Aplicación de la metodología HAZUS MH en análisis de riesgo sísmico en la infraestructura del anillo metropolitano de transporte de electricidad.

Geógrafo Sergio Arce Sánchez
Área de Análisis de Riesgos
Instituto Costarricense de Electricidad - I.C.E.
San José, Costa Rica
2011

Introducción

La geografía como una ciencia integradora busca analizar la forma en que se interrelacionan los eventos naturales y/o antrópicos, así como los efectos que estos ocasionan en las sociedades a través del tiempo en espacios determinados, por lo tanto el tema de los desastres naturales y los efectos que estos generen en el desarrollo normal de las sociedades, constituye un campo de interés por parte de la geografía.

El realizar estudios de riesgos aplicando metodologías integrales, nos permite involucrar las consecuencias de los fenómenos naturales extremos, para estimar y planificar las capacidades de respuesta de la sociedad. Esto puede lograrse a través de la aplicación de metodologías como las desarrolladas por FEMA (Federal Emergency Management Agency), denominada HAZUS MH.

Los estudios de los fenómenos naturales y su comportamiento, han avanzado mucho en los últimos años en materia de aplicaciones, tecnologías, instalación de redes de información, etc., con lo cual se han dejado por fuera los efectos y el comportamiento social, ya que muchas veces al hablar de riesgos desde un enfoque humano se cae en estimaciones de percepción, lo que lleva a una apatía investigativa por parte de otras disciplinas.

El determinar el comportamiento de los grupos sociales en el territorio en que se desarrollan y como pueden verse afectados por un evento natural, o por la existencia del riesgo en las líneas vitales y las diferentes infraestructuras que las conforman, es lo que determina realmente la importancia de estos estudios, en los cuáles no solo se deben analizar las características, sino que también el comportamiento fenómeno-social, antes, en el momento y posterior al evento según la componente de hostilidad o factor de riesgo presente o estimado.

Se debe analizar la relación y los rasgos de la organización de la población afectada, ya que para un mismo evento en un área pequeña, puede afectar con una intensidad diferente a sectores sociales de distinto nivel socioeconómico.

Todo esto conlleva a una serie de variables que se deben analizar, según su nivel social y económico para no caer en una discriminación de los efectos del evento, ya que una determinada situación ante un evento y el daño ocasionado, puede ser evaluado de distinta manera para una familia o grupo de muy bajo nivel económico y recursos, así como en la capacidad de recuperación de una familia, con una situación económica que les permita afrontar la adversidad del mismo evento de manera menos estresante que una familia de

escasos recursos económicos, este efecto aplica no solo a las familias, sino que también se puede aplicar en las diferencia económicas y culturales entre regiones, países, cantones, ciudades e incluso barrios en una misma ciudad.

En cuestiones de escalas de análisis, estas no deben ser necesariamente coincidentes, ya que se puede perder el análisis de los efectos en la sociedad, si se parte de la escala que describe el fenómeno, la cual se desarrolla a nivel regional, se corre el riesgo de no identificar los efectos en lo social, los cuales tienden a medirse a nivel local, vecinal y de barrio.

De esta manera se puede señalar las características y la probabilidad de que el evento catastrófico se produzca, así como estimar las posibles pérdidas de vidas humanas y bienes, buscando obtener un mayor alcance del análisis de riesgo en una sociedad de un territorio determinado para unas condiciones dadas.

En el caso de las líneas vitales y específicamente el caso de las líneas de transmisión eléctrica, se debe identificar las amenazas y vulnerabilidades, al que el sistema está expuesto para hablar de riesgo en el sistema de transporte eléctrico, para llegar a valorar sus efectos en la sociedad.

Se vuelve necesario el identificar y aplicar herramientas que permitan estimar de manera cuantificable y económica, las posibles pérdidas tanto materiales y humanas, que ocasionaría un sismo de magnitud considerable en un área determinada, que históricamente se haya comportado como una zona de alta sismicidad.

Mediante la aplicación de la metodología de HAZUS MH, se realizará un análisis del impacto que generaría un sismo de intensidad entre 6,0 y 6,5 en la escala de Richter, en la red del sistema de transmisión eléctrica y sus diferentes estructuras, la cual brinda servicio de energía eléctrica al Área Metropolitana.

Objetivos

General

Analizar el riesgo sísmico y los efectos socioeconómicos que ocasionaría el corte del Sistema de Transmisión Eléctrica del Anillo Metropolitano de San José, basado en datos de sismicidad históricos.

Específicos

- Aplicar la metodología de HAZUS MH, para la estimación de daños y simulaciones de eventos sísmicos, mediante el uso de la herramienta de los Sistemas de Información Geográfica.

- Aplicar modelos de aceleraciones pico del terreno (P.G.A.), para obtener probabilidad de eventos sísmicos, según la sismicidad histórica asociada en el área de estudio.

- Modelar el daño en la infraestructura del sistema de transporte eléctrico del Instituto Costarricense de Electricidad en el Anillo Metropolitano, circundante al cantón de San José.

- Determinar los posibles daños que sufrirían los elementos del Sistema de Transmisión Eléctrico, que provee de energía al cantón central de San José y cantones circundantes en el Área Metropolitana.

- Determinar los efectos de los eventos simulados en algunas de las zonas socioeconómicas involucradas en el área de estudio.

Síntesis de la metodología

De acuerdo con el esquema de que propone la metodología HAZUS MH (figura 2), se presenta a continuación una síntesis de los pasos desarrollados en la metodología para la estimación del riesgo sísmico en el sistema de transmisión de electricidad en el Anillo Metropolitano, la misma se puede observar en la figura 1.

1. Se investigó sobre algunas metodologías utilizadas en los análisis de riesgo sísmico, tales como RADIUS, HAZUS MH, etc., se define cual utilizar en el presente estudio.

2. Se decide tomar como referencia los elementos que toma en cuenta la herramienta HAZUS MH, para el análisis de riesgo sísmico, ya que algunos insumos se tienen a la mano, o por lo menos existe la manera de recopilarlos y modelarlos.

3. Se escoge la temática de amenaza, vulnerabilidad sísmica y daños en el sistema de transmisión eléctrica y sus efectos en algunos de los cantones que comprenden el Área Metropolitana de San José.

4. Se revisó bibliografía referente a los temas relacionados con riesgo, amenaza y vulnerabilidad sísmica, geografía de los riesgos naturales.

5. Se revisó información histórica disponible de eventos sísmicos catastróficos y registros de daños en el sistema de transmisión de electricidad, como por ejemplo el del terremoto de Limón y el de Piedras Negras de Puriscal, que causo daños considerables en la ciudad de Alajuela y alrededores.

6. Se identifican y localizan los sitios para la simulación de 2 escenarios sísmicos, tomando como referencia los sismos de 1910, que dañaron la ciudad de Cartago y el otro sismo probable al sur de la ciudad de San José.

7. Se procede a la simulación de los escenarios sísmicos, utilizando el método determinístico para el Área Metropolitana. Mediante la utilización del Software de Sistemas de Información Geográfico I.L.W.I.S., desarrollado por el I.T.C. de Holanda, ArcGIS 8.1 de ESRI, ArcView 3.3 de ESRI.

8. Se digitaliza y reclasifica el “Mapa de Espesores de Materiales No Consolidados en el Área Metropolitana de San José” elaborado por Climent y Bolaños (1999), con el fin de obtener un mapa de espesores de roca y suelo, según lo establecido por Joyner and Boore (1981, 1982).

9. Se clasificarón y combinarón el mapa Geológico del la hoja ABRA elaborado por Denyer y Arias (1990), y las pendientes en valor porcentual de la pendiente, derivado de la cartografía TERRA 1998, para establecer el comportamiento esperado en condiciones de atenuación sísmica.

10. Se aplican las ecuaciones de atenuación sísmica para Costa Rica y Centroamérica, desarrollada por Climent y otros (1999), para modelar mapas de amenaza sísmica por el método determinístico.

11. Se obtienen los datos de aceleración pico, para el Área Metropolitana de San José, y se reclasifican para obtener su equivalente en la Escala de Mercalli Modificada.

12. Se ubican los elementos que comprenden la infraestructura del Sistema de Transmisión Eléctrica en el Anillo de 138 Kv y 230 Kv. Se realiza un análisis Topológico y Diacrónico del Sistema de Transmisión Eléctrico, para el área de estudio.

13. Mediante la aplicación de las curvas de daño, que utiliza HAZUS MH, se estima los valores de pérdida esperados, para los diferentes elementos del Sistema de Transmisión Eléctrica, según el grado de amenaza sísmica en el que se encuentren expuestas las obras del Sistema.

14. Se analizan algunos efectos en los cantones, donde el Anillo de Transporte Eléctrico tiene influencia, mediante mapas con información demográfica y económica del censo realizado en el año 2000 por el I.N.E.C., realizando estimaciones de vulnerabilidad.

15. Se identifican con los escenarios de amenaza sísmica y la infraestructura del sistema de transporte eléctrico, los elementos más vulnerables del sistema y sus efectos en algunos de los cantones que integran el Área Metropolitana de San José, tomando como referencia las bases de datos disponibles en la institución de los segmentos censales, desarrollados a partir del censo del año 2000, con la finalidad de evaluar y establecer una vulnerabilidad social.

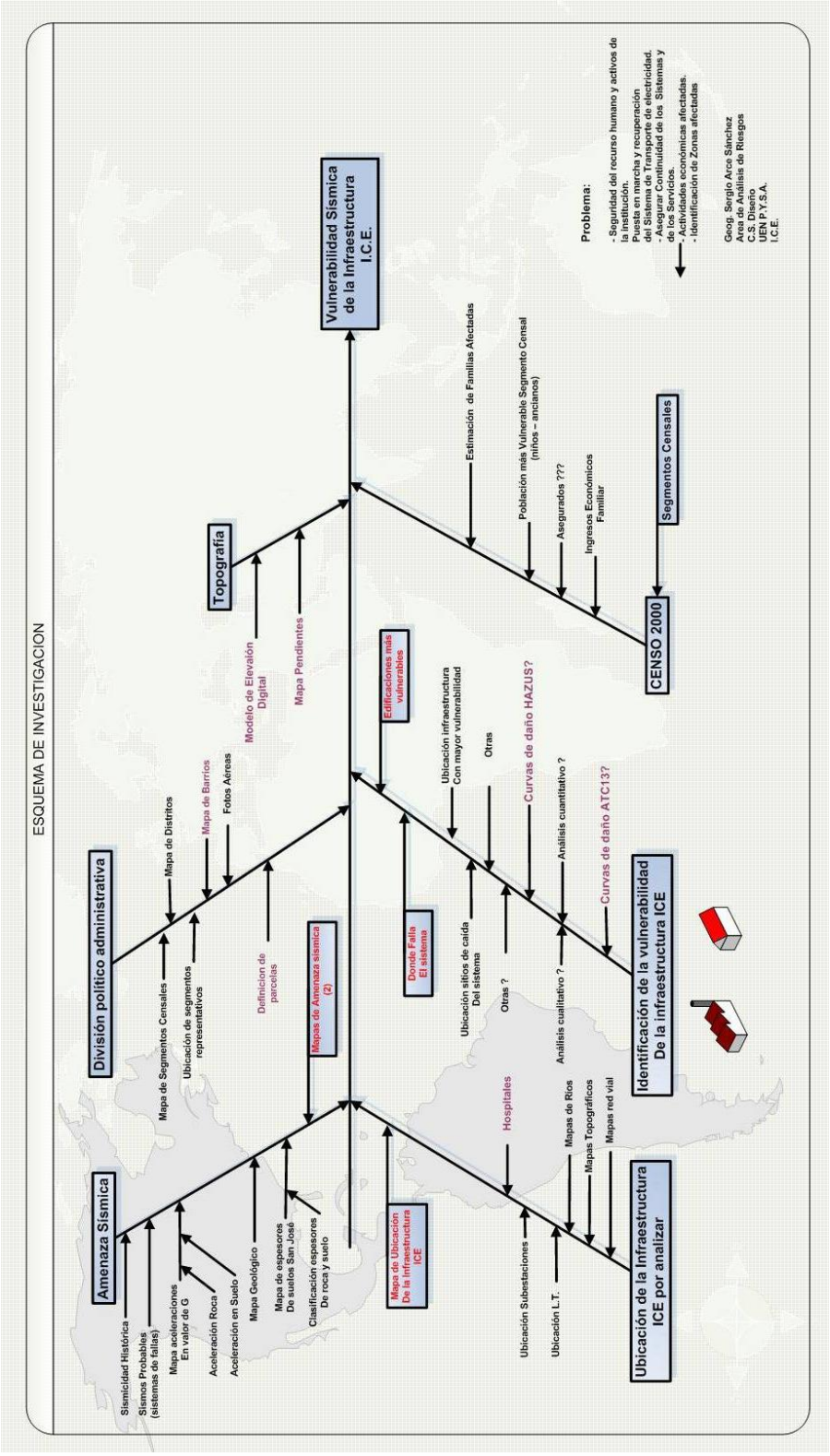


Figura 1. Esquema de la metodología de investigación a seguir.
Fuente: S. Arce, 2009.

