18	3,26	325,59	33,20
30,00	3,40	1,07	2,91	290,80	29,65
35,00	3,56	0,97	2,64	263,68	26,89
40,00	3,69	0,88	2,42	241,76	24,65
45,00	3,81	0,80	2,24	223,54	22,79
50,00	3,91	0,73	2,08	208,08	21,22
55,00	4,01	0,67	1,95	194,73	19,86
60,00	4,09	0,60	1,83	183,06	18,67
65,00	4,17	0,55	1,73	172,73	17,61
70,00	4,25	0,49	1,64	163,50	16,67
75,00	4,32	0,44	1,55	155,19	15,83
80,00	4,38	0,39	1,48	147,66	15,06
85,00	4,44	0,34	1,41	140,79	14,36
90,00	4,50	0,30	1,34	134,49	13,71
95,00	4,55	0,25	1,29	128,68	13,12
100,00	4,61	0,21	1,23	123,31	12,57
105,00	4,65	0,17	1,18	118,32	12,07
110,00	4,70	0,13	1,14	113,67	11,59
115,00	4,74	0,09	1,09	109,33	11,15
120,00	4,79	0,05	1,05	105,26	10,73
125,00	4,83	0,01	1,01	101,43	10,34
130,00	4,87	-0,02	0,98	97,83	9,98
135,00	4,91	-0,06	0,94	94,43	9,63
140,00	4,94	-0,09	0,91	91,21	9,30
145,00	4,98	-0,13	0,88	88,17	8,99

APÉNDICE 3

150,00	5,01	-0,16	0,85	85,28	8,70
155,00	5,04	-0,19	0,83	82,54	8,42
160,00	5,08	-0,22	0,80	79,93	8,15
165,00	5,11	-0,26	0,77	77,44	7,90
170,00	5,14	-0,29	0,75	75,06	7,65
175,00	5,16	-0,32	0,73	72,80	7,42
180,00	5,19	-0,35	0,71	70,63	7,20
185,00	5,22	-0,38	0,69	68,56	6,99
190,00	5,25	-0,41	0,67	66,57	6,79
195,00	5,27	-0,44	0,65	64,66	6,59
200,00	5,30	-0,46	0,63	62,83	6,41
205,00	5,32	-0,49	0,61	61,08	6,23
210,00	5,35	-0,52	0,59	59,39	6,06
215,00	5,37	-0,55	0,58	57,76	5,89
220,00	5,39	-0,58	0,56	56,20	5,73
225,00	5,42	-0,60	0,55	54,69	5,58
230,00	5,44	-0,63	0,53	53,24	5,43
235,00	5,46	-0,66	0,52	51,84	5,29
240,00	5,48	-0,68	0,50	50,49	5,15
245,00	5,50	-0,71	0,49	49,19	5,02
250,00	5,52	-0,74	0,48	47,93	4,89
255,00	5,54	-0,76	0,47	46,71	4,76
260,00	5,56	-0,79	0,46	45,53	4,64
265,00	5,58	-0,81	0,44	44,39	4,53
270,00	5,60	-0,84	0,43	43,29	4,41
275,00	5,62	-0,86	0,42	42,22	4,31
280,00	5,63	-0,89	0,41	41,19	4,20
285,00	5,65	-0,91	0,40	40,19	4,10
290,00	5,67	-0,94	0,39	39,22	4,00
295,00	5,69	-0,96	0,38	38,28	3,90
300,00	5,70	-0,98	0,37	37,37	3,81

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE SUELO, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 7.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	2,38	10,82	1082,25	110,36
10,00	2,30	1,99	7,35	734,71	74,92
15,00	2,71	1,76	5,82	582,10	59,36

APÉNDICE 3

20,00	3,00	1,59	4,91	491,30	50,10
25,00	3,22	1,46	4,29	429,29	43,78
30,00	3,40	1,34	3,83	383,42	39,10
35,00	3,56	1,25	3,48	347,67	35,45
40,00	3,69	1,16	3,19	318,76	32,50
45,00	3,81	1,08	2,95	294,74	30,06
50,00	3,91	1,01	2,74	274,35	27,98
55,00	4,01	0,94	2,57	256,76	26,18
60,00	4,09	0,88	2,41	241,36	24,61
65,00	4,17	0,82	2,28	227,74	23,22
70,00	4,25	0,77	2,16	215,58	21,98
75,00	4,32	0,72	2,05	204,63	20,87
80,00	4,38	0,67	1,95	194,69	19,85
85,00	4,44	0,62	1,86	185,63	18,93
90,00	4,50	0,57	1,77	177,32	18,08
95,00	4,55	0,53	1,70	169,67	17,30
100,00	4,61	0,49	1,63	162,58	16,58
105,00	4,65	0,44	1,56	156,01	15,91
110,00	4,70	0,40	1,50	149,88	15,28
115,00	4,74	0,37	1,44	144,15	14,70
120,00	4,79	0,33	1,39	138,78	14,15
125,00	4,83	0,29	1,34	133,74	13,64
130,00	4,87	0,25	1,29	128,99	13,15
135,00	4,91	0,22	1,25	124,50	12,70
140,00	4,94	0,18	1,20	120,27	12,26
145,00	4,98	0,15	1,16	116,25	11,85
150,00	5,01	0,12	1,12	112,44	11,47
155,00	5,04	0,08	1,09	108,83	11,10
160,00	5,08	0,05	1,05	105,38	10,75
165,00	5,11	0,02	1,02	102,10	10,41
170,00	5,14	-0,01	0,99	98,97	10,09
175,00	5,16	-0,04	0,96	95,98	9,79
180,00	5,19	-0,07	0,93	93,13	9,50
185,00	5,22	-0,10	0,90	90,39	9,22
190,00	5,25	-0,13	0,88	87,77	8,95
195,00	5,27	-0,16	0,85	85,26	8,69
200,00	5,30	-0,19	0,83	82,85	8,45
205,00	5,32	-0,22	0,81	80,53	8,21
210,00	5,35	-0,24	0,78	78,30	7,98

APÉNDICE 3

215,00	5,37	-0,27	0,76	76,16	7,77
220,00	5,39	-0,30	0,74	74,10	7,56
225,00	5,42	-0,33	0,72	72,11	7,35
230,00	5,44	-0,35	0,70	70,20	7,16
235,00	5,46	-0,38	0,68	68,35	6,97
240,00	5,48	-0,41	0,67	66,57	6,79
245,00	5,50	-0,43	0,65	64,85	6,61
250,00	5,52	-0,46	0,63	63,19	6,44
255,00	5,54	-0,48	0,62	61,58	6,28
260,00	5,56	-0,51	0,60	60,03	6,12
265,00	5,58	-0,54	0,59	58,53	5,97
270,00	5,60	-0,56	0,57	57,08	5,82
275,00	5,62	-0,59	0,56	55,67	5,68
280,00	5,63	-0,61	0,54	54,31	5,54
285,00	5,65	-0,64	0,53	52,99	5,40
290,00	5,67	-0,66	0,52	51,71	5,27
295,00	5,69	-0,68	0,50	50,47	5,15
300,00	5,70	-0,71	0,49	49,27	5,02

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE ROCA, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 5.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	0,95	2,58	258,22	26,33
10,00	2,30	0,56	1,75	175,30	17,88
15,00	2,71	0,33	1,39	138,89	14,16
20,00	3,00	0,16	1,17	117,22	11,95
25,00	3,22	0,02	1,02	102,43	10,44
30,00	3,40	-0,09	0,91	91,48	9,33
35,00	3,56	-0,19	0,83	82,95	8,46
40,00	3,69	-0,27	0,76	76,05	7,76
45,00	3,81	-0,35	0,70	70,32	7,17
50,00	3,91	-0,42	0,65	65,46	6,67
55,00	4,01	-0,49	0,61	61,26	6,25
60,00	4,09	-0,55	0,58	57,59	5,87
65,00	4,17	-0,61	0,54	54,34	5,54
70,00	4,25	-0,66	0,51	51,44	5,24
75,00	4,32	-0,72	0,49	48,82	4,98
80,00	4,38	-0,77	0,46	46,45	4,74

APÉNDICE 3

85,00	4,44	-0,81	0,44	44,29	4,52
90,00	4,50	-0,86	0,42	42,31	4,31
95,00	4,55	-0,90	0,40	40,48	4,13
100,00	4,61	-0,95	0,39	38,79	3,96
105,00	4,65	-0,99	0,37	37,22	3,80
110,00	4,70	-1,03	0,36	35,76	3,65
115,00	4,74	-1,07	0,34	34,39	3,51
120,00	4,79	-1,11	0,33	33,11	3,38
125,00	4,83	-1,14	0,32	31,91	3,25
130,00	4,87	-1,18	0,31	30,78	3,14
135,00	4,91	-1,21	0,30	29,71	3,03
140,00	4,94	-1,25	0,29	28,69	2,93
145,00	4,98	-1,28	0,28	27,74	2,83
150,00	5,01	-1,32	0,27	26,83	2,74
155,00	5,04	-1,35	0,26	25,97	2,65
160,00	5,08	-1,38	0,25	25,14	2,56
165,00	5,11	-1,41	0,24	24,36	2,48
170,00	5,14	-1,44	0,24	23,61	2,41
175,00	5,16	-1,47	0,23	22,90	2,34
180,00	5,19	-1,50	0,22	22,22	2,27
185,00	5,22	-1,53	0,22	21,57	2,20
190,00	5,25	-1,56	0,21	20,94	2,14
195,00	5,27	-1,59	0,20	20,34	2,07
200,00	5,30	-1,62	0,20	19,77	2,02
205,00	5,32	-1,65	0,19	19,21	1,96
210,00	5,35	-1,68	0,19	18,68	1,91
215,00	5,37	-1,71	0,18	18,17	1,85
220,00	5,39	-1,73	0,18	17,68	1,80
225,00	5,42	-1,76	0,17	17,21	1,75
230,00	5,44	-1,79	0,17	16,75	1,71
235,00	5,46	-1,81	0,16	16,31	1,66
240,00	5,48	-1,84	0,16	15,88	1,62
245,00	5,50	-1,87	0,15	15,47	1,58
250,00	5,52	-1,89	0,15	15,08	1,54
255,00	5,54	-1,92	0,15	14,69	1,50
260,00	5,56	-1,94	0,14	14,32	1,46
265,00	5,58	-1,97	0,14	13,97	1,42
270,00	5,60	-1,99	0,14	13,62	1,39
275,00	5,62	-2,02	0,13	13,28	1,35

APÉNDICE 3

280,00	5,63	-2,04	0,13	12,96	1,32
285,00	5,65	-2,07	0,13	12,64	1,29
290,00	5,67	-2,09	0,12	12,34	1,26
295,00	5,69	-2,12	0,12	12,04	1,23
300,00	5,70	-2,14	0,12	11,75	1,20

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE ROCA, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 5.5					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,23	3,40	340,46	34,72
10,00	2,30	0,84	2,31	231,13	23,57
15,00	2,71	0,60	1,83	183,12	18,67
20,00	3,00	0,44	1,55	154,56	15,76
25,00	3,22	0,30	1,35	135,05	13,77
30,00	3,40	0,19	1,21	120,62	12,30
35,00	3,56	0,09	1,09	109,37	11,15
40,00	3,69	0,00	1,00	100,28	10,23
45,00	3,81	-0,08	0,93	92,72	9,45
50,00	3,91	-0,15	0,86	86,31	8,80
55,00	4,01	-0,21	0,81	80,77	8,24
60,00	4,09	-0,28	0,76	75,93	7,74
65,00	4,17	-0,33	0,72	71,65	7,31
70,00	4,25	-0,39	0,68	67,82	6,92
75,00	4,32	-0,44	0,64	64,37	6,56
80,00	4,38	-0,49	0,61	61,25	6,25
85,00	4,44	-0,54	0,58	58,40	5,95
90,00	4,50	-0,58	0,56	55,78	5,69
95,00	4,55	-0,63	0,53	53,37	5,44
100,00	4,61	-0,67	0,51	51,15	5,22
105,00	4,65	-0,71	0,49	49,08	5,00
110,00	4,70	-0,75	0,47	47,15	4,81
115,00	4,74	-0,79	0,45	45,35	4,62
120,00	4,79	-0,83	0,44	43,66	4,45
125,00	4,83	-0,87	0,42	42,07	4,29
130,00	4,87	-0,90	0,41	40,58	4,14
135,00	4,91	-0,94	0,39	39,17	3,99
140,00	4,94	-0,97	0,38	37,83	3,86
145,00	4,98	-1,01	0,37	36,57	3,73

APÉNDICE 3

150,00	5,01	-1,04	0,35	35,37	3,61
155,00	5,04	-1,07	0,34	34,24	3,49
160,00	5,08	-1,10	0,33	33,15	3,38
165,00	5,11	-1,14	0,32	32,12	3,28
170,00	5,14	-1,17	0,31	31,14	3,17
175,00	5,16	-1,20	0,30	30,20	3,08
180,00	5,19	-1,23	0,29	29,30	2,99
185,00	5,22	-1,26	0,28	28,44	2,90
190,00	5,25	-1,29	0,28	27,61	2,82
195,00	5,27	-1,32	0,27	26,82	2,73
200,00	5,30	-1,34	0,26	26,06	2,66
205,00	5,32	-1,37	0,25	25,33	2,58
210,00	5,35	-1,40	0,25	24,63	2,51
215,00	5,37	-1,43	0,24	23,96	2,44
220,00	5,39	-1,46	0,23	23,31	2,38
225,00	5,42	-1,48	0,23	22,69	2,31
230,00	5,44	-1,51	0,22	22,08	2,25
235,00	5,46	-1,54	0,22	21,50	2,19
240,00	5,48	-1,56	0,21	20,94	2,14
245,00	5,50	-1,59	0,20	20,40	2,08
250,00	5,52	-1,62	0,20	19,88	2,03
255,00	5,54	-1,64	0,19	19,37	1,98
260,00	5,56	-1,67	0,19	18,89	1,93
265,00	5,58	-1,69	0,18	18,41	1,88
270,00	5,60	-1,72	0,18	17,96	1,83
275,00	5,62	-1,74	0,18	17,51	1,79
280,00	5,63	-1,77	0,17	17,08	1,74
285,00	5,65	-1,79	0,17	16,67	1,70
290,00	5,67	-1,82	0,16	16,27	1,66
295,00	5,69	-1,84	0,16	15,88	1,62
300,00	5,70	-1,86	0,15	15,50	1,58