Metodología HAZIS MH

La metodología HAZUS MH, fue desarrollada por La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, 1999), de los Estados Unidos de Norteamérica. Esta herramienta metodológica surge como una necesidad por parte de los planificadores y especialistas en la atención de los efectos generados por los desastres naturales.

En HAZUS MH, se contemplan una serie de variables que se interrelacionan para obtener posibles daños materiales en infraestructura y sus efectos en la sociedad.

Dentro de las variables que se contemplan están:

- La simulación de escenarios sísmicos, a partir de los que se obtienen mapas de aceleración pico del terreno que luego se reclasifican para obtener valores de intensidad de Mercalli Modificada.
- La utilización de ecuaciones de atenuación sísmica del terreno.
- Se realiza un inventario de las infraestructuras involucradas y que se pueden ver afectadas por el sismo, se consultan mapas de suelos y sus características de respuesta ante el efecto de las ondas sísmicas.

En la figura 2 se muestra la estructura metodológica de HAZUS MH, con las diferentes variables que se introducen en el programa.

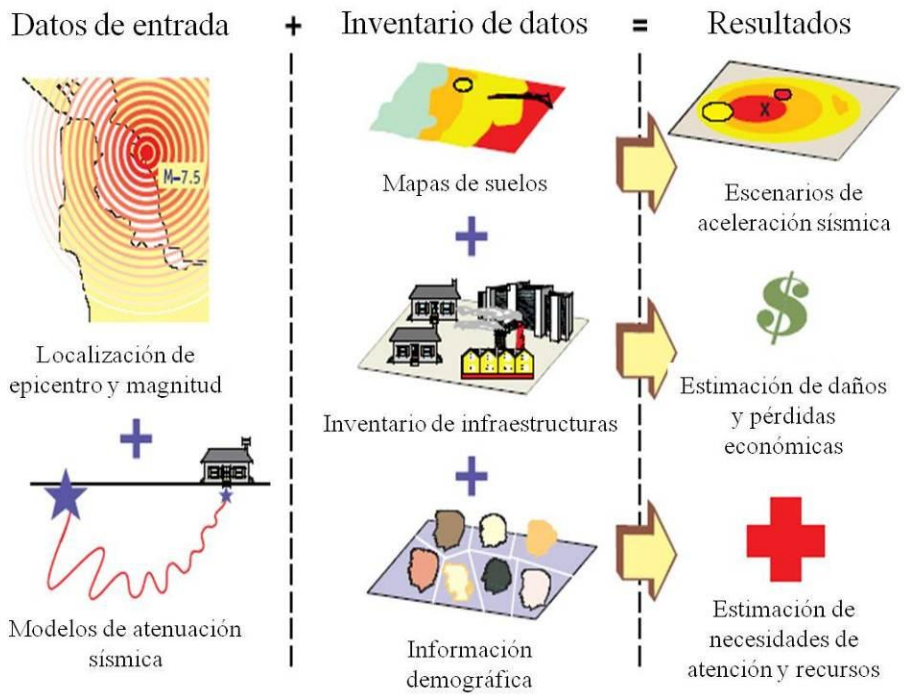


Figura 2. Esquema de la metodología del programa HAZUS MH.
Fuente: FEMA 2008.

Para la utilización del programa HAZUS MH y la aplicación de la metodología, en la estimación de pérdidas y evaluación de la vulnerabilidad, se deben crear bases de datos que contengan datos específicos en los cuáles se señalan las características estructurales propias de cada edificación y estructura.

El software es una herramienta, con la cual se puede recolectar y ordenar inventarios de datos, además está en la capacidad de utilizar tecnologías de SIG, y de esta manera proporcionar mapas detallados y reportes analíticos que describen las posibles pérdidas potenciales en las edificaciones, ante el suceso de un evento sísmico de magnitud considerable.

El modelado de los escenarios para la evaluación de la amenaza sísmica.

El modelado de los escenarios sísmicos, se realiza mediante una metodología que puede desarrollar el análisis de la amenaza de una manera determinística o de una manera probabilística, mediante las cuales se busca integrar la información y el conocimiento sismo-tectónico de una región, con el fin de establecer el grado de intensidad sísmica que se podría dar en la región de estudio.

Método determinístico

El método determinístico utiliza la definición de escenarios sísmicos basados en el conocimiento actual de las condiciones sismo-tectónicas de la región. En la figura 3 se muestra un esquema simplificado del método determinístico, en la cual se inicia por definir las principales fuentes sísmicas o fallas con actividad sísmica y tectónica reciente y que son las que establecen la amenaza sísmica en la región a evaluar.

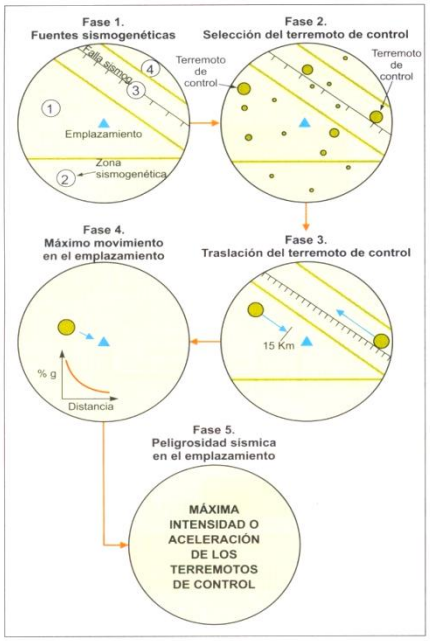


Figura 3. Esquema simplificado para la estimación de la amenaza sísmica por el Método Determinístico.
Fuente: Ingeniería Geológica, González de Vallejo, 2002.

Los resultados del método determinista pueden dar conclusiones sumamente conservadoras, excepto cuando se trate de instalaciones cuya seguridad se viera seriamente condicionada por las consecuencias inaceptables de un fallo por causas sísmicas. (González de Vallejo, 2002).

Método probabilístico.

El método probabilístico permite analizar condiciones bajo las cuales ocurrieron los eventos generadores de amenazas y asociarle probabilidades de ocurrencia según niveles de intensidad (figura 4).

Para los métodos probabilísticos se obtienen leyes de recurrencia a partir de la sismicidad registrada, resultando curvas de probabilidad para diferentes niveles de movimientos.

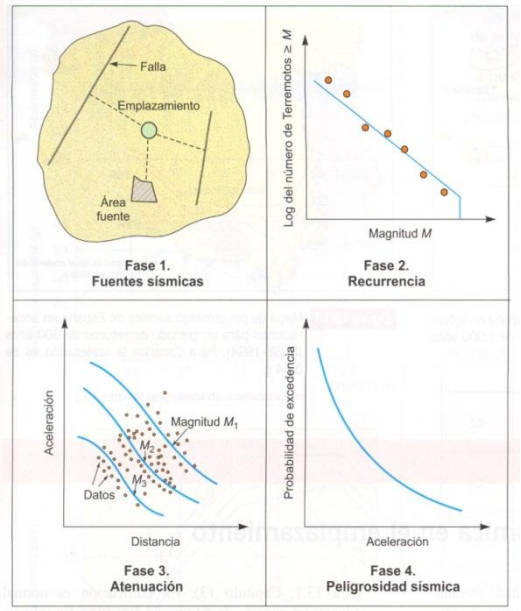


Figura 4. Esquema simplificado para la estimación de la amenaza sísmica por el Método Probabilístico.
Fuente: Ingeniería Geológica, González de Vallejo, 2002.

Ecuaciones de atenuación sísmica

La estimación de la amenaza sísmica será determinada con base en el conocimiento de la sismicidad histórica que permite el establecer los escenarios sísmicos específicos y el potencial de las fuentes sísmicas.

Tomando la información sismo-tectónica de la región se pueden establecer los escenarios y las fuentes sísmicas, luego se aplica una ecuación de atenuación que permite obtener valores de aceleración horizontal pico tanto para condición de suelo como de roca.

Ecuaciones de atenuación para Centroamérica y Costa Rica.

Para el cálculo de los valores de aceleración horizontal pico del terreno, se utilizará la ecuación propuesta por Climent *e.t al*. (1994), desarrollada para la región de América Central. Esta ecuación permite obtener valores de aceleración horizontal pico tanto para condición de suelo como de roca, y está representada por la siguiente expresión:

Condición de Suelo:

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

Condición de Roca:

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

Tenemos que:

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

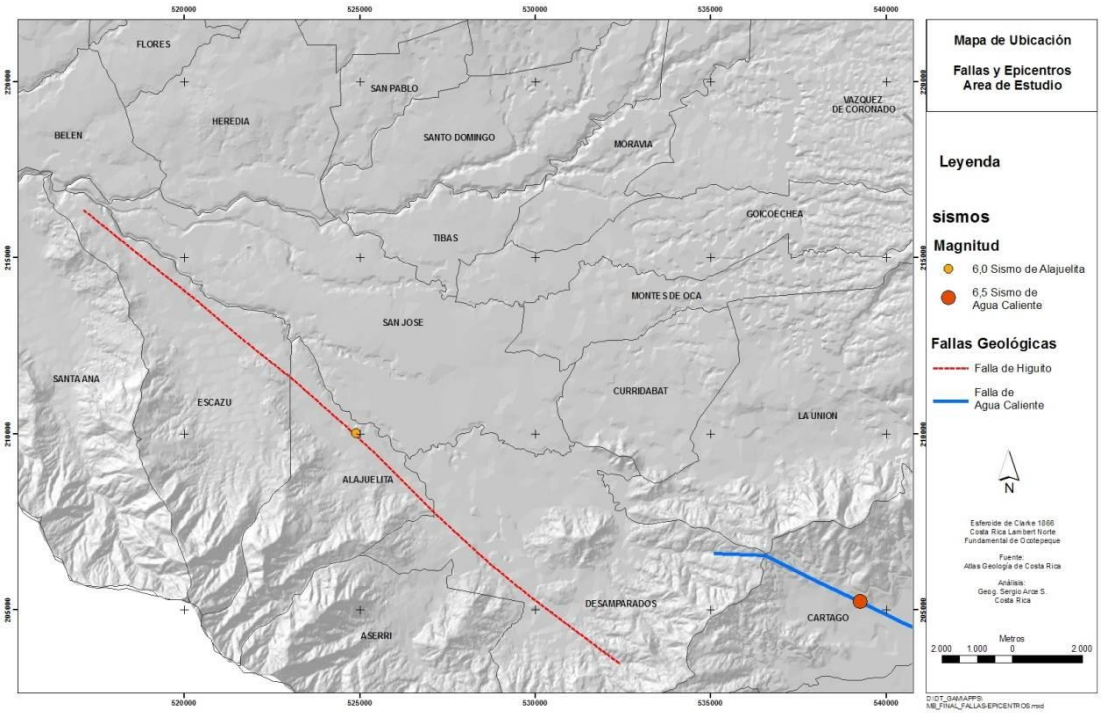
La ecuación anterior relaciona el nivel de aceleración con el tamaño del sismo (magnitud), la distancia de ocurrencia del evento y la condición de la geología superficial local del sitio a evaluar. A partir de los escenarios sísmicos planteados se utilizaran los valores de **M** y del mapa de distancias los de **r**; y la condición de sitio será obtenida por medio de mapas de espesores de materiales no consolidados y mapas geológicos disponibles de la región, reclasificando las diferentes unidades litológicas de acuerdo con su condición físico-mecánica cualitativa. El mapa resultante se puede considerar como una macro zonificación.