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE ROCA, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 6.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,50	4,49	448,90	45,78
10,00	2,30	1,11	3,05	304,75	31,08
15,00	2,71	0,88	2,41	241,45	24,62

APÉNDICE 3

20,00	3,00	0,71	2,04	203,78	20,78
25,00	3,22	0,58	1,78	178,06	18,16
30,00	3,40	0,46	1,59	159,04	16,22
35,00	3,56	0,37	1,44	144,21	14,70
40,00	3,69	0,28	1,32	132,22	13,48
45,00	3,81	0,20	1,22	122,25	12,47
50,00	3,91	0,13	1,14	113,80	11,60
55,00	4,01	0,06	1,06	106,50	10,86
60,00	4,09	0,00	1,00	100,11	10,21
65,00	4,17	-0,06	0,94	94,46	9,63
70,00	4,25	-0,11	0,89	89,42	9,12
75,00	4,32	-0,16	0,85	84,87	8,65
80,00	4,38	-0,21	0,81	80,76	8,23
85,00	4,44	-0,26	0,77	77,00	7,85
90,00	4,50	-0,31	0,74	73,55	7,50
95,00	4,55	-0,35	0,70	70,38	7,18
100,00	4,61	-0,39	0,67	67,44	6,88
105,00	4,65	-0,44	0,65	64,71	6,60
110,00	4,70	-0,48	0,62	62,17	6,34
115,00	4,74	-0,51	0,60	59,79	6,10
120,00	4,79	-0,55	0,58	57,56	5,87
125,00	4,83	-0,59	0,55	55,47	5,66
130,00	4,87	-0,63	0,54	53,50	5,46
135,00	4,91	-0,66	0,52	51,64	5,27
140,00	4,94	-0,70	0,50	49,88	5,09
145,00	4,98	-0,73	0,48	48,22	4,92
150,00	5,01	-0,76	0,47	46,64	4,76
155,00	5,04	-0,80	0,45	45,14	4,60
160,00	5,08	-0,83	0,44	43,71	4,46
165,00	5,11	-0,86	0,42	42,35	4,32
170,00	5,14	-0,89	0,41	41,05	4,19
175,00	5,16	-0,92	0,40	39,81	4,06
180,00	5,19	-0,95	0,39	38,63	3,94
185,00	5,22	-0,98	0,37	37,49	3,82
190,00	5,25	-1,01	0,36	36,41	3,71
195,00	5,27	-1,04	0,35	35,36	3,61
200,00	5,30	-1,07	0,34	34,36	3,50
205,00	5,32	-1,10	0,33	33,40	3,41
210,00	5,35	-1,12	0,32	32,48	3,31

APÉNDICE 3

215,00	5,37	-1,15	0,32	31,59	3,22
220,00	5,39	-1,18	0,31	30,73	3,13
225,00	5,42	-1,21	0,30	29,91	3,05
230,00	5,44	-1,23	0,29	29,12	2,97
235,00	5,46	-1,26	0,28	28,35	2,89
240,00	5,48	-1,29	0,28	27,61	2,82
245,00	5,50	-1,31	0,27	26,90	2,74
250,00	5,52	-1,34	0,26	26,21	2,67
255,00	5,54	-1,36	0,26	25,54	2,60
260,00	5,56	-1,39	0,25	24,90	2,54
265,00	5,58	-1,42	0,24	24,28	2,48
270,00	5,60	-1,44	0,24	23,67	2,41
275,00	5,62	-1,47	0,23	23,09	2,35
280,00	5,63	-1,49	0,23	22,53	2,30
285,00	5,65	-1,52	0,22	21,98	2,24
290,00	5,67	-1,54	0,21	21,45	2,19
295,00	5,69	-1,56	0,21	20,93	2,13
300,00	5,70	-1,59	0,20	20,43	2,08

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE ROCA, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 6.5					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	1,78	5,92	591,88	60,35
10,00	2,30	1,39	4,02	401,81	40,97
15,00	2,71	1,16	3,18	318,35	32,46
20,00	3,00	0,99	2,69	268,69	27,40
25,00	3,22	0,85	2,35	234,78	23,94
30,00	3,40	0,74	2,10	209,69	21,38
35,00	3,56	0,64	1,90	190,14	19,39
40,00	3,69	0,56	1,74	174,33	17,78
45,00	3,81	0,48	1,61	161,19	16,44
50,00	3,91	0,41	1,50	150,04	15,30
55,00	4,01	0,34	1,40	140,42	14,32
60,00	4,09	0,28	1,32	132,00	13,46
65,00	4,17	0,22	1,25	124,55	12,70
70,00	4,25	0,16	1,18	117,90	12,02
75,00	4,32	0,11	1,12	111,91	11,41
80,00	4,38	0,06	1,06	106,48	10,86

APÉNDICE 3

85,00	4,44	0,02	1,02	101,52	10,35
90,00	4,50	-0,03	0,97	96,98	9,89
95,00	4,55	-0,07	0,93	92,79	9,46
100,00	4,61	-0,12	0,89	88,92	9,07
105,00	4,65	-0,16	0,85	85,32	8,70
110,00	4,70	-0,20	0,82	81,97	8,36
115,00	4,74	-0,24	0,79	78,83	8,04
120,00	4,79	-0,28	0,76	75,90	7,74
125,00	4,83	-0,31	0,73	73,14	7,46
130,00	4,87	-0,35	0,71	70,54	7,19
135,00	4,91	-0,38	0,68	68,09	6,94
140,00	4,94	-0,42	0,66	65,77	6,71
145,00	4,98	-0,45	0,64	63,58	6,48
150,00	5,01	-0,49	0,61	61,50	6,27
155,00	5,04	-0,52	0,60	59,52	6,07
160,00	5,08	-0,55	0,58	57,63	5,88
165,00	5,11	-0,58	0,56	55,84	5,69
170,00	5,14	-0,61	0,54	54,13	5,52
175,00	5,16	-0,64	0,52	52,49	5,35
180,00	5,19	-0,67	0,51	50,93	5,19
185,00	5,22	-0,70	0,49	49,43	5,04
190,00	5,25	-0,73	0,48	48,00	4,89
195,00	5,27	-0,76	0,47	46,63	4,75
200,00	5,30	-0,79	0,45	45,31	4,62
205,00	5,32	-0,82	0,44	44,04	4,49
210,00	5,35	-0,85	0,43	42,82	4,37
215,00	5,37	-0,88	0,42	41,65	4,25
220,00	5,39	-0,90	0,41	40,52	4,13
225,00	5,42	-0,93	0,39	39,44	4,02
230,00	5,44	-0,96	0,38	38,39	3,91
235,00	5,46	-0,98	0,37	37,38	3,81
240,00	5,48	-1,01	0,36	36,41	3,71
245,00	5,50	-1,04	0,35	35,47	3,62
250,00	5,52	-1,06	0,35	34,56	3,52
255,00	5,54	-1,09	0,34	33,68	3,43
260,00	5,56	-1,11	0,33	32,83	3,35
265,00	5,58	-1,14	0,32	32,01	3,26
270,00	5,60	-1,16	0,31	31,22	3,18
275,00	5,62	-1,19	0,30	30,45	3,10

APÉNDICE 3

280,00	5,63	-1,21	0,30	29,70	3,03
285,00	5,65	-1,24	0,29	28,98	2,96
290,00	5,67	-1,26	0,28	28,28	2,88
295,00	5,69	-1,29	0,28	27,60	2,81
300,00	5,70	-1,31	0,27	26,94	2,75

Fuente: Microsoft office; Excel 2013.

ACELERACIÓN HORIZONTAL MÁXIMA PARA LA CONDICIÓN DE ROCA, CONSIDERANDO UN SISMO DE Mw = 7.0					
R (km)	ln(R)	ln(PGA)	PGA (m/s²)	PGA (cm/s²)	PGA (%g)
5,00	1,61	2,05	7,80	780,40	79,58
10,00	2,30	1,67	5,30	529,79	54,02
15,00	2,71	1,43	4,20	419,74	42,80
20,00	3,00	1,26	3,54	354,27	36,13
25,00	3,22	1,13	3,10	309,55	31,57
30,00	3,40	1,02	2,76	276,48	28,19
35,00	3,56	0,92	2,51	250,70	25,56
40,00	3,69	0,83	2,30	229,85	23,44
45,00	3,81	0,75	2,13	212,53	21,67
50,00	3,91	0,68	1,98	197,83	20,17
55,00	4,01	0,62	1,85	185,14	18,88
60,00	4,09	0,55	1,74	174,04	17,75
65,00	4,17	0,50	1,64	164,22	16,75
70,00	4,25	0,44	1,55	155,45	15,85
75,00	4,32	0,39	1,48	147,55	15,05
80,00	4,38	0,34	1,40	140,39	14,32
85,00	4,44	0,29	1,34	133,86	13,65
90,00	4,50	0,25	1,28	127,86	13,04
95,00	4,55	0,20	1,22	122,34	12,48
100,00	4,61	0,16	1,17	117,24	11,95
105,00	4,65	0,12	1,12	112,49	11,47
110,00	4,70	0,08	1,08	108,07	11,02
115,00	4,74	0,04	1,04	103,94	10,60
120,00	4,79	0,00	1,00	100,07	10,20
125,00	4,83	-0,04	0,96	96,43	9,83
130,00	4,87	-0,07	0,93	93,01	9,48
135,00	4,91	-0,11	0,90	89,78	9,15
140,00	4,94	-0,14	0,87	86,72	8,84
145,00	4,98	-0,18	0,84	83,83	8,55

APÉNDICE 3

150,00	5,01	-0,21	0,81	81,08	8,27
155,00	5,04	-0,24	0,78	78,47	8,00
160,00	5,08	-0,27	0,76	75,99	7,75
165,00	5,11	-0,31	0,74	73,62	7,51
170,00	5,14	-0,34	0,71	71,37	7,28
175,00	5,16	-0,37	0,69	69,21	7,06
180,00	5,19	-0,40	0,67	67,15	6,85
185,00	5,22	-0,43	0,65	65,18	6,65
190,00	5,25	-0,46	0,63	63,29	6,45
195,00	5,27	-0,49	0,61	61,48	6,27
200,00	5,30	-0,52	0,60	59,74	6,09
205,00	5,32	-0,54	0,58	58,07	5,92
210,00	5,35	-0,57	0,56	56,46	5,76
215,00	5,37	-0,60	0,55	54,92	5,60
220,00	5,39	-0,63	0,53	53,43	5,45
225,00	5,42	-0,65	0,52	52,00	5,30
230,00	5,44	-0,68	0,51	50,62	5,16
235,00	5,46	-0,71	0,49	49,29	5,03
240,00	5,48	-0,73	0,48	48,00	4,89
245,00	5,50	-0,76	0,47	46,76	4,77
250,00	5,52	-0,79	0,46	45,57	4,65
255,00	5,54	-0,81	0,44	44,41	4,53
260,00	5,56	-0,84	0,43	43,29	4,41
265,00	5,58	-0,86	0,42	42,21	4,30
270,00	5,60	-0,89	0,41	41,16	4,20
275,00	5,62	-0,91	0,40	40,14	4,09
280,00	5,63	-0,94	0,39	39,16	3,99
285,00	5,65	-0,96	0,38	38,21	3,90
290,00	5,67	-0,99	0,37	37,29	3,80
295,00	5,69	-1,01	0,36	36,39	3,71
300,00	5,70	-1,03	0,36	35,53	3,62

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

APÉNDICE 4

Formulario de inspección para determinar la vulnerabilidad sísmica					
Motivo de inspección:	Estudio de vulnerabilidad sísmica en Pérez Zeledón			Código de formulario:	F001
Inspector encargado:	Freddie Vargas Mena			Fecha de inspección:	13/05/16
Ubicación general de la edificación					
Provincia	Cantón	Distrito	Frente (m)	Fondo (m)	Área basal (m ²)
San José	Pérez Zeledón	San Isidro de El General	5.5	8.0	44.0
Ubicación específica de la edificación					
Coordenadas de lectura GPS	N	9.3817583	Coordenadas CRTM05	Y	1037383.561
	W	83.7053316		X	532363.354
Caracterización y consideraciones básicas sobre la estructura					
			Tipo de suelo		
			S1		
			S2	X	
			S3		
			S4		
			Uso de la estructura		
			Vivienda individual	X	
			Vivienda colectiva		
			Comercial		
			Oficinas		
Almacenamiento					
Lugar de reunión					
Otros:					
Caracterización cualitativa de la estructura					
Tipo de sistema estructural		Clasificación según ERN-CAPRA T2-5		Tipo de diafragma	
Tugurio		Tipo:	W-SLFLB-1	Rígido	
Adobe		Descripción:		Flexible	X
Pórticos de concreto resistentes a momento		Muros en madera - Sin diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1 piso.		Sin diafragma	
Mampostería confinada				Miembros no sismo-resistentes	
Muros de madera	X			Tanques elevados	
Mampostería simple				Balcones	
Mampostería reforzada				Parapetos	
Muros de concreto prefabricado				Escaleras externas	