Resultados

Identificación de las fuentes sísmicas y definición de epicentros

Para la ubicación de los epicentros se realizó un análisis de la información que contienen la sismicidad histórica en el área de estudio, provenientes del "Estudio de micro zonificación sísmica para el valle central de Costa Rica" (1993).

Se identificaron las fuentes sísmicas, y luego se determinó un sismo para la zona que comprende la Falla de Higuito con una intensidad de 6.0 grados en la escala de Richter, el cual se identifica como Sismo de Alajuelita, luego se define otro evento de 6.5 grados Richter para el caso de la Falla de Agua Caliente (mapa 1), misma que de acuerdo con informes fue la que generó los sismos que ocasionaron destrucción en la ciudad de Cartago y el sur de San José en el año 1910, específicamente el sismo del 4 de mayo de ese mismo año, dejando un saldo de 700 muertos y con un costo de ¢ 405.408 en la reconstrucción según la contabilidad nacional de 1910 (Proa - La Nación, 10/5/2009).
Con esta información se realizaron los análisis y simulaciones necesarios para desarrollar los 2 escenarios de estudio de amenaza sísmica.



Mapa 1: Ubicación de Fallas y epicentros seleccionados para el área de estudio.
Fuente: Atlas Geológico de Costa Rica, (2003).

Los escenarios sísmicos más adversos para la ciudad de San José y el Área metropolitana de San José serían:

- Un evento sísmico de magnitud Mw = 6.5, ocurriendo en el segmento de falla conocido como Tablazo o Falla Quebrada Honda del Sistema Agua Caliente, con una profundidad de 10 km.

- Evento sísmico de magnitud Mw = 6.0, ocurriendo en el segmento de falla conocido como Alajuelita, del sistema de Falla Escazú – Aserrí, a una profundidad de 10 km.

Condición de geología y pendientes clasificados

Para la obtención del mapa clasificado de roca y suelo derivado de la geología y las pendientes se utilizó información de las bases de datos del mapa litológico realizado por Denyer y Arias (1991). En este caso se clasificaron las diferentes litologías de acuerdo a las posibles susceptibilidades de desarrollo de espesores de suelo considerables y según la relación con diferentes porcentajes de pendientes, tal como se muestra en la figura 5.

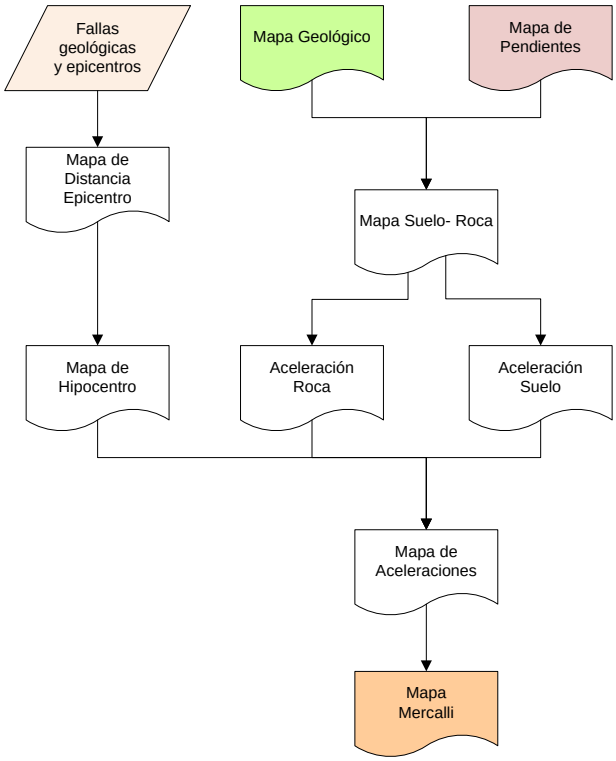


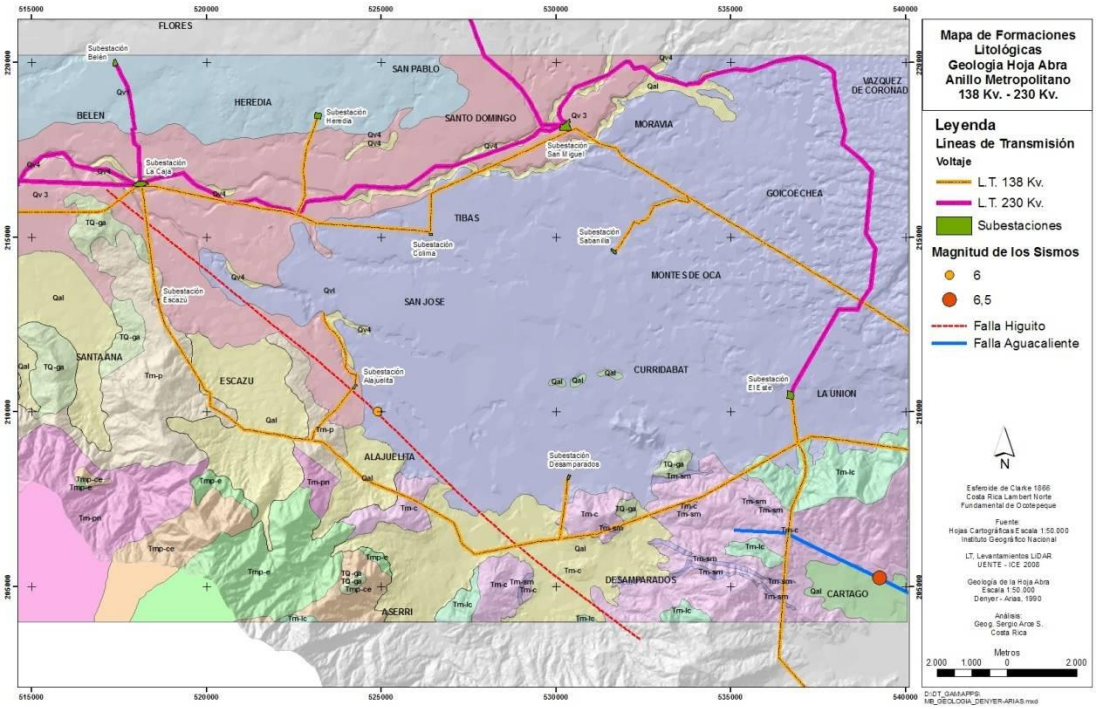
Figura 5. Esquema de Análisis de Amenaza Sísmica por el Método determinístico para la Clasificación del mapa litologías y de Pendientes. **Fuente**: Arce, S. (2009).

Se desarrolló una matriz de clasificación en la cual se analizan las diferentes litologías y se establecieron rangos de pendientes que ayudan a estimar cual valor se podría dar en condición de suelo o roca, tabla 1.

Tabla 1: Comportamiento esperado en condiciones de atenuación sísmica según la estratigrafía y las pendientes.

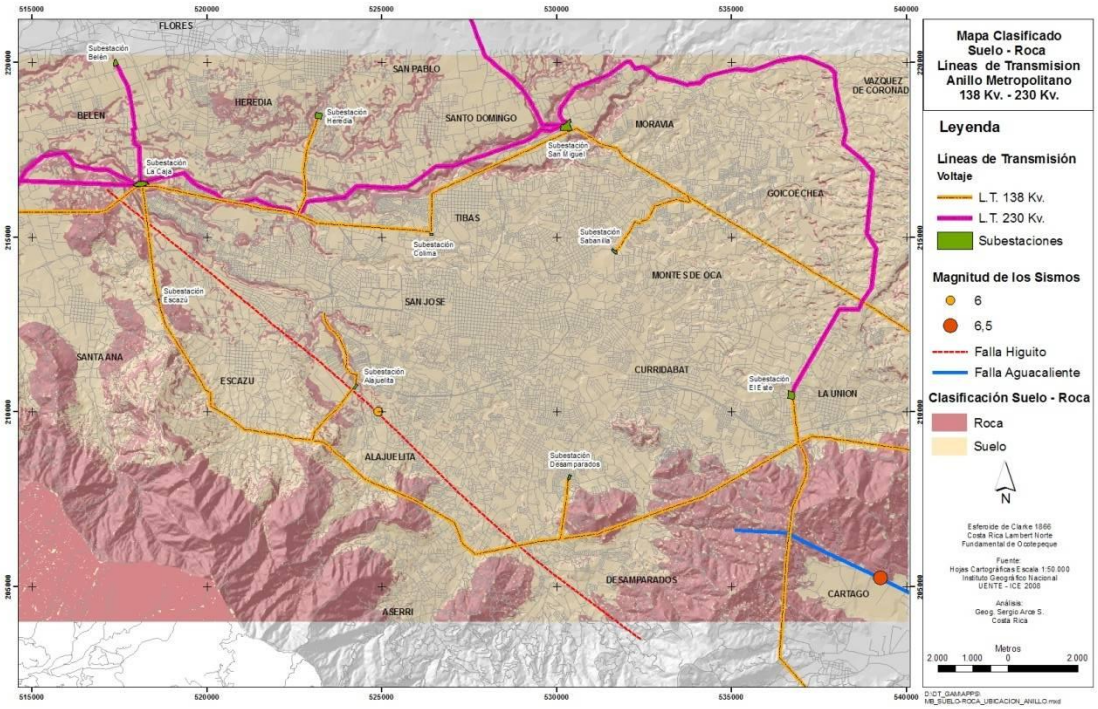
Clasificación de Estratigrafías y porcentaje de pendientes según el comportamiento esperado en condiciones de atenuación sismica						
			Pendientes en %			
Estratigrafía	**Característica**	**Código**	**0 - 5 %**	**5 -10 %**	**10 - 45 %**	**> 45 %**
Aluvión y coluvio	Aluvión y Coluvio	**Qal**	Suelo	Suelo	Suelo	Roca
Formación depósitos de avalancha ardiente	Dep. avalancha ardiente	**Qv3**	Suelo	Suelo	Roca	Roca
Formación Barva	Lavas y Piroclástos	**Qv1**	Suelo	Suelo	Roca	Roca
Formación Lavas Intracañon	andesitas	**Qv4**	Suelo	Roca	Roca	Roca
Lahares y Cenizas	Lahares y Cenizas	**Qvl**	Suelo	Suelo	Suelo	Roca
Formación Grifo Alto	andesitas y flujos piroclásticos	**TQ-ga**	Suelo	Suelo	Roca	Roca
Formación Coris	ortocuarsitas y tobitas	**Tm-c**	Suelo	Suelo	Roca	Roca
Formación La Cruz	basaltos, andeistas y tobas	**Tm-lc**	Suelo	Roca	Roca	Roca
Formación Pacacua	volcanoclastitas rojizas	**Tm-p**	Suelo	Suelo	Suelo	Roca
Formación Peña Negra	areniscas y lutitas negras	**Tm-pn**	Suelo	Suelo	Roca	Roca
Formación San Miguel	calizas	**Tm-sm**	Suelo	Roca	Roca	Roca
Cornubianitas de Escazu	cornubianitas de escazu	**Tmp-ce**	Roca	Roca	Roca	Roca
Intrusivo de Escazu	granodioritas	**Tmp-e**	Suelo	Roca	Roca	Roca

Fuente: Clasificación de acuerdo a recomendación del Dr. Olman Arias, 2008.