APÉNDICE 4

Otros:			Otros:
Evaluación general sobre el estado de la estructura al momento de la inspección			
Tipo de cubierta		Estado de conservación	
Losa de concreto		Excelente	
Liviana (lámina de zinc)	X	Bueno	
Pesada (teja de barro)		Regular	X
Otros:		Pobre	
Consideraciones finales y reglamentación vigente al momento de construcción de la edificación			
Observaciones adicionales		Código sísmico vigente	
Vivienda esquinera con portón de acero, elevada dos metros con respecto al nivel de calle.		Previo a 1974	X
		Período entre 1974 y 2001	
		Después de 2002	
		Regularidad de la estructura	
		Número de plantas	
		Regularidad	

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

APÉNDICE 4

Formulario de inspección para determinar la vulnerabilidad sísmica							
Motivo de inspección:	Estudio de vulnerabilidad sísmica en Pérez Zeledón	Código de formulario:	F003				
Inspector encargado:	Freddie Vargas Mena	Fecha de inspección:	13/05/16				
Ubicación general de la edificación							
Provincia	Cantón	Distrito	Frente (m)	Fondo (m)	Área basal (m ²)		
San José	Pérez Zeledón	San Isidro de El General	8.0	11.0	88.0		
Ubicación específica de la edificación							
Coordenadas de lectura GPS	N	9.3815016	Coordenadas CRTM05	Y	1037355.215		
	W	83.7048616		X	532414.998		
Caracterización y consideraciones básicas sobre la estructura							
			Tipo de suelo				
			S1				
			S2	X			
			S3				
			S4				
			Uso de la estructura				
			Vivienda individual				
			Vivienda colectiva				
			Comercial				
			Oficinas	X			
			Almacenamiento				
			Lugar de reunión				
			Otros:				
Caracterización cualitativa de la estructura							
Tipo de sistema estructural		Clasificación según ERN-CAPRA T2-5		Tipo de diafragma			
Tugurio		Tipo:	MR-FLFSB-2		Rígido		
Adobe		Descripción:			Flexible	X	
Pórticos de concreto resistentes a momento		Mampostería Reforzada - Diafragma flexible, Cubierta Ligera, Fachada frágil sin dilatar, Bajos - 2 pisos.		Sin diafragma			
Mampostería confinada				Miembros no sismo-resistentes			
Muros de madera				Tanques elevados			
Mampostería simple				Balcones			
Mampostería reforzada				Parapetos			
Muros de concreto prefabricado				X	Escaleras externas		

APÉNDICE 4

Otros:			Otros:
Evaluación general sobre el estado de la estructura al momento de la inspección			
Tipo de cubierta		Estado de conservación	
Losa de concreto		Excelente	
Liviana (lámina de zinc)	X	Bueno	
Pesada (teja de barro)		Regular	X
Otros:		Pobre	
Consideraciones finales y reglamentación vigente al momento de construcción de la edificación			
Observaciones adicionales		Código sísmico vigente	
<p>Territorio con diferencia importante de altura, la edificación fue nivelada a través de la construcción de una bodega pequeña, con lo cual, sobre dicha bodega, se construyó el piso de la edificación principal.</p> <p>La bodega es pequeña y una persona entra con dificultad, realmente solo es un espacio en el que se almacenan algunos ítems como alfombras, cuerdas y demás.</p>		Previo a 1974	
		Período entre 1974 y 2001	
		Después de 2002	X
		Regularidad de la estructura	
		Número de plantas	1
		Regularidad	Regular

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

APÉNDICE 5

DATOS DE LAS EDIFICACIONES EVALUADAS EN EL CENTRO URBANO DE PÉREZ ZELEDÓN								
Lote	ID	Coordenadas CRTM05		Edad	Tipo constructivo	Estado de conservación	Plantas	Regularidad
		X	Y					
LOTE 123	F001	532363,354	1037383,561	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F002	532390,268	1037380,364	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F003	532427,060	1037374,948	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F004	532517,772	1037362,186	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F005	532580,891	1037351,839	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F006	532525,360	1037402,541	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F007	532490,869	1037410,819	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F008	532457,240	1037416,337	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F009	532419,645	1037423,235	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F010	532389,120	1037427,547	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 174	F011	532582,616	1037419,786	Después de 2002	Mampostería confinada	Excelente	2	Regular
	F012	532581,926	1037460,141	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F013	532548,814	1037429,444	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F014	532548,125	1037458,072	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Regular	1	Regular
	F015	532548,814	1037474,283	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 173	F016	532602,793	1037426,167	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F017	532602,621	1037384,605	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F018	532602,966	1037355,029	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	2	Regular
	F019	532637,543	1037319,330	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F020	532676,174	1037347,613	Previo a 1974	Tugurio	Pobre	1	Regular
	F021	532672,724	1037383,829	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular

APÉNDICE 5

	F022	532667,896	1037418,320	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F023	532664,446	1037460,400	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F024	532664,102	1037510,067	Después de 2002	Muros de madera	Bueno	2	Regular
	F025	532672,035	1037556,975	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 242	F026	532695,489	1037332,265	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F027	532694,109	1037313,294	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	2	Regular
	F028	532751,365	1037047,711	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F029	532720,322	1037087,721	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F030	532697,558	1037133,250	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F031	532676,863	1037209,821	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F032	532681,002	1037229,826	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F033	532688,245	1037250,348	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Regular	1	Regular
	F034	532696,696	1037276,906	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F035	532706,698	1037300,015	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 22	F036	532488,713	1036802,910	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Regular	2	Regular
	F037	532514,927	1036792,907	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F038	532543,899	1036780,490	Entre 1974 y 2001	Mampostería simple	Regular	1	Regular
	F039	532499,061	1036718,751	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F040	532460,086	1036733,582	Previo a 1974	Pórticos de concreto	Regular	2	Regular
LOTE 1	F041	532424,904	1036623,900	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F042	532452,497	1036613,207	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F043	532468,019	1036607,344	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F044	532403,520	1036594,927	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	2	Regular
	F045	532391,793	1036564,230	Después de 2002	Pórticos de concreto	Excelente	1	Regular

APÉNDICE 5

LOTE 3	F046	532417,489	1036498,869	Después de 2002	Pórticos de concreto	Excelente	2	Regular
	F047	532437,839	1036524,392	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F048	532462,672	1036513,355	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F049	532473,710	1036509,216	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F050	532499,233	1036497,834	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F051	532538,898	1036454,720	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F052	532529,241	1036434,025	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F053	532473,710	1036425,747	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F054	532457,844	1036431,956	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F055	532401,278	1036457,479	Después de 2002	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
LOTE 42	F056	532301,943	1036013,576	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F057	532284,697	1035959,770	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F058	532275,040	1035924,589	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F059	532260,898	1035879,750	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F060	532250,896	1035846,293	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Regular	2	Regular
	F061	532238,134	1035800,075	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F062	532284,697	1035763,514	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F063	532325,397	1035822,149	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F064	532346,092	1035895,961	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F065	532368,166	1035974,601	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
LOTE 194	F066	531890,117	1036971,744	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
	F067	531849,417	1036970,365	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F068	531815,271	1036968,640	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F069	531798,370	1036967,605	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F070	531785,263	1036966,916	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F071	531776,813	1036965,881	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F072	531768,880	1036961,742	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F073	531757,325	1036952,084	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F074	531743,529	1036944,496	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F075	531721,282	1036982,954	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
LOTE 221	F076	532027,392	1037064,181	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F077	532016,700	1037091,429	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F078	532007,387	1037125,921	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F079	532001,524	1037160,067	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F080	531995,143	1037188,177	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F081	531989,279	1037215,598	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F082	532059,987	103709,540	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F083	532049,639	1037135,406	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F084	532037,912	1037223,703	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F085	532034,463	1037263,713	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
LOTE 225	F086	531750,944	1036544,915	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F087	531730,250	1036583,545	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F088	531698,863	1036556,297	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F089	531708,520	1036535,947	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F090	531725,076	1036504,560	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 112	F091	531712,314	1036257,602	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F092	531687,136	1036269,329	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F093	531665,061	1036279,332	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F094	531659,543	1036206,210	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F095	531633,674	1036217,247	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 41	F096	532239,341	1036490,418	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F097	532230,718	1036471,103	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F098	532219,336	1036446,959	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F099	532210,713	1036427,299	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F100	532173,463	1036475,932	Después de 2002	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
LOTE 120	F101	532063,608	1036465,412	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
	F102	532054,813	1036473,518	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F103	532026,961	1036450,840	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F104	531995,574	1036397,895	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F105	532010,578	1036390,825	Después de 2002	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 50	F106	532049,833	1036051,301	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F107	532064,664	1036085,103	Previo a 1974	Pórticos de concreto	Regular	2	Regular
	F108	532078,461	1036111,316	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F109	532037,071	1036107,867	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F110	532011,548	1036059,579	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
LOTE 51	F111	532010,513	1036018,534	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	2	Regular
	F112	531986,714	1036016,465	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F113	531974,556	1035990,251	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F114	532001,545	1035953,001	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F115	532026,379	1036000,599	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	2	Regular
LOTE 78	F116	532226,946	1035761,919	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F117	532221,772	1035746,053	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F118	532215,564	1035727,773	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F119	532207,286	1035698,800	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F120	532210,045	1035655,686	Después de 2002	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F121	532187,281	1035548,418	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F122	532259,713	1035602,224	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F123	532267,991	1035633,267	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F124	532276,613	1035656,721	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F125	532282,822	1035686,728	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 106	F126	532179,348	1035680,520	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F127	532145,546	1035693,626	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F128	532108,296	1035713,631	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F129	532071,735	1035733,636	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	2	Regular
	F130	532011,030	1035743,984	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F131	531970,331	1035688,108	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F132	532143,477	1035580,495	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F133	532032,415	1035657,066	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F134	531934,460	1035651,547	Después de 2002	Mampostería reforzada	Regular	2	Regular
	F135	531895,140	1035681,209	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 75	F136	532826,577	1036485,891	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	2	Regular
	F137	532847,617	1036478,303	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F138	532802,088	1036492,962	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F139	532763,975	1036557,116	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F140	532750,524	1036579,018	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F141	532774,323	1036675,421	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F142	532767,425	1036710,602	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F143	532805,365	1036696,116	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F144	532833,648	1036644,379	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F145	532858,482	1036616,096	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	2	Regular
LOTE 55	F146	532900,906	1036340,855	Después de 2002	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F147	532910,563	1036353,272	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F148	532921,946	1036367,414	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F149	532990,583	1036343,270	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F150	532981,271	1036322,575	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
LOTE 110	F151	532947,814	1036151,153	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	2	Regular
	F152	532986,444	1036084,930	Después de 2002	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F153	532987,134	1036030,434	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	2	Regular
	F154	532972,648	1035990,424	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F155	532959,541	1035946,275	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F156	532942,295	1035895,918	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F157	532925,050	1035847,630	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F158	532910,563	1035809,000	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F159	532896,077	1035762,781	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F160	532845,720	1035777,268	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F161	532869,174	1035851,769	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F162	532889,869	1035900,057	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F163	532831,233	1035999,737	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F164	532792,603	1035956,622	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F165	532773,288	1035927,650	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular

APÉNDICE 5

LOTE 102	F166	532848,134	1035868,325	Después de 2002	Muros de madera	Excelente	2	Regular
	F167	532830,199	1035855,908	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F168	532807,434	1035862,116	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F169	532787,085	1035869,015	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F170	532858,827	1035893,503	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F171	532835,717	1035974,558	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F172	532822,611	1035960,416	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F173	532806,745	1035940,756	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F174	532865,035	1035994,908	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F175	532880,211	1035992,493	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
LOTE 129	F176	532693,268	1035603,087	Después de 2002	Prefabricado	Regular	1	Regular
	F177	532713,618	1035593,429	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F178	532749,489	1035644,476	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F179	532722,931	1035656,203	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
	F180	532676,023	1035632,404	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
LOTE 256	F181	533075,432	1037405,257	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F182	533105,784	1037402,498	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F183	533137,516	1037401,118	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F184	533168,558	1037399,048	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F185	533200,980	1037398,359	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F186	533062,325	1037440,438	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
	F187	533043,700	1037477,689	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Pobre	1	Regular
	F188	533103,025	1037527,356	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F189	533109,923	1037496,314	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F190	533114,062	1037469,411	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 307	F191	533216,156	1037568,401	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Regular	2	Regular
	F192	533249,268	1037576,679	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F193	533283,069	1037585,301	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F194	533313,422	1037592,890	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F195	533334,634	1037598,753	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F196	533249,440	1037456,821	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F197	533281,172	1037471,308	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F198	533310,835	1037485,794	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F199	533340,497	1037498,901	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F200	533363,262	1037512,007	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	LOTE 262	F201	533245,301	1037121,911	Previo a 1974	Tugurio	Pobre	1
F202		533289,105	1037113,633	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
F203		533325,666	1037108,114	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
F204		533367,401	1037100,871	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
F205		533397,408	1037095,698	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Pobre	1	Regular
F206		533428,795	1037090,179	Después de 2002	Muros de madera	Bueno	1	Regular
F207		533538,822	1037073,968	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
F208		533275,654	1037088,109	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
F209		533329,460	1037079,142	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
F210		533372,229	1037072,243	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Pobre	1	Regular
LOTE 261	F211	533483,291	1037037,752	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F212	533444,661	1037041,891	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F213	533407,411	1037046,720	Después de 2002	Muros de madera	Excelente	1	Regular

APÉNDICE 5

	F214	533365,331	1037052,238	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F215	533317,733	1037059,137	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F216	533276,344	1037064,655	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F217	533227,366	1037069,484	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F218	533245,991	1037037,062	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F219	533288,071	1037030,854	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F220	533326,701	1037026,025	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 247	F221	533110,441	1036327,231	Después de 2002	Muros de madera	Excelente	1	Regular
	F222	533124,927	1036322,748	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F223	533140,103	1036317,919	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F224	533158,383	1036312,745	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F225	533112,510	1036364,137	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F226	533126,134	1036410,355	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F227	533140,793	1036465,542	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F228	533225,641	1036677,663	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
	F229	533248,061	1036668,005	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F230	533209,086	1036518,658	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 140	F231	533257,718	1036560,393	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Regular	1	Regular
	F232	533273,584	1036557,978	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F233	533302,902	1036552,460	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F234	533259,443	1036524,867	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F235	533328,081	1036511,760	Después de 2002	Prefabricado	Regular	1	Regular
LOTE 130	F236	533132,860	1036292,740	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
	F237	533119,063	1036263,078	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	2	Regular