Mapa 2. Mapa de las Unidades Geológicas en el Área Metropolitana de San José.
Fuente: Elaborado por Percy Denyer y Olman Arias (1990).

Mapa 3. Mapa de Porcentaje de las Pendientes en el Área Metropolitana de San José.
Fuente: Cartografía TERRA, escala 1:25000, cada 10 metros (1996), Arce, S. (2008).



Mapa 4. Mapa clasificado Suelo – Roca, derivado del mapa geológico y el mapa de pendientes en el Área Metropolitana de San José. **Fuente**: Arce, S. (2008).

En el caso del mapa derivado de la geología y la clasificación de pendientes según lo establecido en la tabla 1, se observa que los valores denominados como Suelo en el mapa, se encuentran en la parte central y norte del área de estudio, como lo son los cantones de San José, Tibás, Montes de Oca, Goicoechea, Desamparados, Escazú y Santo Domingo.

Para los valores que se clasificaron como roca, estos están presentes en el sur de Desamparados, Escazú, Santa Ana, La Unión, así también se pueden observar algunos zonas de cañones profundos hacia el oeste de la ciudad de San José, donde se encuentran zonas con una clasificación de roca, estas áreas son los cañones de los ríos María Aguilar, Virilla, Torres, Tiribí y sus confluencias.

Mapas de amenaza para condiciones de geología y pendientes

Para el análisis de la amenaza sísmica en la estimación de condición suelo – roca, a partir de la estratigrafía y las características de atenuación sísmica de los materiales que la componen, en combinación con valores de las pendientes en porcentaje, y de acuerdo a lo establecido por el análisis determinístico, se procede a identificar y ubicar las fuentes sísmicas y se analiza el potencial sísmico de las mismas para establecer las intensidades de los probables sismos a estudiar.

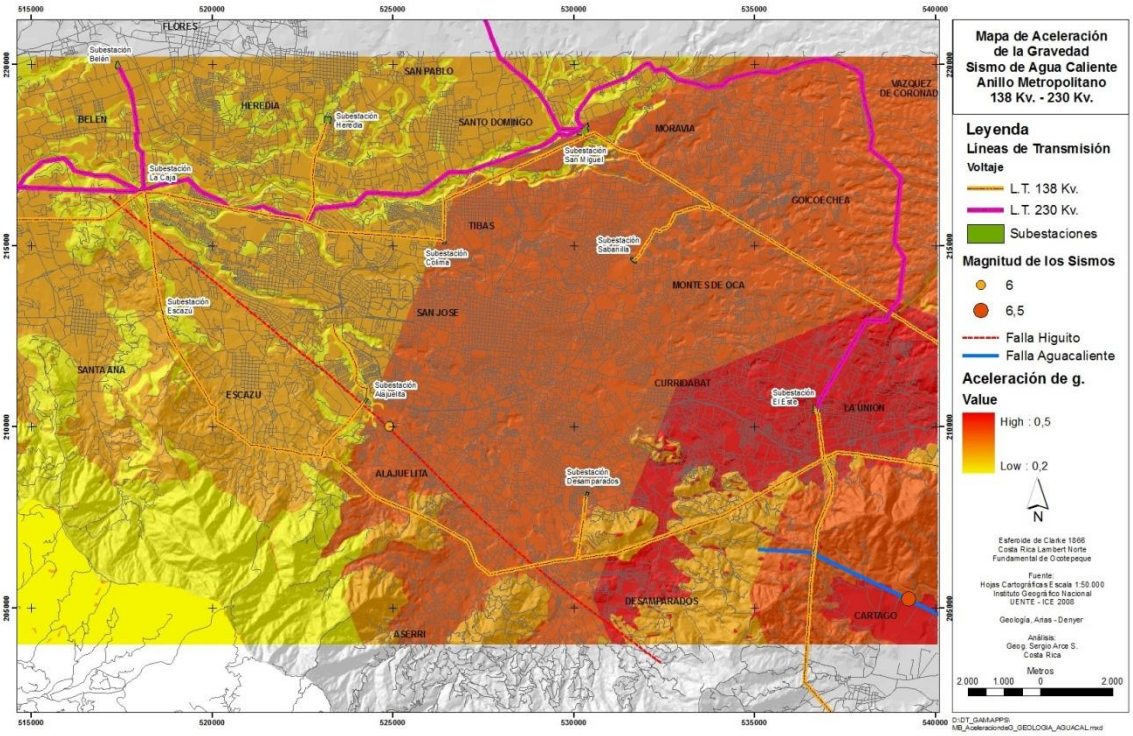
Se identifican los dos sistemas de fallas geológicas citados anteriormente, los cuales son el sistema de falla Escazú – Aserrí (falla Alajuelita), y el del sistema de falla Tablazo ó Quebrada Honda (falla Aguacaliente), para este último se define un sismo de simulación con intensidad similar a uno de los que generó destrucción en la ciudad de Cartago y daño parte de la ciudad de San José en el año de 1910.

Para el caso del sismo de Alajuelita se le asigna una intensidad de 6 grados en la escala de Richter en la Falla de Higuito, y en el caso de Agua Caliente, se le asignó una de 6.5 grados en la escala de Richter en la Falla de Agua Caliente.

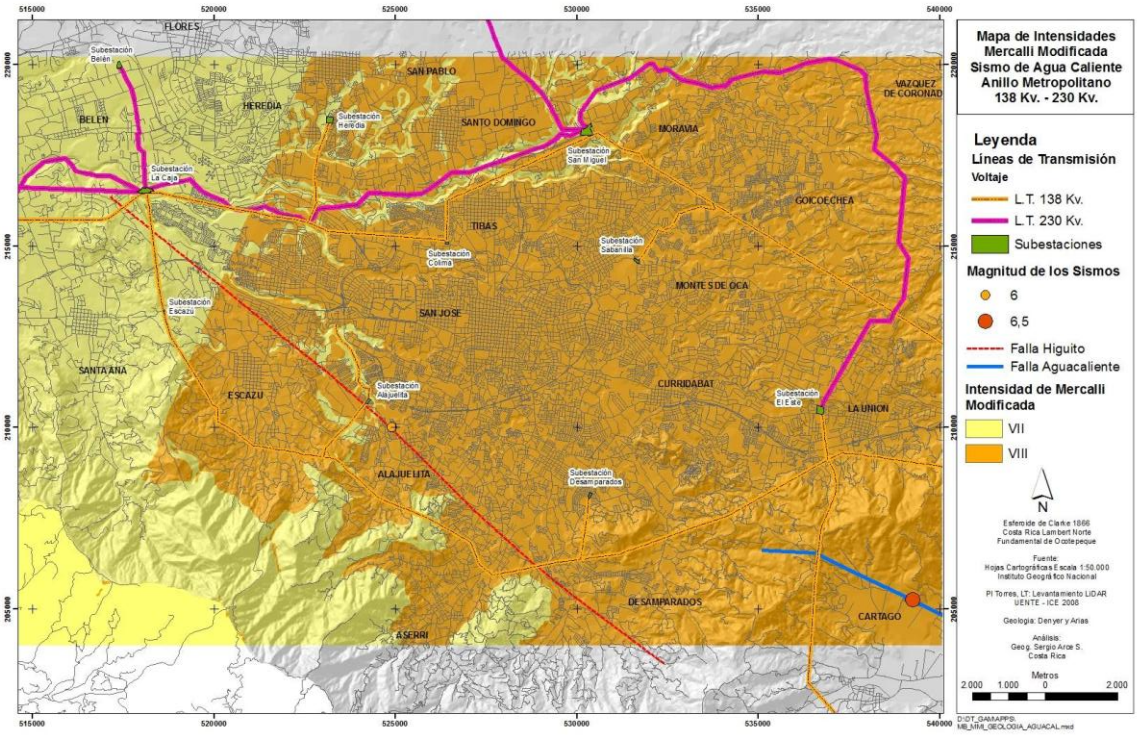
Mapas de aceleración e Intensidad Mercalli modificada: Sismo de Agua Caliente

Una vez establecido el mapa de suelo y roca, se procedió con el desarrollo de los cálculos de atenuación sísmica y reclasificación en valores de Intensidad Mercalli Modificada, para el sismo de Agua Caliente (mapa 5), en el caso de la simulación de este evento se observa que los valores mayores de aceleración pico del terreno se presentan en las zonas donde se ubican las subestaciones de El Este y Desamparados, donde se presentan valores de aceleración entre los 0.4 g. y 0.5 g., así también donde se ubican las subestaciones de Alajuelita, Sabanilla y San Miguel, se presentan valores importantes de aceleración de 0.3 g. hasta 0.4 g., en las subestaciones La Caja, Escazú y Heredia, se presentan valores de aceleración pico que están comprendidas entre los 0.2 g. y 0.3 g.

Cuando se reclasifica este mapa de aceleración pico del terreno en valores de Mercalli Modificada, se obtienen solamente 2 rangos, los cuales son VII y VIII. Para este caso las subestaciones de Escazú y La Caja obtienen valores de VII, mientras que el resto de las subestaciones así como las líneas de transmisión que las conectan tienen valores de VIII para la escala de Mercalli Modificada (mapa 6).



Mapa 5. Mapa de aceleración de g. para la simulación del evento de Agua Caliente, en el Área Metropolitana de San José, clasificado Suelo – Roca, derivado del mapa geológico y el mapa de pendientes en el Área Metropolitana de San José. **Fuente**: Denyer y Arias (1990), Arce, S. (2009).



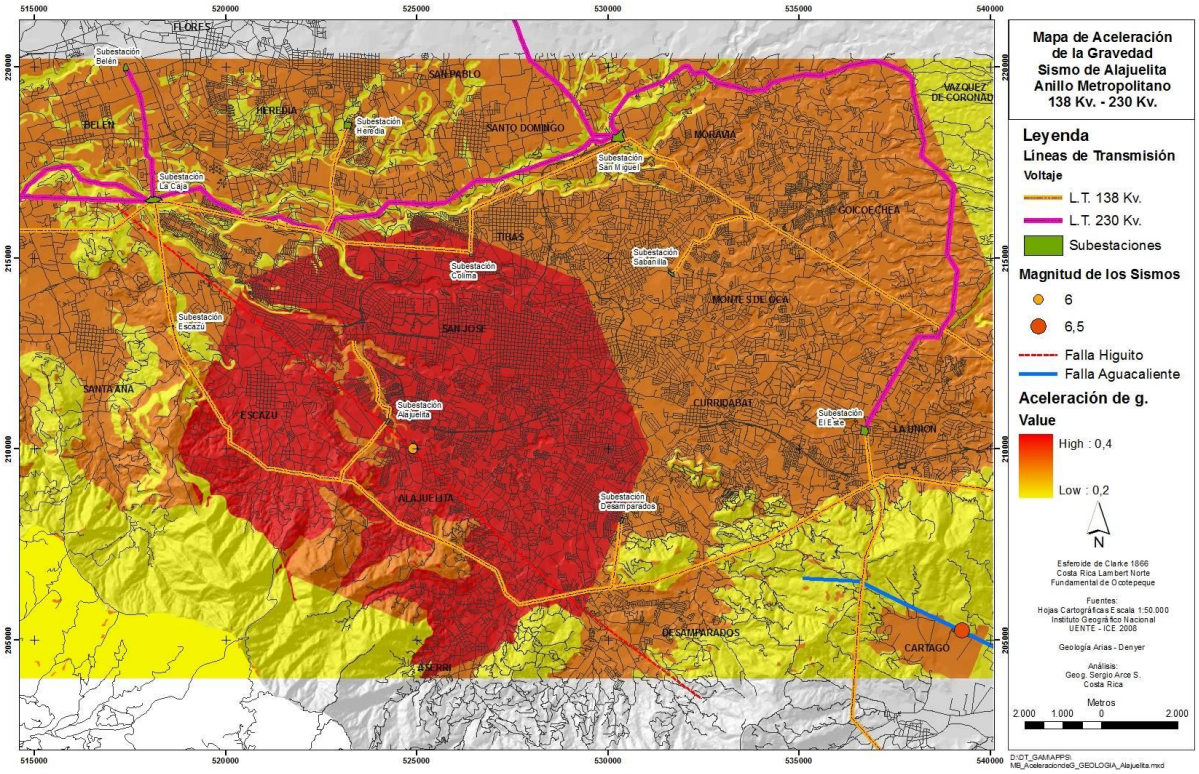
Mapa 6. Mapa de Intensidad de Mercalli Modificada de la simulación del evento de Agua Caliente, en el Área Metropolitana de San José.
Fuente: Denyer y Arias (1990), Arce, S. (2009).

Mapas de aceleración y Mercalli modificada: Sismo de Alajuelita

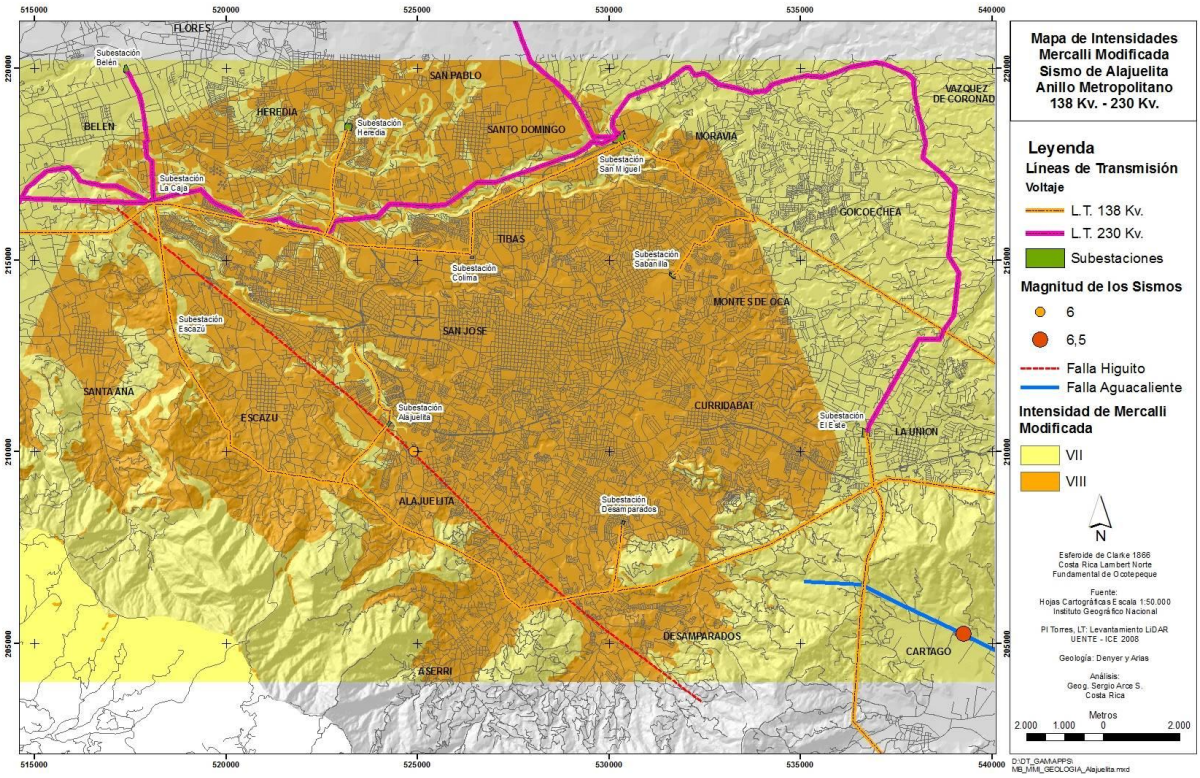
En el caso del sismo denominado como el de Alajuelita en esta simulación, se obtienen valores de aceleración pico del terreno de entre 0.2 g. y 4.0 g., para las subestaciones de Alajuelita, Desamparados y Colima, así como de las líneas de transmisión que las conectan, presentan los valores de 0.3 g. hasta 0.4 g., mientras que El Este, Sabanilla, San Miguel, Heredia, Escazú y La subestación La Caja, presentan valores aceleración de entre 0.2 g. y 0.3 g (mapa 7).

Se observa que para esta simulación, una parte importante del territorio de los cantones de San José, Escazú y Desamparados, presentan aceleraciones pico del terreno de 0.5 g., por lo tanto otros elementos del sistema como lo son, la distribución y agencias de servicio se

pueden ver afectadas por este nivel de aceleraciones, sobre todo las ubicadas hacia el sur del cantón de San José, que es donde se tiene una mayor densidad de población y condiciones de recuperación más difíciles, en atención de la población afectada y la recuperación de los servicios eléctricos.



Mapa 7. Mapa de aceleración de g. para la simulación del sismo de Alajuelita, en el Área Metropolitana de San José, clasificado Suelo – Roca, derivado del mapa geológico y el mapa de pendientes en el Área Metropolitana de San José. **Fuente**: Denyer y Arias (1990), Arce S. (2009).



Mapa 8. Mapa de Intensidad de Mercalli Modificada de la simulación del evento de Alajuelita, en el Área Metropolitana de San José.
Fuente: Denyer y Arias (1990), Arce, S. (2009).

Vulnerabilidad de las subestaciones y Líneas de Transmisión del Anillo Metropolitano

Sismo de Agua Caliente

Para analizar el daño esperado en las subestaciones del Anillo, bajo la condicion del evento simulado de un sismo en la Falla de Agua Caliente, se obtienen los valores de daño según lo establecido por HAZUS para subestaciones de voltaje bajo (ESSL) y voltaje medio (ESSM), correspondientes a las subestaciones de 138 Kv y 230 Kv respectivamente.

El grado de daño esperado de acuerdo a lo que se establece por la metodología HAZUS MH, se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Grados de daño esperado para las subestaciones de acuerdo al valor de aceleración pico del terreno, Sismo de Agua Caliente.

Subestación	Voltaje	Clasificación HAZUS	aceleración pico del terreno % de Gravedad	Estado de Daño
ST La Caja	138 Kv / 230 Kv	ESSM	30	moderado / extenso
ST Escazú	138 Kv	ESSL	20	menor / moderado
ST Alajuelita	138 Kv	ESSL	30	moderado / extenso
ST Desamparados	138 Kv	ESSL	40	Extenso
ST El Este	138 Kv	ESSL	50	extenso / completo
ST Sabanilla	138 Kv	ESSL	40	extenso
ST San Miguel	138 Kv / 230 Kv	ESSM	40	extenso
ST Colima	138 KV	ESSL	40	extenso
ST Heredia	138 Kv	ESSL	20	menor / moderado

Fuente: Manual Técnico de HAZUS MH, (2000). Arce, S..

En el caso del evento simulado para un sismo en la Falla Agua Caliente, tenemos que las subestaciones ST Colima, ST San Miguel, ST Sabanilla y ST Desmparados, entrarian en una clasificación de daño extenso según los valores registrados en la simulación y de acuerdo con el grado de daño que asignan las tablas y curvas de daño de HAZUS.

Para estas subestaciones se podrían ocasionar daños de un 70% por desconexión de los interruptores y un fallo de los breakers de los circuitos así como daño en los transformadores ocacionados por desalineamientos y goteos de aceite en los mismos, ciertos elementos de porcelana quebrados, incluso podrían presentarse daños en considerables en la infraestructura de alguna subestación.

En el caso de la ST El Este el nivel de daño en la tabla lo clasifica como extenso ó completo, por lo que HAZUS especifica daños extremos con posibilidad de desconexión del 100 % de los diferentes elementos de la subestación, así como colapsos en la infraestructura de las edificaciones que conforman la ST.

Lo que refiere a las subestaciones ST Escazú y ST Heredia, ambas tienen valores de daño menor / moderado, con lo cual se espararían daños y fallos de un 5% en los sistemas y componentes de estas subestaciones y daños menores en sus edificaciones.

La ST La Caja y ST Alajuelita, presentan posibilidad de daños de moderado / extenso, con lo cual podrían tener daños de entre un 40% y un 70% en sus componentes, por ejemplo en los transformadores podrían sufrir desalineamientos y daños en algunos elementos de porcelana que integran la ST.

De acuerdo a lo que se indica en las tablas 3 y 4, para estas subestaciones las funciones de restauración de HAZUS señalan que los daños clasificados de menor a extenso deberían tener una media de recuperación entre los 3 y 7 días, con un estado de funcionamiento entre un 50% y 100% de las mismas.

Tabla 3. Funciones de Restauración para los componentes del Sistema de Energía Eléctrico.

Funciones de Restauración (Distribución Normal)			
Clasificación	**Estado de Daño**	**Media (Días)**	**σ**
Sub estaciones	leve/menor moderado extensivo completo	1.0 3.0 7.0 30.0	0.5 1.5 3.5 15.0

Circuitos de Distribución	leve/menor moderado extensivo completo	0.3 1.0 3.0 7.0	0.2 0.5 1.5 3.0
Plantas de Generación	leve/menor moderado extensivo completo	0.5 3.6 22.0 65.0	0.1 3.6 21.0 30.0

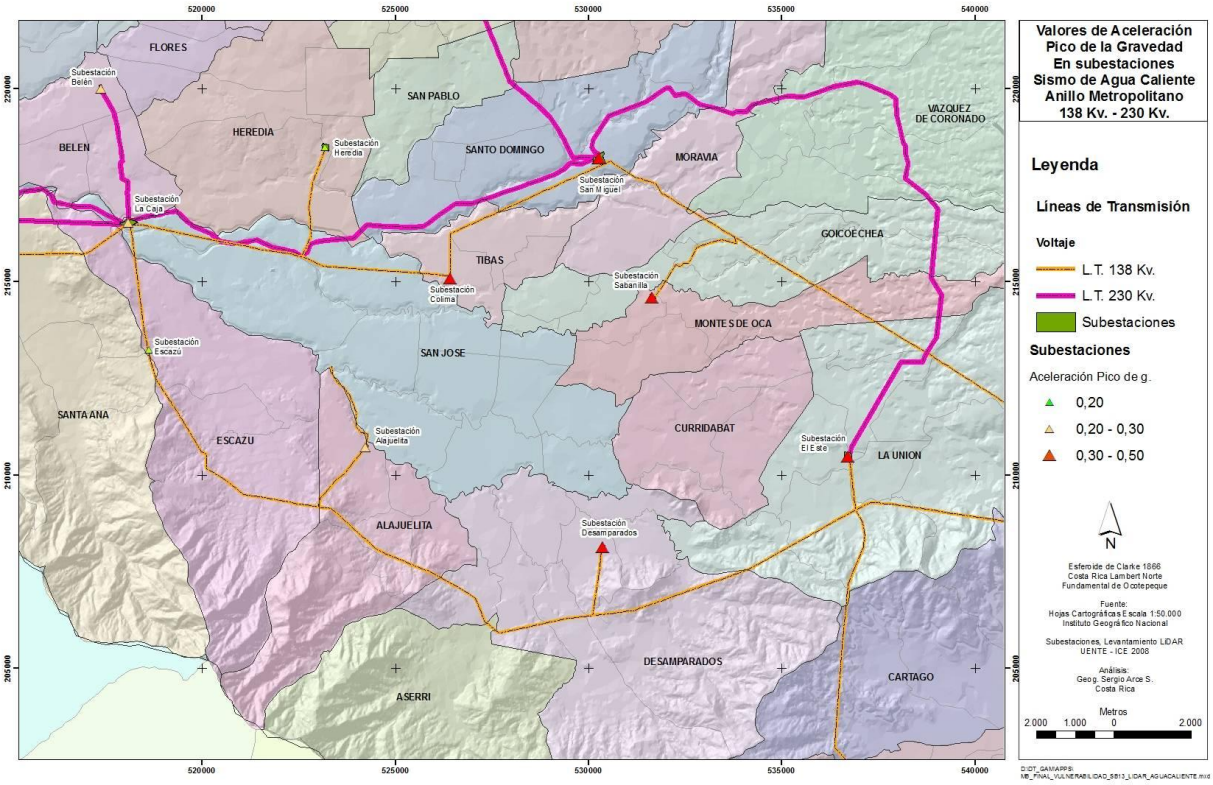
Fuente: Manual Técnico HAZUS 99, 2000.