APÉNDICE 5

	F238	533110,785	1036247,212	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F239	533099,058	1036223,068	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F240	533088,711	1036199,614	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F241	533109,406	1036178,229	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	2	Regular
	F242	533123,202	1036158,224	Después de 2002	Pórticos de concreto	Bueno	2	Regular
	F243	533179,078	1036252,040	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F244	533165,972	1036224,447	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F245	533153,555	1036198,924	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 259	F246	533651,609	1036581,087	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F247	533642,296	1036563,842	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F248	533635,053	1036547,631	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F249	533666,095	1036524,177	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F250	533737,837	1036494,169	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F251	533738,182	1036532,800	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F252	533745,080	1036517,968	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F253	533781,641	1036500,378	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F254	533833,378	1036497,963	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F255	533857,867	1036488,996	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
LOTE 230	F256	533326,701	1035724,324	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F257	533351,535	1035709,837	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F258	533319,803	1035757,435	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F259	533352,225	1035773,301	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F260	533368,091	1035796,065	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F261	533377,748	1035815,381	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F262	533390,855	1035842,284	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F263	533384,301	1035866,773	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F264	533370,160	1035872,981	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F265	533413,964	1035884,191	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
LOTE 11	F266	533297,038	1035752,261	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F267	533312,904	1035779,165	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F268	533352,569	1035801,239	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F269	533358,778	1035815,725	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F270	533367,401	1035832,971	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F271	533370,332	1035861,082	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F272	533354,639	1035868,152	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F273	533339,118	1035911,439	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F274	533307,386	1035921,441	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F275	533290,658	1035970,936	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F276	533279,793	1035979,214	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F277	533164,937	1036033,193	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F278	533152,865	1036009,049	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F279	533138,378	1035977,317	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F280	533128,031	1035951,794	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	LOTE 231	F281	533299,280	1035982,491	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Excelente	1
F282		533266,859	1036005,255	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
F283		533253,752	1036014,223	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
F284		533269,618	1036040,436	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
F285		533286,174	1036063,890	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F286	533303,419	1036089,414	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F287	533366,193	1036181,851	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F288	533385,509	1036155,637	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F289	533376,541	1036130,114	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F290	533362,744	1036090,794	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 280	F291	533621,257	1035429,595	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F292	533607,633	1035418,213	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F293	533598,665	1035410,625	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F294	533585,213	1035399,588	Entre 1974 y 2001	Pórticos de concreto	Bueno	1	Regular
	F295	533574,521	1035390,965	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F296	533539,340	1035359,578	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F297	533547,618	1035336,469	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
	F298	533576,245	1035323,707	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F299	533605,908	1035310,600	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F300	533659,714	1035286,801	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F301	533689,722	1035191,261	Previo a 1974	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F302	533710,762	1035181,258	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F303	533730,767	1035172,290	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F304	533748,357	1035164,357	Después de 2002	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
	F305	533772,501	1035153,320	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
LOTE 138	F306	533816,132	1035137,799	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F307	533840,276	1035126,072	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F308	533854,418	1035119,174	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F309	533883,390	1035132,280	Previo a 1974	Muros de madera	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F310	533888,909	1035144,352	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F311	533903,051	1035168,841	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F312	533916,502	1035197,814	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F313	533843,036	1035217,819	Entre 1974 y 2001	Mampostería confinada	Bueno	1	Regular
	F314	533855,280	1035240,411	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F315	533859,591	1035248,171	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 189	F316	533873,216	1035061,918	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F317	533879,079	1035026,392	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F318	533897,015	1035018,459	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F319	533954,270	1035045,017	Previo a 1974	Muros de madera	Regular	1	Regular
	F320	533939,094	1035001,213	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Regular	1	Regular
LOTE 286	F321	533965,997	1035304,737	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F322	533977,379	1035327,846	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F323	533993,245	1035364,407	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F324	534027,047	1035439,253	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F325	534033,945	1035455,464	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F326	533935,817	1035564,801	Previo a 1974	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F327	533904,775	1035593,774	Previo a 1974	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F328	533885,632	1035609,123	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F329	533866,317	1035625,678	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F330	533820,444	1035627,748	Previo a 1974	Mampostería reforzada	Regular	1	Regular
	F331	533825,273	1035604,294	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F332	533842,518	1035594,291	Entre 1974 y 2001	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F333	533848,382	1035553,937	Después de 2002	Prefabricado	Excelente	1	Regular

APÉNDICE 5

	F334	533828,377	1035512,202	Después de 2002	Mampostería confinada	Pobre	1	Regular
	F335	533774,226	1035430,889	Después de 2002	Muros de madera	Excelente	1	Regular
	F336	533874,164	1035434,079	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F337	533906,586	1035452,015	Previo a 1974	Muros de madera	Pobre	1	Regular
	F338	533947,975	1035403,727	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F339	533964,531	1035433,734	Después de 2002	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F340	533977,983	1035458,568	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 228	F341	534134,228	1035556,868	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F342	534153,199	1035543,762	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F343	534168,720	1035533,069	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	2	Regular
	F344	534186,310	1035520,652	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F345	534136,988	1035603,776	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F346	534141,817	1035615,848	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F347	534156,993	1035646,546	Entre 1974 y 2001	Muros de madera	Bueno	1	Regular
	F348	534192,174	1035658,273	Después de 2002	Muros de madera	Excelente	1	Regular
	F349	534202,176	1035653,099	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F350	534230,804	1035636,543	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 182	F351	534194,933	1034958,444	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F352	534188,035	1034918,434	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F353	534217,008	1034898,429	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F354	534243,221	1034968,792	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F355	534252,189	1034918,434	Previo a 1974	Muros de madera	Bueno	1	Regular
LOTE 275	F356	534092,839	1034361,055	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F357	534128,020	1034354,847	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular

APÉNDICE 5

	F358	534058,003	1034408,653	Entre 1974 y 2001	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F359	534064,211	1034423,139	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F360	534070,420	1034437,281	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 278	F361	534163,546	1034243,440	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F362	534137,333	1034267,584	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F363	534142,161	1034285,519	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F364	534147,680	1034305,179	Entre 1974 y 2001	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F365	534225,975	1034300,695	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
LOTE 297	F366	534253,223	1033943,710	Después de 2002	Prefabricado	Bueno	1	Regular
	F367	534257,190	1033956,127	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	2	Regular
	F368	534265,468	1033983,548	Después de 2002	Prefabricado	Excelente	1	Regular
	F369	534280,299	1034030,456	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F370	534296,510	1034075,295	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
LOTE 296	F371	534337,210	1034338,808	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F372	534329,622	1034310,525	Después de 2002	Mampostería reforzada	Bueno	1	Regular
	F373	534372,391	1034350,535	Después de 2002	Prefabricado	Excelente	1	Regular
	F374	534379,979	1034381,577	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular
	F375	534351,006	1034390,545	Después de 2002	Mampostería reforzada	Excelente	1	Regular

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

APÉNDICE 6

ÍNDICES DE VULNERABILIDAD PARA LOTES INSPECCIONADOS		
ID	Lote inspeccionado	IVF
1	LOTE 123	0,18480
2	LOTE 174	0,16016
3	LOTE 173	0,26400
4	LOTE 242	0,28710
5	LOTE 22	0,23400
6	LOTE 1	0,27000
7	LOTE 3	0,17940
8	LOTE 42	0,20280
9	LOTE 194	0,26880
10	LOTE 221	0,17820
11	LOTE 225	0,17160
12	LOTE 112	0,08400
13	LOTE 41	0,20384
14	LOTE 120	0,17280
15	LOTE 50	0,19712
16	LOTE 51	0,15600
17	LOTE 78	0,16240
18	LOTE 106	0,18630
19	LOTE 75	0,20160
20	LOTE 55	0,26880
21	LOTE 110	0,20227

22	LOTE 102	0,12960
23	LOTE 129	0,49680
24	LOTE 256	0,20160
25	LOTE 307	0,13920
26	LOTE 262	0,29696
27	LOTE 261	0,21000
28	LOTE 247	0,15660
29	LOTE 140	0,25200
30	LOTE 130	0,15444
31	LOTE 259	0,14250
32	LOTE 230	0,15960
33	LOTE 11	0,13173
34	LOTE 231	0,28594
35	LOTE 280	0,19040
36	LOTE 138	0,22475
37	LOTE 189	0,23400
38	LOTE 286	0,21388
39	LOTE 228	0,12240
40	LOTE 182	0,16800
41	LOTE 275	0,15120
42	LOTE 278	0,07920
43	LOTE 297	0,08400
44	LOTE 296	0,07200

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

Anexos

Anexo 1: glosario de términos de sismología

Anexo 2: fórmulas de conversión y equivalencia entre magnitudes sísmicas medidas por medio de diferentes parámetros

Anexo 3: capas del ATLAS de Costa Rica versión 2014 empleadas en el desarrollo del estudio

Anexo 4: formulario de inspección de edificaciones para la determinación de la vulnerabilidad sísmica

ANEXO 1

ACELERACIÓN

Tasa de cambio de velocidad en términos de un punto de referencia. Comúnmente expresado como una fracción o porcentaje de la aceleración debida a la gravedad (g), donde $g = 980.665 \text{ cm/s}^2$. (USGS)

ACELERACIÓN MÁXIMA

La máxima aceleración en términos de valor. (USGS)

ACELERÓGRAFO

Instrumento que registra, en un lugar determinado, la historia de las aceleraciones debidas a un movimiento fuerte del terreno.

ACELEROGRAMA

Registro de la variación temporal de las aceleraciones en un punto y en una dirección. Se obtiene de un acelerógrafo.

AMENAZA SÍSMICA

Amenaza natural que se cuantifica por el valor esperado de futuras acciones sísmicas y se expresa en términos de sus probabilidades de excedencia.

AMPLITUD DE UNA ONDA

Altura máxima de la cresta o del valle de una onda.

ASTENÓSFERA

Región altamente viscosa y mecánicamente débil de la parte superior del manto terrestre. Se encuentra por debajo de la litósfera, a profundidades entre los 100 km y 200 km debajo de la superficie, pero es posible que se extienda hasta una profundidad de 400 km.

AZIMUT

Es el ángulo medido con respecto al norte (en el sentido de las agujas del reloj) que sirve para localizar algún punto de interés desde un sistema de referencia dado

BATIMETRÍA

Estudio de las profundidades oceánicas mediante el trazado de mapas de isóbatas (puntos de igual profundidad).

CARTOGRAFÍA

Disciplina encargada de estudiar los diferentes métodos o sistemas que permiten representar en un plano una parte o la totalidad de la superficie terrestre.

CENTROIDE

El centroide es el lugar (x,y,z) donde se coloca la mejor fuente puntual para un terremoto. Matemáticamente es el promedio ponderado del momento sísmico en el plano de falla.

CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN

Un código de construcción, o de control de edificios, es un conjunto de reglas que especifican el nivel mínimo aceptable de seguridad para los objetos construidos. El objetivo principal de los códigos de construcción es proteger la salud pública, la seguridad y el bienestar general en lo que respecta a la construcción y ocupación de edificios y estructuras. Un código sísmico, se refiere a un código de construcción que utiliza los principios de diseño sismo-resistente. (USGS - CIDEM)

CONDICIONES LOCALES DEL SITIO

Descripción cualitativa o cuantitativa de la topografía, la geología, y el perfil del suelo de un sitio; factores que afectan al movimiento de la tierra durante un terremoto. (IASPEI)

CORDILLERA CENTRO OCEÁNICA

Alineación de tierra elevada desde el fondo del océano, que se extiende por cientos de kilómetros. Se asemeja a una cadena de montañas con un valle de grieta central.

CORRIENTES DE CONVECCIÓN EN EL MANTO

Supuesto movimiento del material en el manto terrestre, lateral o verticalmente, formando células de movimiento circular, debido principalmente a variaciones en la temperatura.

ANEXO 1

CORRIMIENTO DE TIERRAS

Movimiento brusco que causa el descenso de materiales geológicos desde las zonas altas, en respuesta al efecto de la gravedad. Los deslizamientos de tierra pueden ser provocados por un terremoto u otras causas naturales. (EQCanada)

CORTEZA

Capa más externa del manto terrestre, que varía en espesor en un rango de entre 10 km y 65 km alrededor de todo el mundo. La corteza continental es de aproximadamente 40 km de espesor en el noroeste del Pacífico. El espesor de la corteza oceánica en esta región varía entre 10 km y 15 km. La corteza se caracteriza por velocidades de onda P menores a 8 km/s. La región de la corteza más cercana a la superficie (profundidad entre 15 km y 35 km) es suficientemente frágil como para producir terremotos. La corteza sísmica se separa de la corteza inferior por el límite frágil-dúctil. (USGS)

CORTEZA CONTINENTAL

Capa más externa y sólida de la tierra, que forma los continentes y está compuesta por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. En general, la corteza continental es una composición granítica, en contraste con la corteza oceánica. (PDC)

CORTEZA OCEÁNICA

Capa más externa y sólida de la tierra, que subyace en los océanos. Integrada por basaltos, rocas ígneas y gabbro, siendo por lo tanto de composición basáltica. (PDC)

COTA

Altura de un punto con respecto a un plano horizontal, que puede ser el nivel medio del mar u otro plano de referencia.

CURVA DE NIVEL

Línea que une puntos de igual elevación o altura.