En lo se refiere al daño completo se estima para HAZUS en sus funciones de restauración una media de 90 días de recuperación de la ST, claro siempre y cuando se tengan los componentes y repuestos necesarios en bodega ya que si se tienen que traer del exterior del país es probable que se incrementen los tiempos de recuperación en días.

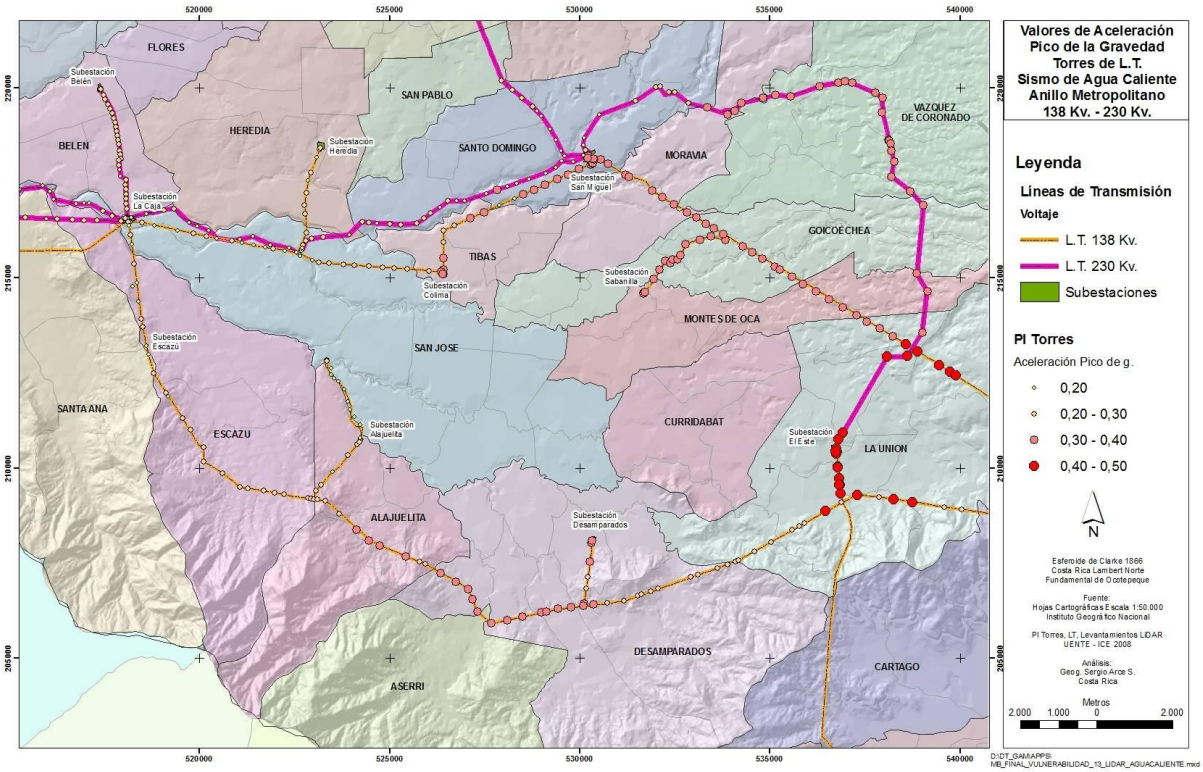
Tabla 4. Funciones de Restauración Discretizadas para los componentes del Sistema de Energía Eléctrico.

Funciones de Restauración discretizadas						
Clasificación	**Estado de Daño**	**1 día**	**3 días**	**7 días**	**30 días**	**90 días**
Sub estaciones	leve/menor moderado extensivo completo	50 9 4 3	100 50 13 4	100 100 50 7	100 100 100 50	100 100 100 100
Circuitos de Distribución	leve/menor moderado extensivo completo	100 50 9 2	100 100 50 10	100 100 100 50	100 100 100 100	100 100 100 100
Plantas de Generación	leve/menor moderado extensivo completo	100 24 16 2	100 44 19 2	100 83 24 3	100 100 65 13	100 100 100 80

Fuente: Manual Técnico HAZUS 99, 2000.



Mapa 9. Mapa de ubicación de las Subestaciones del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, valores de aceleración pico del terreno sismo de Agua Caliente,
Fuente: Tablas de clasificación Manual Técnico HAZUS MH, (2000), Arce, S. (2009).



Mapa 10. Ubicación de las Líneas de Transmisión del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, valores de aceleración pico del terreno Sismo de Agua Caliente,
Fuente: Arce, S. (2009).

Sismo de Alajuelita

De igual manera para el sismo de Alajuelita también se obtienen valores aceleración pico del terreno en cada una de las subestaciones del Anillo, y se determina el posible grado de

daño para cada una de ellas, según lo establecido por la metodología HAZUS MH en su manual técnico.

Los posibles grados de daño esperados en cada subestación son los señalados en la tabla 5:

Tabla 5. Grados de daño esperado para las subestaciones de acuerdo al valor de aceleración pico del terreno, Sismo de Alajuelita.

Subestación	Voltaje	Clasificación HAZUS	aceleración pico del terreno % de Gravedad	Estado de Daño
ST La Caja	138 Kv / 230 Kv	ESSM	30	moderado / extenso
ST Escazú	138 Kv	ESSL	20	menor / moderado
ST Alajuelita	138 Kv	ESSL	40	moderado
ST Desamparados	138 Kv	ESSL	30	Moderado
ST El Este	138 Kv	ESSL	30	Moderado
ST Sabanilla	138 Kv	ESSL	30	Moderado
ST San Miguel	138 Kv / 230 Kv	ESSM	30	moderado / extenso
ST Colima	138 KV	ESSL	40	Extenso
ST Heredia	138 Kv	ESSL	20	menor / moderado

Fuente: Manual Técnico de HAZUS MH, (2000). El Autor.

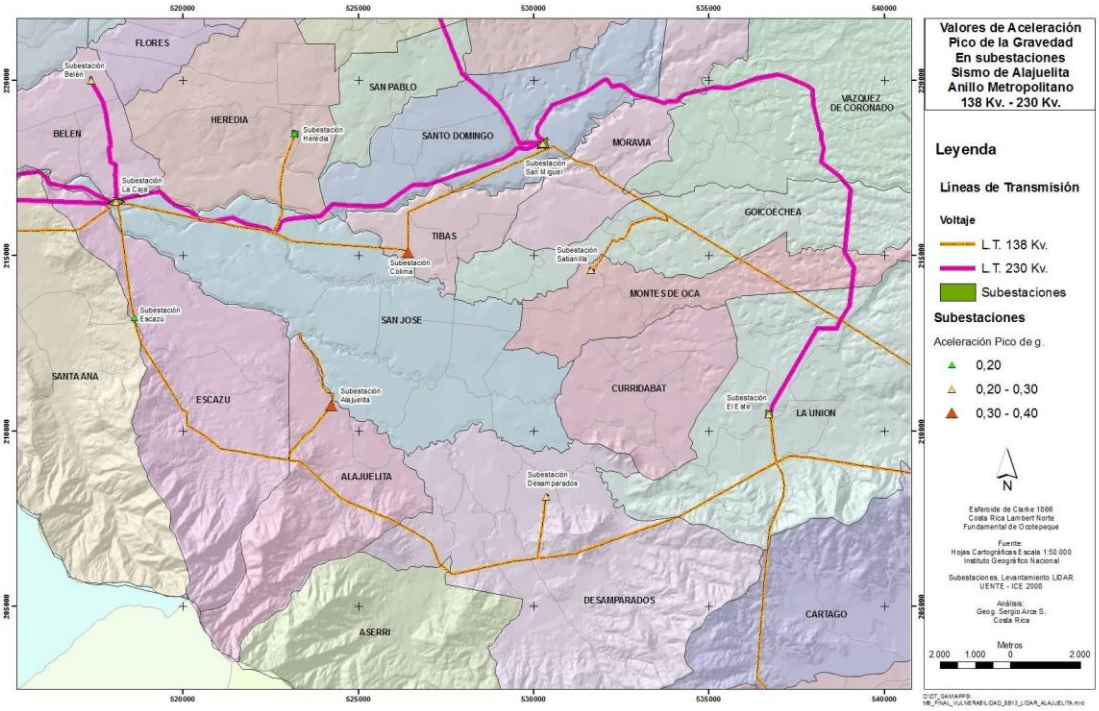
Nuevamente para este evento sísmico en la Falla Alajuelita, se analizan las tablas de restauración del sistema dadas por HAZUS, con lo que podemos señalar que para las subestaciones ST La Caja y ST San Miguel, ambas presentarían estados de daño según HAZUS de moderado a extenso, y por lo tanto se esperan daños del 40% al 70% de los componentes de las subestaciones, así como una media de recuperación en días entre los 7 y 30 días para una recuperación del 100% de sus componentes.

Para el caso de la ST Colima, esta presenta un grado de daño extenso, con lo cual podríamos establecer períodos similares a los anteriores de restauración de los sistemas.

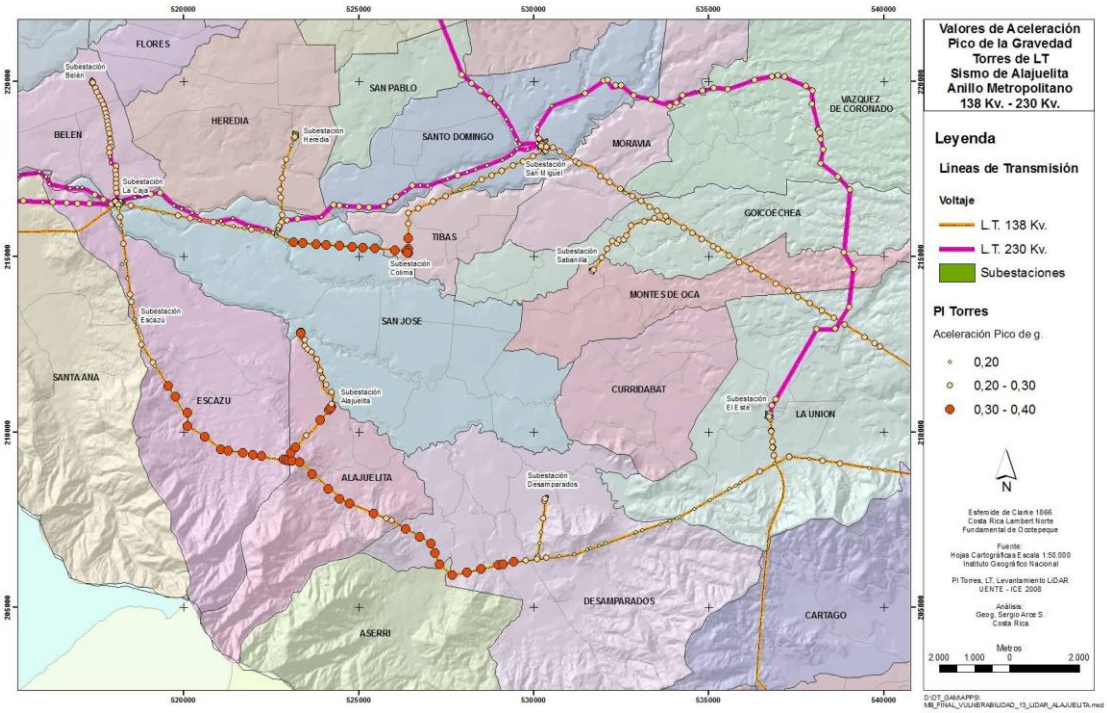
Las subestaciones ST Alajuelita, ST Desamparados, ST El Este y ST Sabanilla, el grado de daño asignado sería de moderado con fallos del 40% de sus componentes , lo cual de acuerdo a lo especificado por HAZUS, se tendría una restauración en el 100% sus componentes de 3 a 7 días.