DESASTRE

Un evento que causa grandes trastornos en la economía, la sociedad y el medio ambiente. Su origen o causas pueden ser directamente derivados de los fenómenos naturales, es decir, geofísica (como eventos volcánicos o sísmicos que provocan el colapso de la infraestructura, deslizamientos o la licuefacción, etc.) o climáticos (como huracanes, tifones, tornados, abruptas variación en las precipitaciones, etc.). Aunque generalmente no están cubiertos por la metodología, los desastres también pueden tener un origen humano o antrópico, como derrames químicos, accidentes industriales, o eventos causados voluntariamente, tales como la guerra, las acciones terroristas, las consecuencias de desastres o daños, etc. (ONU)

DENSIDAD

Masa por unidad de volumen de una sustancia, normalmente expresada en gramos por centímetro cúbico.

DENSIDAD DE POBLACIÓN

La densidad de población es una medición de una población por unidad de área o unidad de volumen.

DERIVA CONTINENTAL

Es el proceso de movimiento relativo de las placas tectónicas o bloques de litósfera debido a la expansión oceánica.

DISCONTINUIDAD DE MOHOROVICIC

Límite entre la corteza y el manto terrestre.

DISTANCIA EPICENTRAL

Distancia entre un observador o una estación sísmológica y el epicentro de un sismo, medida sobre la superficie de la Tierra.

DURACIÓN

Intervalo de tiempo entre los picos y valles de movimiento fuerte por encima de una amplitud especificada. (EQCanada)

ANEXO 1

ELIPSOIDE

Figura matemática que se genera a partir de la rotación de una elipse en torno a su eje, su utilización en cartografía se debe a que dicha figura se asemeja a la forma achatada de la tierra; los cálculos asociados a esta figura resultan más complejos pero más precisos que aquellos realizados a partir de la esfera. Uno de los elipsoides terrestres más conocidos es el WGS 84, en donde el eje ecuatorial tiene 6.378.137 metros, y el eje polar tiene 6.356.752,3142 metros, es decir, la diferencia entre el Polo y el ecuador es de casi 22 Kilómetros.

ENJAMBRES

En algunas regiones se producen una serie de temblores que no están asociados con ningún terremoto mayor. A estas series se les llama "enjambres sísmicos". Estos son comunes en las regiones volcánicas, pero también suceden en otras regiones no asociadas a la actividad volcánica.

EPICENTRO

El punto sobre la superficie terrestre ubicado verticalmente por encima del punto de ruptura de la corteza (foco) asociado con un sismo determinado. (EQCanada)

ESCALA

Relación entre cualquier magnitud (distancia o superficie) medida en el plano y la homóloga en el terreno. Dicha relación es variable de un plano a otro, pero constante, sin importar la dirección que se tome dentro de un mismo plano.

ESCARPE DE FALLA

Accidente geográfico lineal, escalonado, coincidente con la traza de una falla y causada por un deslizamiento geológico reciente en la falla. (USGS)

ESFUERZO

Medida de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo expresado en unidades de fuerza por unidad de área.

ESFUERZOS TECTÓNICOS

Son aquellas fuerzas de origen tectónico existentes en un área determinada, y que según su configuración provocan deformaciones o alteraciones en los materiales terrestres.

ESTACIÓN SÍSMICA

Una posición de tierra en la que se encuentra un instrumento geofísicos para una observación. (U-Milwaukee)

ESTRUCTURAS CRÍTICAS

- Estructuras cuyo rendimiento durante una emergencia debe ser óptimo o cuya falla podría poner en peligro gran cantidad de vidas. Pueden incluir: (1) estructuras tales como reactores nucleares o grandes presas, cuyo fracaso podría ser catastrófico; (2) estructuras de servicios públicos de comunicación importante, y sistemas de transporte; (3) edificios de alta ocupación, por ejemplo escuelas o prisiones y; (4) las instalaciones de emergencia, tales como hospitales, comisarías y estaciones de bomberos, y los centros de respuesta a los desastres.
- Estructuras físicas primarias, instalaciones técnicas y sistemas que sean social o económicamente indispensables para el funcionamiento de una sociedad o comunidad, tanto en circunstancias de rutina como en circunstancias extremas inducidas por una emergencia, incluyendo: (1) hospitales y centros de salud; (2) edificios públicos, de telecomunicaciones, aeropuertos, sistemas de energía (carbón, nuclear, etc.), puentes y otras instalaciones que son fundamentales para la recuperación y rehabilitación de una región tras un terremoto. (IASPEI-UN/ISDR)

EVALUACIÓN DE RIESGOS

Una metodología para determinar la naturaleza y el alcance del riesgo mediante el análisis de los posibles peligros y la evaluación de las condiciones existentes de vulnerabilidad, con el fin de determinar el efecto de estos elementos en conjunto, y cómo los mismos podrían perjudicar a las personas,

ANEXO 1

bienes, servicios, medios de subsistencia y el medio ambiente expuestos. (EIRD / ONU)

EXPANSIÓN OCEÁNICA

Proceso por el que placas adyacentes, a lo largo de la cordillera centro-oceánica se apartan la una de la otra para permitir la salida de nueva corteza oceánica.

FALLA

Discontinuidad a lo largo de la cual ha ocurrido movimiento en sentido paralelo a la superficie de fractura.

FALLA ACTIVA

Una falla en la que se considera probable la ocurrencia de un movimiento de renovación, dentro de un lapso de preocupación para los seres humanos. Las fallas son comúnmente consideradas como activas si han presentado movimiento una o más veces en los últimos 10000 años, pero también pueden ser consideradas activas al evaluar el riesgo asociado a estas para algunas aplicaciones, incluso si el último movimiento se ha producido en los últimos 500000 años. (USGS)

FALLA CIEGA

Falla que no se extiende hacia la superficie de la tierra. Por lo general, termina en la región axial de un anticlinal. Si es inmersión es menor a 45°, es un empuje ciego. (IASPEI)

FALLA CERRADA

Una falla que no presenta deslizamiento relativo debido a que la resistencia a la fricción a través del plano de fractura es mayor que el esfuerzo cortante al cual dicho plano está sometido. Tales fallas pueden almacenar energía elástica por largos períodos de tiempo, hasta que finalmente la resistencia a la fricción sea superada y la energía sea liberada en forma de calor y ondas sísmicas. (USGS)

FALLA GEOLÓGICA

Una fractura o zona de fractura en rocas a lo largo de la cual los dos lados se han desplazado, el uno con relación al otro, paralelamente a la fractura. El

desplazamiento total puede variar desde centímetros a kilómetros.

FALLA INVERSA

Falla de desplazamiento en la que el bloque techo se mueve hacia arriba en relación con el bloque piso.

FALLA NORMAL

Falla de desplazamiento en la cual el bloque techo ha descendido en relación con el bloque piso.

FALLA DE SEGUIMIENTO

Intersección de una falla con la superficie de la tierra, también, la línea general trazada en los mapas geológicos para representar a una falla. (USGS)

FALLA SISMOGÉNICA

Falla en donde, en forma recurrente, se generan sismos.

FALLA DE RUMBO

Falla que consiste en movimiento horizontal, de modo que los bloques en lados opuestos del plano de falla se deslizan uno al lado del otro.

FALLA TRANSCURRENTE

Falla de rumbo de orden cortical (frágil).

FALLA TRANSFORMANTE

Falla de rumbo de orden litosférico (representa un límite de placas)

FASE

Una etapa en movimiento periódico, tal como el movimiento de las olas o el movimiento de un oscilador, medido con respecto a un punto inicial dado y expresada como una medida angular. Una fase también puede ser un pulso de la energía sísmica que llega en un momento determinado. (USGS)

FOCO O HIPOCENTRO

Localización puntual del lugar en el interior de la tierra donde se da la ruptura que da lugar a un terremoto.

ANEXO 1

FOSA TECTÓNICA

Depresión de la corteza terrestre limitada lateralmente por fallas.

FOSA OCEÁNICA

Una depresión lineal del fondo del mar. Ocurre debido al fenómeno de subducción de las placas litosféricas. (USGS)

GEODESIA

Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre o de gran parte de él, y construir los mapas correspondientes.

GEODESIA SÍSMICA

Realiza mediciones muy precisas de distancias y diferencias de elevación de puntos conocidos sobre la superficie terrestre, con el objetivo de determinar el sentido y la velocidad de los movimientos de la corteza que generan terremotos. Su rango de acción temporal va de algunos días hasta 100 años o más.

GEOIDE

Superficie equipotencial, donde la dirección de la gravedad es perpendicular en todos los puntos sobre la Tierra.

GEOLOGÍA

Ciencia que trata de la forma exterior e interior del globo terrestre, de la naturaleza de las materias que lo componen y de su formación, de los cambios o alteraciones que estas han experimentado desde su origen, y de la colocación que tienen en su actual estado.

GEOLOGÍA SÍSMICA

Ciencia que se ocupa de detectar estructuras generadoras de terremotos en el pasado y presente geológico. Su rango de acción temporal es mayor a las decenas de miles de años hasta cientos de millones de años.

GEOMORFOLOGÍA

Estudio de las características propias de la corteza terrestre.

GEOMORFOLOGÍA SÍSMICA

Se ocupa de detectar anomalías en las formas de la superficie terrestre, atribuibles a la acción de terremotos ocurridos en el pasado y trata de cuantificar esta acción. Su rango de acción temporal se ubica entre cien y un millón de años.

GUTENBERG-RICHTER

Los terremotos parecen seguir un patrón a través del tiempo. La ley Gutenberg-Richter o criterio de Gutenberg-Richter es una fórmula que permite evaluar y cuantificar la relación entre la frecuencia y la magnitud de los eventos que describen la actividad sísmica de una región. (CEDIM)

HERTZ

Unidad de frecuencia equivalente a un ciclo por segundo o 2π radianes por segundo.

HIPOCENTRO

El punto de la tierra en el que se da la ruptura que da origen a un sismo. También se le denomina "enfoque". (USGS)

HIPÓTESIS

Una proposición que se hace en forma tentativa y que es sometida posteriormente a comprobación por la obtención de indicios o experimentos.

HIPSOMETRÍA

Parte de la topografía, es decir, la descripción y delineamiento detallado de la superficie terrestre, que trata de la medida de las alturas.

HORA O TIEMPO ORIGEN

Corresponde al momento en que se produce la relajación súbita de los esfuerzos, es decir el momento en que se inicia la ruptura en el foco. Esta puede ser referida a la hora local u hora normalizada universal (UTC).

ANEXO 1

ÍGNEO

Una roca o mineral que se solidifica a partir de un material fundido o parcialmente fundido.

INTENSIDAD

Un índice numérico subjetivo para describir la gravedad de un terremoto en términos de sus efectos sobre la superficie de la tierra, los seres humanos y las estructuras. Existen varias escalas sismológicas para medirla, pero las de mayor uso son la escala Mercalli Modificada y la escala Rossi-Forel. (Directrices HAZUS)

ISOSISTA

Líneas de contorno que delimitan áreas en las cuales se admite igual intensidad sísmica.

LAVA

Roca fundida o Magma que ha alcanzado la superficie.

LATITUD

Medida de distancia expresada en grados, en sentido norte o sur, tomando como referencia el ecuador. (NASA)

LICUEFACCIÓN

La transformación de un material granular de un estado sólido a un estado licuado, como consecuencia del aumento de las presiones de agua de los poros y la reducción del esfuerzo efectivo. En ingeniería sismológica, se refiere a la pérdida de resistencia del suelo como resultado de un aumento en la presión de poros debido al movimiento de tierra. Este efecto puede ser causado por un movimiento sísmico. (IASPEI)

LITÓSFERA

Capa de rocas exterior de la Tierra, incluyendo la corteza y el manto superior. La litósfera posee 100 km de espesor, aunque su grosor es dependiente de la edad. Algunos puntos debajo de la corteza son frágiles, lo suficiente para producir terremotos, por ejemplo, en la zona de subducción de las placas tectónicas. (USGS)

LOGARITMO

Es simplemente el exponente requerido para producir un número dado. (CEDIM)

LONGITUD

Medida de distancia expresada en grados, en sentido este u oeste, tomando como referencia el meridiano Greenwich. (NASA)

MANTO

La capa de roca que se encuentra entre la corteza externa y el núcleo de la tierra. Su espesor es de aproximadamente 2900 km, y es la mayor de las principales capas de la tierra. (PDC)

MAGMA

Material de roca fundida localizada en el manto o la litósfera, cuando se solidifica forma las rocas ígneas.

MAGNITUD

Valor adimensional que caracteriza el tamaño relativo de un terremoto. La magnitud se basa en la medición del movimiento máximo registrado por un sismógrafo (a veces para ondas sísmicas de una frecuencia en particular), corregido para la atenuación de una distancia normalizada. Varias escalas se han definido para cuantificar la magnitud de los sismos, pero las más utilizadas son: (1) la magnitud local (M_L), comúnmente conocida como la magnitud Richter; (2) la magnitud de ondas superficiales (M_s); (3) la magnitud de ondas de cuerpo (M_b) y; (4) la magnitud de momento (M_w). M_L , M_s y M_b son escalas de alcance limitado, y no resultan confiables para sismos de magnitudes altas (mayores a 7.0). La escala de magnitud de momento (M_w), basada en el concepto del momento sísmico, es aplicable de manera uniforme a sismos de todos los tamaños, sin embargo, es más difícil de calcular que el resto. (USGS-IASPEI)

MAGNITUD LOCAL (M_L)

Se obtiene a partir de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo de torsión Wood Anderson con constantes específicas (período = 0.8 segundos,

ANEXO 1

amplificación estática = 2800 y factor de amortiguamiento = 0.8) ubicado a 100 kilómetros de la fuente sísmica.

MAGNITUD POR ONDAS CORPÓREAS (Mb)

Se basa en la amplitud máxima de las ondas de cuerpo con período cercano a 1.0 segundo (entre 0.1 y 3.0 segundos).