Las ST Escazú y ST Heredia, podrían presentar daños ente menor / moderados, con lo cual la restauración de sus componentes se debería dar entre 1 y 3 días para alcanzar del 50% al

100% de restauración, ya que los daños serían menores en lo que se refiere a los interruptores y circuitos o inclinación de algunos elementos pero sin sufrir mayores daños, incluso en las edificaciones el daño sería menor.



Mapa 11. Mapa de ubicación de las Subestaciones del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, valores de aceleración pico del terreno Sismo de Alajuelita,
Fuente: Tablas de clasificación Manual Técnico HAZUS MH, (2000), Arce, S. (2009).

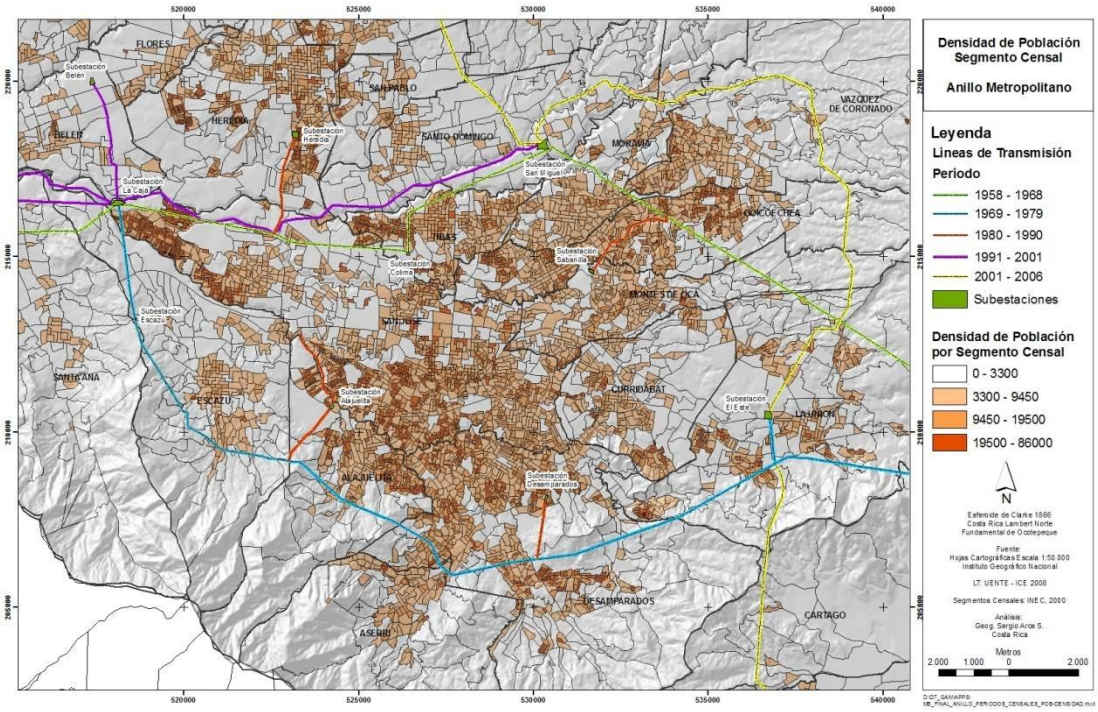


Mapa 12. Ubicación de las Líneas de Transmisión del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, valores de aceleración pico del terreno Sismo de Alajuelita,
Fuente: Arce, S. (2009).

Vulnerabilidad Social

En el mapa 13, se muestra la información correspondiente a la densidad de población por unidad de segmento censal, así como la ubicación de las obras que comprenden el Anillo Metropolitano de Transporte de Energía.

La parte sur del Anillo, es la que tiene una presencia mayor de densidad de población por segmento censal.



Mapa 13. Ubicación de las Líneas de Transmisión del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, Densidad de población por unidad de segmento censal,
Fuente: Censo del año 2000 – INEC, Arce, S. (2009).

En lo que se refiere a las subestaciones de La Caja, Alajuelita y Desamparados los segmentos censales a su alrededor poseen las densidades más altas de población y donde se dan los niveles de pobreza más altos y mayor cantidad de tugurios para el área de estudio.

Lo cual en caso de ocurrir un evento sísmico que genere daños considerables al Sistema ya sea en una o en varias de las subestaciones, estas serían las que tendrían una mayor dificultad de restauración, ya que las posibilidades de atender las fallas y restaurar el sistema, se vuelven más complicadas debido a que en estas zonas, algunas de las viviendas se construyen con materiales de muy baja calidad, siendo afectadas de manera considerable por un evento sísmico.

Al tener una afectación importante de estas viviendas alrededor de las subestaciones, se podrían tener personas heridas en los vecindarios cercanos, lo que conlleva a un despliegue de esfuerzos por parte de otras instituciones de rescate y atención de emergencias como lo son la Cruz Roja, Comisión de Emergencias y otros cuerpos de socorro.

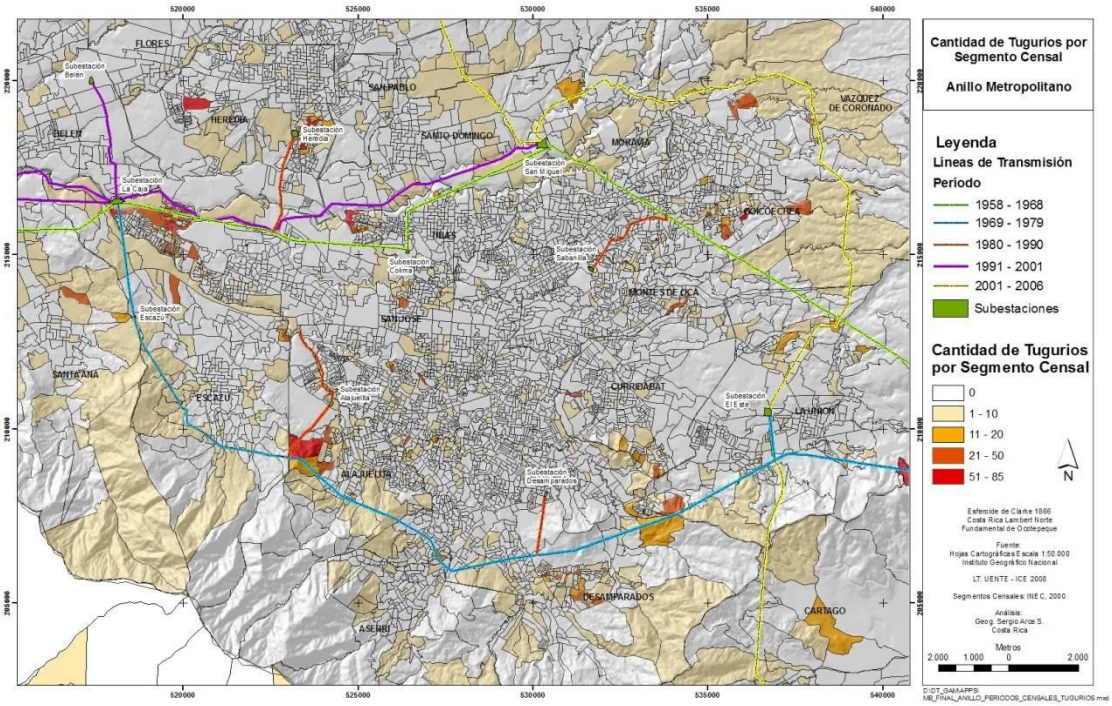
Al final si no existe una adecuada coordinación entre estas instituciones el proceso de restauración del Sistema, se volvería complicado generando atrasos en establecer la continuidad del servicio de energía eléctrica.

Fotografías 1 – 2. Torre de la LT La Caja – Colima, en la zona de la comunidad La Carpio.
Fuente: Geog. Ricardo Chavarría S. 2005.

En las fotografías 1 y 2, se muestra un ejemplo de amenaza al sistema de transmisión eléctrica en la comunidad de La Carpio, en la cual las torres de la línea de transmisión de ST La Caja – ST Colima atraviesan esta comunidad, y en lo que actualmente es el área de servidumbre de la línea, así como la base de las torres ha sido invadida, de tal forma que la infraestructura está en los patios de los ranchos que la gente ocupa e incluso utilizan la estructura de las patas de las torres para amarrar sus ranchos.

En este caso la línea de transmisión, se construyó y lo que existía en la zona eran propiedades con plantaciones de café, pero poco a poco se fueron invadiendo estas fincas hasta constituir lo que hoy se considera como la ciudadela La Carpio.

La atención de reconstrucción y recuperación de servicios eléctricos se vería gravemente afectada ya que se vuelve difícil para las cuadrillas de trabajo de campo ubicarse con sus equipos y personal en estas condiciones.



Mapa 23. Ubicación de las Líneas de Transmisión del Anillo Metropolitano de Transmisión de Energía, Densidad de tugurios por unidad de segmento censal,
Fuente: Censo del año 2000 – INEC, el Autor (2009).

En el mapa 23, se muestra los segmentos censales donde existe mayor densidad de tugurios, los cuales se euncuentran en la zona de La Carpio y algunos segmentos en Pavas, así como en la zona donde se tiene la intersección de la línea de transmisión de la ST Escazú hacia la ST Desamparados, y la derivación a al ST Alajuelita, en este punto se tiene una de las áreas con mayor densidad de tugurios de la zona que atraviesa el Anillo Metropolitano de Electricidad en el AMSJ.

En la zona de la Uruca y cercano a la ST Heredia, se tiene una alta densidad de tugurios la cual se ha incremetado en los últimos años, por lo que hoy en día genera riesgos a la infraestructura del Anillo, ya que se dan casos de robo de materiales y desmantelamientos de algunos elementos como es el caso de algunos elementos de las mismas torres, con lo cual se incrementa la vulnerabilidad de la infraestructura, que además estaría expuesta

condiciones de aceleraciones sismicas importantes en caso de un sismo severo cercano al trazado de la línea de transmisión.

Fotografías 3 – 4. Torres de la LT La Caja – Colima, en la zona de la comunidad La Carpio.
Fuente: Geog. Sergio Arce S. 2007.

En la fotografías 3 y 4, se puede observar la densidad de tugurios y como al día de hoy no existe una servidumbre ya que toda el área ha sido invadida. Se puede apreciar como las torres están en los patios de los tugurios y la calidad de las viviendas, las cuales en caso de un sismo o un incendio, impiden o dificultan la posibilidad de acceso para prestar servicio a la infraestructura del sistema, haciendo difícil la tarea, ya que no existe el espacio necesario para maniobrar con los equipos de transporte de materiales y ensamblado de torres.
Otra dificultad en estos sitios de alta densidad de tugurios, es que son zonas de condiciones muy inseguras por los altos niveles de delincuencia presentes, con lo cual se vuelve una situación muy riesgosa para que los técnicos puedan hacer labores de construcción y restauración del Sistema, en el caso de ser necesario producto de los daños que pueda sufrir la línea y sus torres ante un evento sísmico que pueda ocasionar daños importantes a la infraestructura de Anillo de Transporte de Electricidad.