MAGNITUD POR ONDAS SUPERFICIALES (Ms)

Para la determinación de la magnitud se toma la amplitud máxima de las ondas Rayleigh de 20 segundos de período.

MANTO TERRESTRE

La capa intermedia de la Tierra, entre la corteza y el núcleo. Abarca desde la base de la corteza hasta 2900 kilómetros de profundidad. Representa el 83% del volumen de la Tierra y está compuesto por rocas silicatadas densas divididas en cierto número de capas concéntricas.

MAREJADA

Movimiento de la marea que tiene que ver con el desbalance oceánico provocada por la atracción gravitacional ejercida por los planetas, el sol y la luna.

MAREMOTO

Violenta agitación de las aguas provocada por una gran sacudida en el fondo del mar.

MATERIALES PIROCLÁSTICOS

Material fragmentario, como la ceniza, arrojado en forma explosiva por un volcán.

MECANISMO FOCAL

El mecanismo focal indica la geometría del plano de falla asociado a un terremoto (rumbo, manteo, o ángulo de inclinación, y deslizamiento), la dirección de los ejes principales de esfuerzo en el foco y el patrón de radiación de las ondas P y S. Es representado gráficamente en una esfera focal, donde se indican las compresiones y dilataciones producidas por un terremoto.

MICROSISMO

Ondas sísmicas débiles y prácticamente continuas o ruido de la Tierra que sólo puede ser detectado por sismógrafos.

MMI

La escala de Mercalli clasifica la intensidad de las sacudidas de un terremoto. Las calificaciones varían desde I (sentido sólo bajo circunstancias especialmente favorables) hasta XII (destrucción total).

MOVIMIENTO DE TIERRA (SACUDIDAS)

Término general que se refiere a los aspectos cualitativos o cuantitativos del movimiento de la superficie de la tierra asociado a toda clase de eventos, desde terremotos hasta explosiones. El movimiento sísmico del suelo se produce generalmente por ondas producto del deslizamiento repentino en una falla, o presión repentina en una fuente explosiva. (USGS)

NEOTECTÓNICA

Es la rama de la geología que se encarga de estudiar la deformación de la corteza terrestre en tiempos geológicos recientes, desde el Terciario Tardío hasta el presente, es decir, los últimos 2 millones de años.

NÚCLEO TERRESTRE

Parte central de la Tierra: Se divide en núcleo externo y núcleo interno. Su parte externa es líquida puesto que no transmite las ondas S. El núcleo interno es sólido, con una densidad cinco veces superior a la de la corteza y se supone que está formado por una aleación de hierro y silicatos.

ONDAS DE CUERPO

Ondas sísmicas que se propagan por el interior de la tierra, en oposición a las ondas de superficie que se propagan cerca de la superficie de la tierra. Las ondas P y las ondas S son ejemplos de ondas de cuerpo. Cada tipo de onda tiene características distintivas de deformación. (USGS)

ANEXO 1

ONDAS LOVE

Ondas sísmicas superficiales con movimiento solo horizontal de cizalla normal a la dirección de propagación.

ONDAS P

La primera onda, o la más rápida, viajando desde el lugar del evento sísmico a través de las rocas y que consiste en un tren de compresiones y dilataciones del material. Pueden viajar a través de los sólidos, líquidos y gases.

ONDAS RAYLEIGH

Ondas sísmicas superficiales de amplitud decreciente con la profundidad; el movimiento de las partículas es elíptico retrogrado y ocurre en un plano vertical que contiene la dirección de propagación.

ONDAS S

Ondas sísmicas secundarias, viajan más lento que las ondas P, consisten en vibraciones elásticas transversales a la dirección de recorrido. No pueden propagarse en líquidos.

ONDA SÍSMICA

Onda elástica, normalmente generada por un terremoto o una explosión.

OSCILACIONES LIBRES DE LA TIERRA

Después de un gran terremoto la tierra comienza a vibrar, como un todo. Estas oscilaciones no son aleatorias si no que solo algunas formas de oscilar son posibles y con cada movimiento solo ciertas frecuencias son admisibles. Se reconocen dos tipos de movimiento: esferoidales (S) y toroidales (T).

PANGEA

Nombre propuesto por Alfred Wegener para un supercontinente, compuesto de todas las masas de tierra que existían al final de la era Paleozoica.

PATRÓN DE RADIACIÓN

Representa una descripción geométrica de la distribución de amplitudes alrededor del foco del sismo según el tipo de onda y la dinámica de la ruptura

PERÍODO DE UNA ONDA

Intervalo de tiempo entre dos crestas sucesivas en un tren de ondas sinusoidales. El período es el inverso de las frecuencias en un evento cíclico.

PGA

La aceleración máxima es la mayor amplitud medida en un acelerógrafo para un evento dado. También es la aceleración máxima esperada para un movimiento de terreno fuerte. (IASPEI)

PLACA TECTÓNICA

Porción individual de litosfera que se mueve sobre la astenósfera.

PLANO DE FALLA

El plano de falla describe las direcciones de deslizamiento de un bloque con respecto a otro al activarse una falla. El plano de falla queda descrito totalmente por tres ángulos: (1) el de inclinación de la falla; (2) el rumbo y; (3) el de deslizamiento.

PRECURSORES:

Sismos pequeños que preceden al mayor de una serie, concentrada en un volumen de corteza restringido. Sin embargo, estos no suceden con la suficiente regularidad como para ser utilizados con el fin de predecir terremotos de mayor magnitud.

PREPARACIÓN

El conocimiento y las capacidades desarrolladas por los gobiernos; las medidas de respuesta establecidas por profesionales y organizaciones, comunidades e individuos, con el fin de anticipar y poder recuperarse satisfactoriamente de los impactos provocados por los eventos de riesgo probable. (EIRD/ONU)

PREVENCIÓN

Las acciones o las inversiones necesarias de cara a los peligros inminentes. A diferencia de la mitigación, que es una estrategia permanente, la prevención es vista como un conjunto de actividades anteriores a un desastre. (EIRD/ONU)

ANEXO 1

PROFUNDIDAD

La distancia (usualmente medida en km) por debajo de la superficie de la tierra delineada por 0 km (el esferoide media). También conocida como la profundidad del terremoto. Los terremotos pueden ocurrir en cualquier lugar entre la superficie de la tierra y sobre 700 km por debajo de la superficie. Para fines científicos, este rango de profundidad de 0 a 700 km se divide en tres zonas: superficial, intermedia y profunda. (USGS-CEDIM)

PROFUNDIDAD FOCAL

Un término que se refiere a la profundidad del foco de un terremoto. (USGS)

PROYECCIÓN

Superficie sobre la cual se representan gráficamente de forma analógica o analítica, los elementos y características de la superficie terrestre. Sin embargo, como una superficie esférica no puede transformarse a una plana sin modificar la geometría de la superficie, sólo se puede conservar una o dos propiedades de la superficie esférica a la plana: distancias, áreas, formas o ángulos.

PROYECCIÓN EQUIVALENTE

Es aquella que conserva las superficies representadas en relación con su escala.

PROYECCIÓN EQUIDISTANTE

Es aquella que conserva las distancias entre las medidas sobre la Tierra y su correspondiente sobre el plano.

PROYECCIÓN CONFORME

Es aquella que conserva las formas de las superficies representadas, lo cual no significa que conserve las áreas ni las distancias entre puntos. Esta conformidad puede darse solamente en una región o zona específica de la proyección. Los principales tipos de proyecciones conformes que se utilizan son: (1) Mercator; (2) Transversa de Mercator; (3) Cónica Conforme de Lambert y; (4) Estereográfica Azimutal.

PROYECCIÓN MERCATOR

Parte del fundamento de la construcción de una carta cuyas líneas rectas cortan con el mismo ángulo a todos los meridianos, estos aparecen como líneas rectas, perpendiculares al Ecuador, y las latitudes paralelas entre sí. La propiedad de conformidad no es constante, ya que tiende a exagerar las formas hacia lugares situados en los extremos Norte o Sur (polos). Por ejemplo, Groenlandia presenta casi el mismo tamaño de Sudamérica, que es, sin embargo, unas nueve veces mayor.

REFRACCIÓN DE UNA ONDA

La desviación de una onda transmitida, de su dirección original de recorrido en una interface, con un material de diferente velocidad de ondas.

RELACIÓN SEÑAL/RUIDO

Es una relación entre la amplitud de una señal dada en un punto y la amplitud del ruido existente en la señal, referido al mismo punto

RIFT

Fosa tectónica alargada y no muy ancha.

REGIÓN ASÍSMICA

Aquella en que prácticamente no ocurren terremotos.

RÉPLICAS

Temblores secundarios que pueden seguir a una sacudida de mayor magnitud, formando en conjunto una secuencia de movimientos sismológicos. Estos temblores pueden extenderse por un período de semanas, meses o años. (USGS)

RESIDENCIAL

Un edificio se considera como la construcción residencial cuando más de la mitad de su superficie de suelo se utiliza para fines de vivienda. (OCDE)

RESISTENCIA

La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad, expuestos a riesgos, de resistir, absorber,

ANEXO 1

adaptarse y recuperarse de los efectos de un peligro en una manera oportuna y eficiente, incluso a través de la preservación y restauración de sus estructuras y funciones básicas. (EIRD/ONU)

ROCA ÍGNEA

Cualquier roca formada por enfriamiento y cristalización de magma o lava, o por la acumulación y consolidación de materiales piroclásticos.

RIESGO SÍSMICO

Es el resultado de la evaluación probabilística de que en un determinado sitio y durante un tiempo de exposición determinado, las consecuencias económicas o sociales de los sismos, expresadas en unidades monetarias o en víctimas, excedan valores prefijados.

RUMBO

Dirección de una línea formada por la intersección de un plano horizontal con un plano inclinado, como una capa de roca.

SECUENCIA

Pertenece a la posible aparición de los eventos precursor, principal y réplicas, así como el período de tiempo para estos. (CEDIM)

SISMO

Movimiento brusco de la corteza terrestre, capaz de cambiar por completo el paisaje de una región.

SISMO SECUNDARIO

Terremoto que sigue a la sacudida principal resultante de ajustes a lo largo de una falla. Los sismos secundarios son comunes después de un gran terremoto, pero en su mayoría son más leves que la sacudida principal.

SISMICIDAD

La distribución geográfica e histórica de los temblores y terremotos. Sismicidad es un término introducido por Gutenberg y Richter para describir cuantitativamente el espacio, el tiempo y la distribución de la magnitud de los eventos sísmicos de una región o zona determinada. (ICWGroup / IASPEI)

SISMÓGRAFO

Instrumento por el cual se obtiene un registro continuo y permanente del movimiento de la Tierra, en función del tiempo.

SISMOGRAMA

Representación gráfica de un sismo.

SISMOLOGÍA

Rama de la geofísica que estudia los terremotos, fuentes sísmicas y propagación de ondas a través de la Tierra.

SISMO LOCAL O CERCANO

Es todo evento sísmico situado dentro de un radio menor a 10° de distancia desde el punto de observación.

SISMÓMETRO

Parte sensora de un sismógrafo, cuyas corrientes físicas son conocidas y por tanto su curva de calibración, permitiendo obtener un movimiento exacto de la Tierra.

SISMOSCOPIO

Es un equipo o dispositivo que indica la ocurrencia de un sismo, pero no describe un registro en tiempo del mismo, solo señala la dirección del impulso principal.

SUBDUCCIÓN

Es el proceso mediante el cual el material de una placa oceánica reingresa al interior de la Tierra.

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

Es un sistema satelital desarrollado por los EEUU que consta de una red de 24 satélites operativos que orbitan la Tierra a unos 25000 km de la superficie. El receptor capta las señales de al menos cuatro satélites, traduciendo el código de estos en la posición de la antena receptora y en una referencia temporal de dicho punto. Existen dos tipos de GPS: (1) los navegadores, utilizados por el mundo civil ya que son los más económicos y; (2) los geodésicos, utilizados para estudios de alta precisión.

ANEXO 1

TECTÓNICA

Rama de las Ciencias de la Tierra que se dedica al estudio de la dinámica de la corteza terrestre, e incluye dentro de su área de interés la formación de montañas y grandes depresiones en la corteza, el levantamiento, hundimiento, desplazamiento horizontal y deformación de la corteza, y el origen y cuantificación de estos fenómenos.

TECTÓNICA DE PLACAS

Una teoría respaldada por una amplia gama de evidencias que considera que la corteza y el manto superior terrestre están compuestos por varias placas de gran tamaño y de rigidez intermedia. Estas placas presentan movimientos diferenciales entre sí. (USGS)

TELESISMO

Es todo evento sísmico distante más de 10 grados de latitud o longitud del punto de observación (sismo lejano).

TEORÍA

Una hipótesis que está apoyada por indicios experimentales o de observación.

TEORÍA DEL REBOTE ELÁSTICO

La teoría de la generación de los terremotos que propone que las fallas permanecen fijas mientras se acumulan los esfuerzos lentamente en las rocas vecinas y luego se desplazan súbitamente, desprendiendo la energía acumulada.

TERREMOTO

Sacudidas del terreno asociadas a energía irradiada desde una fuente sísmica, causadas comúnmente por un deslizamiento repentino en una falla, actividad volcánica o magmática, u otros fenómenos con el potencial de inducir cambios bruscos de tensión en la tierra. Un terremoto de magnitud mayor a ocho se denomina “gran terremoto”.

TERREMOTO DE POCA PROFUNDIDAD

Un terremoto cuyo foco se encuentra a menos de 70 km de la superficie terrestre. (Sci-Tech)

TERREMOTO INTERMEDIO

Un terremoto cuyo hipocentro se encuentra a una profundidad de entre 70 km y 300 km. (USGS)

TERREMOTO PROFUNDO

Un terremoto cuyo hipocentro se encuentra a más de 300 km de la superficie terrestre. Algunos expertos consideran 100 km de profundidad como una medida aceptable para definir terremotos de fondo, esto debido a los pocos daños causados por los eventos clasificados según la primera clasificación (USGS)

TRAZA DE UNA FALLA

Es la intercepción del plano de falla con la topografía.

TSUNAMI

Serie de olas que se producen en una masa de agua al ser empujadas violentamente por una fuerza que las desplaza verticalmente.

VOLCÁN

Montaña cónica formada alrededor de un conducto, como resultado de la erupción de lava y materiales piroclásticos.

ZONA DE BENIOFF

Zona estrecha definida por los focos de terremotos, de un espesor de unas decenas de Km. que desciende desde la superficie bajo la corteza terrestre.

ZONA DE SUBDUCCIÓN

Zona larga y angosta en un límite de placas convergentes, donde una placa oceánica desciende insertándose debajo de otra placa; por ejemplo, la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana.

ANEXO 2

REGRESIONES DE VALIDEZ GLOBAL PARA CONVERTIR MAGNITUDES DE ONDAS SUPERFICIALES Y DE CUERPO EN MAGNITUD DE MOMENTO

Según Karnik (1973) una relación de regresión aceptable entre la magnitud de ondas de cuerpo (M_b) y la magnitud de ondas superficiales (M_s) es descrita de la siguiente forma, para eventos con magnitudes de $M_b \geq 4.5$ y $M_s \leq 6.5$:

$$M_b = 0.46M_s + 2.74$$

No obstante, la relación entre las magnitudes por ondas de cuerpo y por ondas superficiales no es uniforme para todos los rangos de magnitud, y sus resultados discrepan de la realidad de manera inaceptable para algunos casos, causando una subestimación o sobreestimación para ciertos eventos sísmicos con magnitudes fuera del rango de aplicación de la relación.

Para superar esta limitación, haciendo uso del concepto de momento sísmico (M_o), Kanamori (1977) y Hanks y Kanamori (1979), propusieron una nueva escala de magnitud: la magnitud de momento (M_w), defina de la siguiente forma:

$$M_w = \frac{\log M_o}{1.5} - 10.7$$

La escala de momento no se satura para valores de magnitud elevados, y es directamente proporcional al logaritmo del momento sísmico, valor que a su vez está relacionado de forma directa con la física de la fuente sismogénica. Es por lo anterior que la escala de magnitud de momento es considerada la más confiable.

Considerando las ventajas de la escala de magnitud de momento, y teniendo en cuenta la necesidad de un catálogo homogéneo de sismos como herramienta de investigación, tanto para estudiar patrones de los eventos sismológicos como para emplearlo en aplicaciones ingenieriles (tales como evaluaciones de amenaza sísmica), se determina que una relación de regresión que permita convertir diferentes tipos de magnitud en otra escala de magnitud de preferencia.

Ranjit Das, Wason y Sharma (2011) proponen una metodología para determinar una relación de regresión estándar ortogonal (OSR), utilizando datos de magnitudes de eventos ocurridos alrededor de todo el globo terrestre, siendo estos: 81974 magnitudes de ondas superficiales provenientes del

International Seismological Centre (ISC); 16019 magnitudes de ondas superficiales provenientes del *National Earthquake Information Center* (NEIC) (Estados Unidos); 348423 magnitudes de ondas de cuerpo provenientes del ISC; 238525 ondas de cuerpo provenientes del NEIC y; datos de 27229 eventos sísmicos, provenientes *Global Centroid Moment Tensor* (GCMT). Estos datos pertenecen al período comprendido entre las fechas de 01-01-1976 y 31-05-2007.

Para el estudio de Ranjit Das et al. (2011) se verificó que las magnitudes de ondas superficiales provenientes del ISC y del NEIC son equivalentes ya que ambas instituciones usan el mismo procedimiento para el cálculo de M_s .

Las relaciones OSR se obtuvieron para M_s y M_w , para diferentes rangos de magnitud y profundidades focales.

Para M_b y M_w los autores obtuvieron relaciones por regresión estándar inversa (ISR), para magnitudes ubicadas entre los siguientes rangos: $2.9 \leq M_b \leq 6.5$ para los eventos registrados por el ISC y; $3.8 \leq M_b \leq 6.5$ para los eventos registrados por el NEIC.

CONVERSIÓN DE MAGNITUD DE ONDAS SUPERFICIALES A MAGNITUD DE MOMENTO:

$$M_w = 0.67(\pm 0.00005)M_s + 2.12(\pm 0.0001); \\ 3.0 \leq M_s \leq 6.1; \text{ con } R^2 = 0.83 \text{ y; } \sigma = 0.12$$

$$M_w = 1.03(\pm 0.0002)M_s - 0.38(\pm 0.006); \\ 6.2 \leq M_s \leq 8.4; \text{ con } R^2 = 0.89 \text{ y; } \sigma = 0.16$$

$$M_w = 0.67(\pm 0.0004)M_s + 2.33(\pm 0.01); \\ 3.3 \leq M_s \leq 7.2; \text{ con } R^2 = 0.81 \text{ y; } \sigma = 0.15$$

RELACIÓN ENTRE MAGNITUD DE ONDAS DE CUERPO Y MAGNITUD DE MOMENTO:

$$M_{b_{ISC}} = 0.65(\pm 0.003)M_w + 1.65(\pm 0.02); \\ 2.9 \leq M_{b_{ISC}} \leq 6.5; \text{ con } R^2 = 0.54 \text{ y; } \sigma = 0.27$$

$$M_{b_{NEIC}} = 0.61(\pm 0.005)M_w + 1.94(\pm 0.02); \\ 3.8 \leq M_{b_{NEIC}} \leq 6.5; \text{ con } R^2 = 0.56 \text{ y; } \sigma = 0.29$$

RELACIONES COMPLEMENTARIAS RECUPERADAS DE SCORDILIS (2006)

$$M_B = 1.5M_b + 2.2$$

$$M_B = 0.63M_s + 2.5$$

ANEXO 2

$$M_s = 1.27(M_L - 1) - 0.016M_L^2$$

$$M_{b_{ISC}} = 0.46M_s + 2.74$$

Donde:

M_B : es la magnitud de ondas de cuerpo definida originalmente por Richter y Gutenberg.

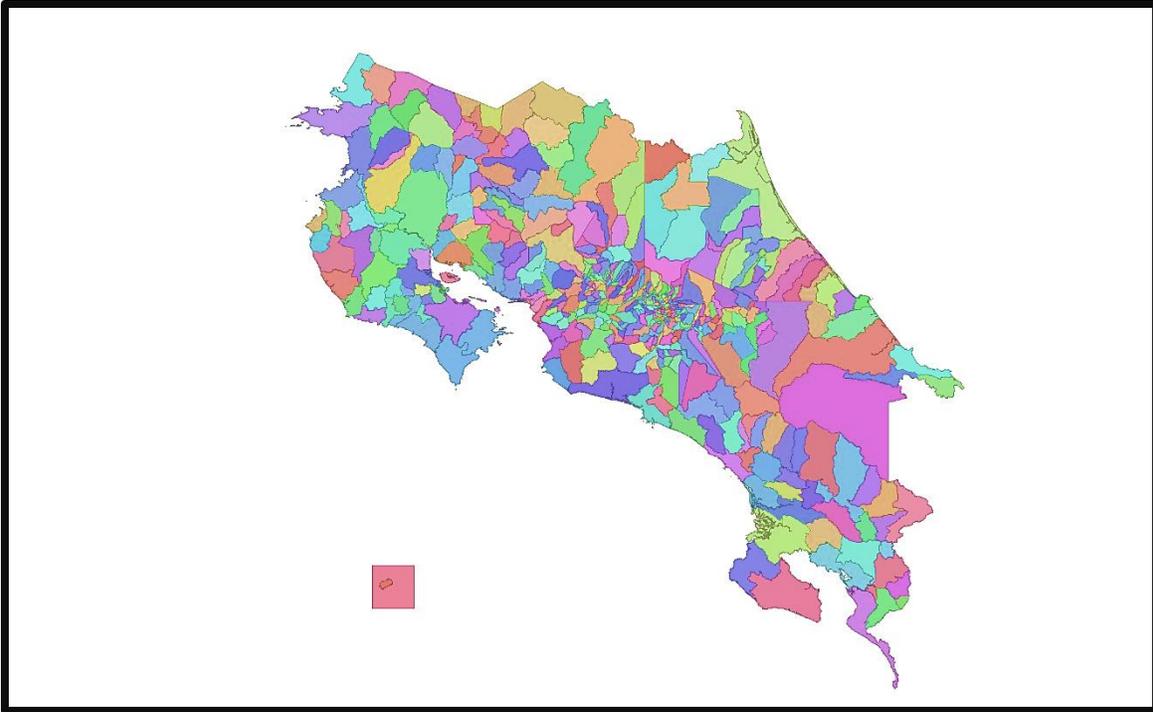
M_b : es la magnitud de ondas de cuerpo unificada, presentada en boletines del ISC y del NEIC.

$M_{b_{ISC}}$: es la magnitud de ondas de cuerpo registrada y reportada por el ISC.

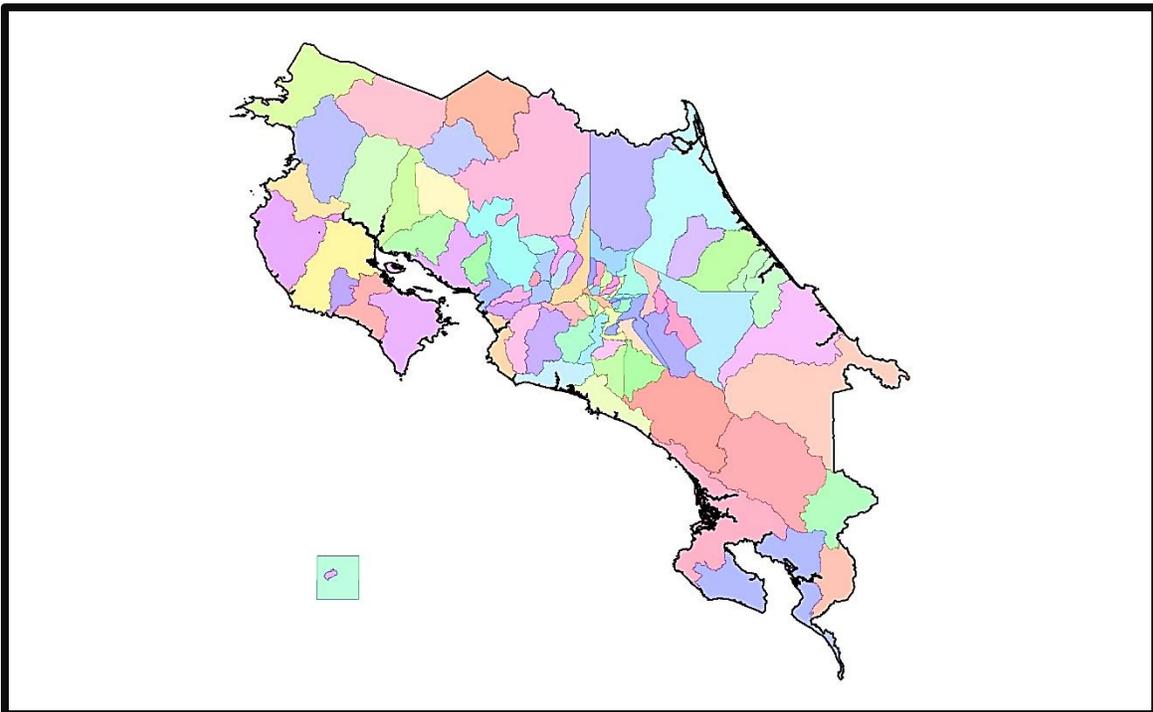
$M_{b_{NEIC}}$: es la magnitud de ondas de cuerpo registrada y reportada por el NEIC.

M_L : es la magnitud local.