Conclusiones

- A pesar de que la metodología utilizada fue diseñada para las condiciones de amenaza sísmica en los Estados Unidos, se debe rescatar que para Costa Rica, en la actualidad no se han desarrollado investigaciones, que permitan estimar pérdidas ante un evento sísmico en líneas vitales (transporte de electricidad), utilizando curvas de daño y de restauración, por lo tanto para el análisis realizado en esta investigación, se decidió utilizar la información de estimación de grados de daño que integra HAZUS MH en sus análisis, para poder darle un acercamiento que involucre niveles de riesgo en la infraestructura evaluada y no quedarse simplemente en describir la susceptibilidad del sistema ante los efectos ocasionados por un evento sísmico.

  Esta situación propicia dentro del ICE, y sus áreas de ingeniería el desarrollar más investigación en materia de daños a su infraestructura, aprovechando la información que se genera luego de que sucede un evento natural, tecnológico, antrópico y de tales dimensiones que cuando ocurre, se ve afectado la estabilidad y continuidad de los servicios de las líneas vitales, ejemplo de estos fue lo que sucedió recientemente con el sismo de Cinchona, en donde la infraestructura del sistema de transporte se vio muy afectada no por los daños estructurales, sino más bien por los problemas en los sitios de ubicación de la infraestructura, donde se dieron problemas de deslizamientos en laderas con pendientes pronunciadas, que generó la necesidad de movilización de algunas torres de transmisión de electricidad, así como la reorientación de la línea entre las comunidades de Cartagos y Cariblanco..

- La metodología HAZUS, toma en cuenta parámetros de la infraestructura de acuerdo a sus características de diseño estructural, sin embargo cuando se trabaja con líneas vitales, como las líneas de transmisión, no tiene la posibilidad de establecer el grado de importancia de cada estructura según un orden jerárquico dentro del sistema de transmisión, ya que no contempla el análisis de Redes, ni una asignación jerárquica en los componentes de la infraestructura, por lo tanto esto se debe tomar en cuenta a la hora de los análisis.

  Ejemplo de esto son los resultados obtenidos en las simulaciones del presente estudio, donde la subestación La Caja, la cual en el análisis y clasificación de grados de daños, aparece con valores moderado / extenso en ambos eventos, a pesar de esto, esta subestación, es una pieza importante en la continuidad del sistema de transmisión de energía eléctrica tanto para el área Metropolitana, como para el resto de país, ya que gran parte de la energía generada en el país, proviene del norte y oeste (complejo Arenal - Corobici – Sandillal), si se presentara un fallo que afecte la entrada y alimentación de la energía en esta subestación por un corte del sistema, se podría desequilibrar la totalidad del sistema eléctrico nacional, es por esto que se hace necesario abordar este punto de las investigaciones, en líneas vitales de tal forma que se pueda integrar un orden jerárquico en los elementos del sistema de

transporte de electricidad, una alternativa es la propuesta por Somarribas (2008), de abordar los estudios de redes mediante la temática de análisis de la geografía de redes.

Por tanto se concluye que si se utiliza la metodología de HAZUS MH, para análisis de riesgo en líneas vitales, se debe buscar una forma en la que se le pueda asignar valores jerárquicos a los diferentes elementos que comprenden el Sistema de Transporte de Energía, de acuerdo con su estado de prioridad para la continuidad del Sistema, esto se podría abordar mediante un análisis jerárquico de Redes.

- Para la realización de estudios de riesgos, se deben tener información cartográfica base de detalle en los sitios donde el ICE, planea construir y desarrollar proyectos de generación, transmisión y distribución eléctrica, así como para los proyectos de telecomunicaciones. Esto lleva a la institución a realizar esfuerzos considerables en la adquisición de datos e información base para los diferentes estudios, tales como mapas de espesores de suelos con características geotécnicas, geología, geomorfología, etc.

- Se debe tener una mayor integración a la hora de realizar análisis y simulaciones de daños y riesgos que valoren la capacidad del Sistema, de brindar la continuidad de los servicios en materia de transmisión y distribución luego de un evento sísmico importante, buscando un alcance más integral de prevención de cara a los efectos en la infraestructura, así como los efectos en la sociedad.

- El incursionar más en análisis de redes y líneas vitales, así como la identificación de herramientas tecnológicas como software y una adaptación o desarrollo de metodologías adecuadas a nuestras condiciones, que permitan estimar el funcionamiento, e identificar los puntos críticos que hagan vulnerable la continuidad del sistema.

- La revisión de los procesos de expansión de las redes de transmisión y distribución, no solo debe ir en el sentido de cubrir la necesidad y demanda de energía que tiene el país, sino también se debe contemplar la situación actual y futura de las redes, de acuerdo a un modelo integral que tome en cuenta legislaciones territoriales que se están desarrollando en el contexto nacional, como por ejemplo los planes reguladores, ya que estos contemplan una serie de variables físicas, económicas y de desarrollo social, que permiten reducir la brecha de acceso a los recursos tecnológicos y de información en nuestro país.

- El lograr realizar simulaciones de eventos catastróficos probables, le permite a la institución estimar las posibles pérdidas que ocasionaría un evento sísmico en la infraestructura existente, y con esto establecer una línea dentro de la planificación que le permita identificar cuáles elementos del Sistema de Transporte Eléctrico, son más vulnerables a lo largo y ancho del país, permitiéndole ubicar centros de almacenamiento estratégico de materiales y refacciones de los equipos que se

podrían ver dañados ante un sismo y de esta forma atender la emergencia desde cada región de administración contemplada por el ICE.

La existencia de ciertos repuestos claves de las subestaciones y torres de las líneas de transmisión, almacenados y ubicados de forma estratégica y planificada en el territorio nacional, le permitiría al ICE poder atender emergencias, aún cuando se den problemas de aislamiento temporal de abastecimiento como lo es el de las carreteras nacionales dañadas por deslizamientos, que conectan con aeropuertos y puertos marítimos. Esto último considerando las posibilidades de importar refacciones del extranjero que deberían entrar al país por los sistemas de transporte ya citados.

Lo anterior se logra mediante la aplicación de simulaciones como la realizadas en el presente estudio, que permitan identificar los puntos y elementos vulnerables del sistema, así como identificar los sitios estratégicos para su almacenamiento.

- El Área Metropolitana de San José, se ha convertido en un espacio de alta concentración de población y por lo tanto de servicios e infraestructura, la cual a su vez presenta una marcada diferencia de las condiciones sociales y la capacidad de acceso a servicios para la población que interactúa día con día. Esta situación convierte el área en una región muy vulnerable ante los efectos de un evento sísmico con consecuencias desastrosas, ya que no en todos los cantones que la conforman existen planes de ordenamiento territorial integrales, así tampoco se cuenta con planes de gestión del riesgo integral entre los municipios, y menos con respecto a la integración interinstitucional para la atención de desastres.

  Los procesos de expansión urbana con una escaza planificación en esta porción del país, incrementan la vulnerabilidad y reduce la capacidad de atención de una emergencia en el caso de que el Sistema de Transmisión Eléctrica sufriera daños considerables, ya que el crecimiento residencial e industrial avanza más rápido que la capacidad de integración interinstitucional para atender los desastres.

- La posibilidad de desarrollar simulaciones con herramientas tecnológicas e informáticas como lo son los Sistemas de Información Geográfica, que permitan simular escenarios de día y de noche, donde tanto la demanda de energía como la presencia y desplazamiento de población cambia en las grandes urbes, es una alternativa interesante que le permitiría al ICE, planificar la forma como atendería una emergencia producto de un terremoto en el AMSJ, permitiéndole identificar y planificar cuales sectores del AMSJ son esenciales de mantener en operación en las primeras horas luego de sucedido el desastre, como por ejemplo los circuitos que alimentan hospitales, clínicas, estaciones de bomberos y policía.

Esto le permitiría una coordinación del Sistema de Transmisión del ICE en conjunto con la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, la cual se encargaría de la atención del Sistema de distribución de energía en la mayor parte del AMSJ, sin embargo los estudios y simulaciones se deberían realizar de manera conjunta entre ambas instituciones, para lograr el máximo alcance de análisis y planificación en el sector eléctrico.

Bibliografía

- ATC-13: *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. (1985). Applied Technology Council, Redwood City, California.

- Ayala, Francisco. Riesgos Naturales. Editorial Ariel. España, 2002.

- Calvo García-Tornel, Francisco. ***Algunas cuestiones sobre geografía de los riesgos***. Revista Electrónica de geografía y ciencias sociales. Geocrítica. Universidad de Barcelona. (ISSN 1138-9788) Nº 10, 15 Noviembre 1997.

- Climent, Alvaro. Fernández, Carlos. Alvarado, Guillermo. *La aplicación de la Estadística al Fenómeno Natural de la sismología. Oficina de sismología y vulcanología*. ICE. Febrero 1995.

- Complete Projects and Report Information. Disponible en. http://www.atcouncil.org/reports.htm .

- Denyer, Percy. Atlas tectónico de Costa Rica. Editorial U.C.R., 2003.

- Dupuy, Gabriel. *El Urbanismo de las Redes. Teorías y métodos*. Oikos Tau 1998. Barcelona.

- Earthquake Engineering Research Institute. Proceedings U.S. – Costa Rica Workshop. Costa Rica Earthquakes of 1990 – 1991. Effects on soils and estructures. January 1993.

- FEMA. National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency. *Earthquake Loss Estimation Methodology*. HAZUS 99 and HAZUS MH, Users Manual. Washintong, D.C. 2002. Disponible en http://www.fema.gov .

- González de Vallejo, L. Ingeniería geológica. Pearson Educación, Madrid, 2002.

- Gray de Cerdán, Nelly A. *Capitulo 8. Prevención y Manejo de la vulnerabilidad urbana en zonas de alto riesgo sísmico*. Navegando entre brumas. La RED. Perú. 1998.

- Kiremidjian,Anne S. *Vulnerability and Damage to Structures from earthquakes*. Disponible en http://www.bbsr.edu/rpi/meetpart/nov99/kiremidjian/index.html.

- IDNDR, 1996. RADIUS: Risk Assesment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters. IDNDR y ISDR, 1996.

- Kussmaul, S & Denyer, Geología de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, 2000.

- Montero C., González V., Tesis de Licenciatura en Geografía. *Riesgo Sísmico en Cartago: un análisis histórico – espacial*, Heredia 1990.

- Montero, W., Miyamura, S., Distribución de intensidades y estimación de los parámetros focales de los terremotos de Cartago de 1910. Informe semestral I.G.N. 1981.

- Omar Darío Cardona A***. Los desastres no son naturales. Artículo:*** *Evaluación de la Amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, "Elementos para el planeamiento y la ordenación del territorio.***

- Pomonis, A.,Coburn, A.W. Seismic vulnerability, mitigation of human casualties and guidelines for low – cost earthquake resistant housing. 1993.

- Porter, Beverly. *Catastrophe Models: Where they came from and where they're going*. Applied Insurance Research, Inc.

- Sanauja, Haris Edo. *El daño y la evaluación en América Central: una propuesta metodología tomando como casa a Costa Rica*. La Red. UCR. Septiembre 1999.

- Sauter, Franz. Fundamentos de Ingeniería Sísmica. Editorial Tecnológica de Costa Rica, San José, 1989.

- Seismic Risk. Secure Comercial Real Estate. Disponible en http://www.securecomercialrealestate.com/chapters/6.html.

- Smith, Keith. Enviromental Hazards. Assesing Risk and Reducing Disaster. Third edition, University of Cambridge, 2001.

- Somarribas, L. Hacia una Geografía de Redes: Un Nuevo Paradigma de Análisis de Análisis Espacial Alternativo. Revista Geográfica de América Central, N° 41. 1011-48X. 2008.

- Wilches - Chaux, Gustavo. La Vulnerabilidad Global. La RED. Colombia, 1989.

- Wong Díaz, David. *Determinación de la vulnerabilidad y Estimación de daños ante los desastres naturales en los centros educativos en la República de Panamá*. Disponible en http://www.utp.ac.pa/investigaciones/escuela.html .