ANEXO 3

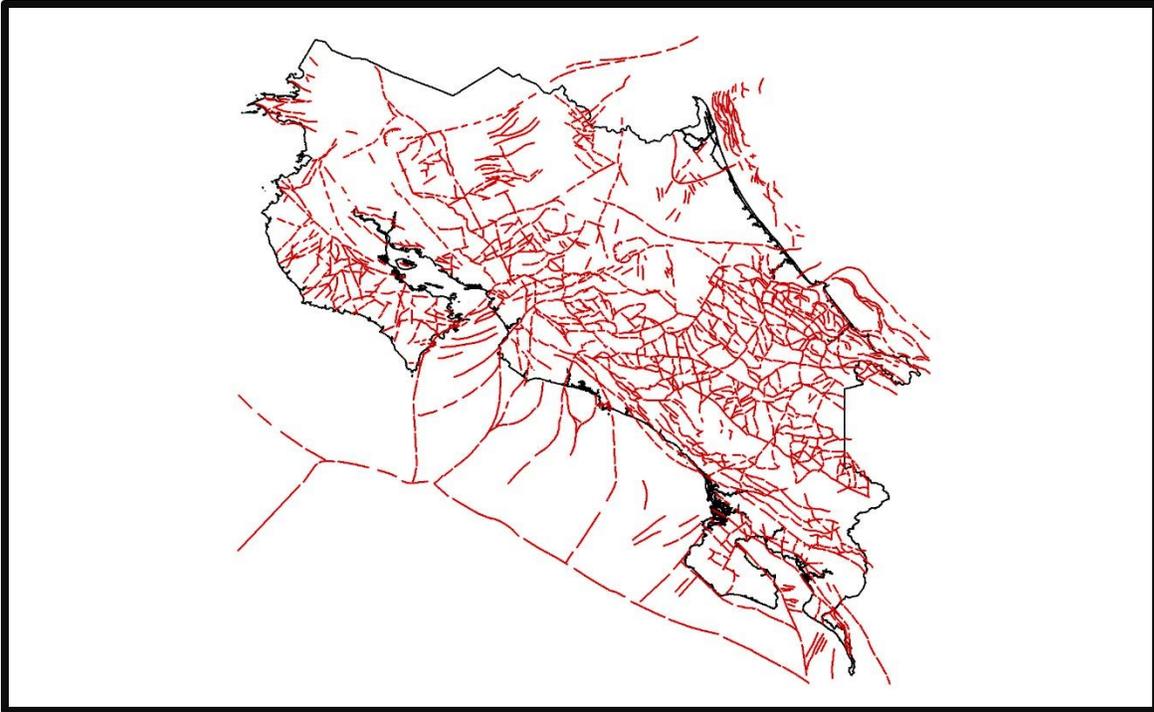


Capa de distritos del estado de Costa Rica, en proyección CRTM05.
Fuente: Atlas de Costa Rica (2014)

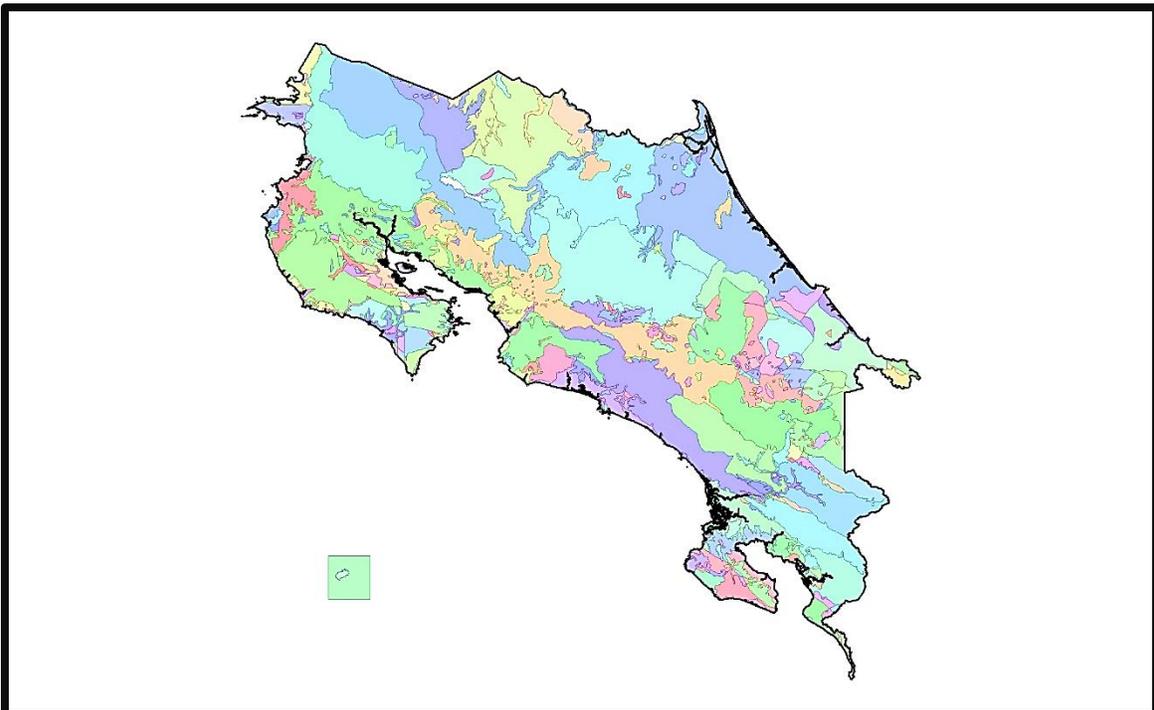


Capa de cantones del estado de Costa Rica, en proyección CRTM05.
Fuente: Atlas de Costa Rica (2014)

ANEXO 3



Capa de fallas geológicas de Costa Rica, en proyección CRTM05.
Fuente: Atlas de Costa Rica (2014)



Capa de composición geológica de Costa Rica, en proyección CRTM05.
Fuente: Atlas de Costa Rica (2014)

ANEXO 4

Formulario de inspección para determinar la vulnerabilidad sísmica					
Motivo de inspección:					
Inspector encargado:					
Código de formulario:					
Fecha de inspección:					
Ubicación general de la edificación					
Provincia	Cantón	Distrito	Frente (m)	Fondo (m)	Área basal (m ²)
Ubicación específica de la edificación					
Coordenadas de lectura GPS		N		Coordenadas CRTM05	
		W			
Y				X	
Caracterización y consideraciones básicas sobre la estructura					
			Tipo de suelo		
			S1		
			S2		
			S3		
			S4		
			Uso de la estructura		
			Vivienda individual		
			Vivienda colectiva		
			Comercial		
			Oficinas		
Almacenamiento					
Lugar de reunión					
Otros:					
Caracterización cualitativa de la estructura					
Tipo de sistema estructural		Clasificación según ERN-CAPRA T2-5		Tipo de diafragma	
Tugurio		Tipo:		Rígido	
Adobe		Descripción:		Flexible	
Pórticos de concreto resistentes a momento				Sin diafragma	
Mampostería confinada				Miembros no sismo-resistentes	
Muros de madera				Tanques elevados	
Mampostería simple				Balcones	
Mampostería reforzada				Parapetos	
Muros de concreto prefabricado				Escaleras externas	

ANEXO 4

Otros:			Otros:
Evaluación general sobre el estado de la estructura al momento de la inspección			
Tipo de cubierta		Estado de conservación	
Losa de concreto		Excelente	
Liviana (lámina de zinc)		Bueno	
Pesada (teja de barro)		Regular	
Otros:		Pobre	
		Muy pobre	
Consideraciones finales y reglamentación vigente al momento de construcción de la edificación			
Observaciones adicionales		Código sísmico vigente	
		Previo a 1974	
		Período entre 1974 y 2001	
		Después de 2002	
		Regularidad de la estructura	
		Número de plantas	
		Regularidad	

Fuente: Microsoft office; Excel 2013

Referencias

- Abad, A; Servín, L. (1987). **Introducción al Muestreo**. México: Editorial Limusa.
- Alvarado, G., Barquero, R., Taylor, W., Mora, M., Peraldo, G., Salazar, G., y Aguilar, T. (2009). **Geología de la Hoja de San Isidro, Costa Rica**. Revista Geológica de América Central. (40), 111-122p.
- Barquero, R. (2010). **La Amenaza Sísmica en la Zona De Cartago**. Instituto Costarricense Electricidad UEN Proyectos y Servicios Asociados C.S. Exploración Subterránea. 9p.
- Bonett, R. (2003). **Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos en Zonas de Amenaza Alta y Moderada**. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña.
- Boschini, I., Alvarado, G., y Rojas, W. (1988). **El Terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón (Julio 3, 1983): Evidencia De Una Fuente Sísmogénica Intraplaca Desconocida en Costa Rica**. Revista Geológica de América Central. (8), 111-121p.
- Caballero, A. (2007). **Determinación de la Vulnerabilidad Sísmica por Medio del Método del Índice de Vulnerabilidad en las Estructuras Ubicadas En El Centro Histórico de la Ciudad de Sincelejo, Utilizando la Tecnología del Sistema De Información Geográfica**. (Tesis de Maestría). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Colombia.
- Climont, A., Rojas, W., Alvarado, G., y Benito, B. (2008). **Evaluación de la Amenaza Sísmica en Costa Rica**. NORSAR. Proyecto RESIS II-Informe técnico. 131p.
- Climont, A., Taylor, W., Strauch, W., Villagran, M., Dahle, A., y Bungum, H. (1994). **Spectral Strong Motion Attenuation in Central America**. NORSAR. Reporte Técnico 2-17. 63 p.
- Climont, A. et al. (2003). **Amenaza Sísmica y Vulnerabilidad Física en la Ciudad de Cañas, Guanacaste, Costa Rica**. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. 27p.
- Cochran, W. (1983). **Técnicas de Muestreo**. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2010). **Código Sísmico de Costa Rica 2010**. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 400p.
- Das, R., Wason, H. R., & Sharma, M.L. (2011). **Global Regression Relations for Conversion of Surface Wave and Body Wave Magnitudes to Moment Magnitude**. Nat Hazards. doi: 10.1007/s11069-011-9796-6.
- EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE. (2006). **Guidelines for Developing an Earthquake Scenario**. Oakland, California: FEMA, Department of Homeland Security.
- ERN-CAPRA, América Latina. **Caracterización Local de la Vulnerabilidad De Edificaciones**. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-5. Costa Rica. 66p.
- ERN-CAPRA, América Latina. **Componentes Principales del Análisis de Riesgo**. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-1, 27p.
- ERN-CAPRA, América Latina. **Modelos de Evaluación De Amenazas Naturales y Selección**. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-3. El Salvador. 35p.
- ERN-CAPRA, América Latina. **Riesgo Sísmico de los Activos Públicos De Costa Rica**. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-8, 25p.
- ERN-CAPRA, América Latina. **Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura**. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-5, 48p.
- FEMA, (2015). **Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards**. Third Edition. Applied Technology Council. Washington, DC. 338p
- Fernández, C; Santana, G. (1990). **Bases Para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica En Estructuras Existentes**. Laboratorio de

- Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica. 10p.
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis). (2016). **Glosario sismológico**. Venezuela: Ministerio de Poder Popular para Educación Universitaria, Ciencia y Tecnología. Recuperado de <http://www.funvisis.gob.ve/glosario.php#A>
- González Víquez, C. (1994). **Temblores, Terremotos, Inundaciones y Erupciones Volcánicas En Costa Rica 1608-1910**. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Güendel, F., Protti, M. (1998). **Sismicidad y Sismotectónica De América Central**. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. 33p.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). **X Censo Nacional de Población y Vivienda: Cifras Preliminares de Población y Vivienda**. Segunda Edición. San José, Costa Rica. 46p.
- Jiménez, D. (2012). **Diagnóstico de Vulnerabilidad Sísmica en Cartago, Costa Rica**. (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Llanos, L., Vidal, L. (2003). **Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Escuelas Públicas de Cali: una Propuesta Metodológica**. (Tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Linkimer, L. (2008). **Relationship between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica**. Revista Geológica De América Central, (38), 81-94.
- Linkimer, L., & Alvarado, G (2014). **Distribución Espacio-Temporal de la Sismicidad Sentida en Costa Rica (1976-2013) en el Marco Histórico del 30 Aniversario (1982-2012) De La Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE)**. Revista Geológica de América Central. Número especial 2014: 30 Aniversario. 47p.
- Magallón, F.; Segura, C. (1991). **Cómo Enfrentar un Terremoto: Manual para Docentes**. Costa Rica: Editorial UNED.
- Molina, E., Marroquín, G., Escobar, J., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A.,...Lindholm, C. (2008). **Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica**. NORSAR. Proyecto RESIS II-Informe técnico. 237p.
- Montero, W. (2001). **Neotectónica de la Región Central De Costa Rica: Frontera Oeste de la Microplaca de Panamá**. Revista Geológica De América Central, 24: 29-56. Costa Rica.
- Mora, M., Peraldo, G. (2011). **Análisis Macrosísmico del Terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón, 3 de Julio de 1983 (Ms=6.1), Costa Rica**. Revista Geológica de América Central. (44), 41-70p.
- Ortiz, E.; Soto C. (2014). **Atlas Digital de Costa Rica**. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Poch, A. (1972). **Curso De Muestreo y Aplicaciones**. Graficas Halar, Madrid. 375p.
- Protti, M., Güendel, F., y Malavassi, E. (2001). **Evaluación Del Potencial Sísmico de la Península De Nicoya**. Heredia, Costa Rica: Editorial Fundación UNA.
- Red Sismológica Nacional. (2001). **Resumen de la Actividad Sísmica y Volcánica Durante el Año 2001**. Revista Geológica De América Central, 26: 101-105. Costa Rica
- Red Sismológica Nacional. (2011). **Resumen de la Actividad Sísmica Y Volcánica Durante el Año 2010**. Informe Anual De Sismos Sentidos Y Actividad, 44. Costa Rica.
- Rezapour, M., & Pearce, R, G. (2007). **Relation between Seismic Moment M_0 and Surface Wave Magnitude**. Journal of Science, Islamic Republic of Iran. (18(2)), 151-157p.
- Rojas, W. (1993). **Catálogo De Sismicidad Histórica y Reciente en América Central: Desarrollo y Análisis**. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. 91p.
- Sauter, F. (1989). **Fundamentos de Ingeniería Sísmica V.1. Introducción a la Sismología**. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Schmidt, V. (2014). **Ecuaciones Predictivas del Movimiento del Suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010**. Revista Geológica de América Central. (50), 7-37p.
- Scordilis, E. M. (2006). **Empirical Global Relations Converting Ms and Mb to Moment Magnitude**. Journal of Seismology. (10), 225-236p. doi: 10.1007/s10950-006-9012-4.
- Villanueva, J, C. (2015). **Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Cartago, Costa Rica**. (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Vizconde, A. (2004). **Evaluación De La Vulnerabilidad Sísmica De Un Edificio Existente: Clínica San Miguel, Piura.** (Tesis de pregrado). Departamento de ingeniería civil, Universidad de Piura, Piura.
- Wald, D., Quitoriano, V., Heaton, T., & Kanamori, H. (1999) **Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California.** *Earthquake Spectra.* (15(3)), 557-564p.
- Wald, D., Worden, B., Quitoriano, V., & Pankow, K. (2006). **Shakemap Manual.** *U.S. Geological Survey.* 156p.
- Walpole, R., Myers, S., Myers, K. (2012). **Probabilidad y Estadística para Ingeniería Y Ciencias.** México: Pearson Education.
- Wang, Z. (2010). **Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives.** Springer Basel A G. doi: 10.1007/s00024-010-0148-3.
- Wells, D., Coppersmith, K. (1994). **New Empirical Evidence among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement.** *Bulletin of the Seismological Society of America.* (84), 974-1002p.