

121321

Evaluación del Impacto Ingenieril de un Terremoto en la Península de Nicoya



Preparado por
Programa de Ingeniería Sísmica, LANAMME
Universidad de Costa Rica
Coordinador del Proyecto: Ing. Guillermo Santana, Ph.D.

para
Comisión Nacional de Emergencias

Setiembre 1999

TABLA DE CONTENIDOS

VOLUMEN I

1.	Descripción del proyecto	1-1
1.1	Introducción	1-1
1.2	Beneficiarios	1-1
1.3	Objetivos	1-1
1.3.1	Objetivo general	1-1
1.3.2	Objetivos específicos	1-2
1.4	Productos	1-2
1.5	Esquema organizativo	1-2
1.6	Tareas específicas	1-3
1.7	Instituciones y personas contactadas	1-5
1.8	Programa de giras de comprobación de campo	1-7
1.9	Evaluación de parte del WSSI	1-8
1.10	Clasificación de instalaciones	1-8
2.	Sistemas de Información Geográfica (SIG)	2-1
2.1	Definición de un SIG	2-1
2.2	Ejemplos de aplicaciones de SIG	2-1
2.3	Paquetes SIG disponibles en el mercado	2-2
2.4	Atributos y componentes de un SIG	2-3
2.4.1	Captura de datos	2-3
2.4.2	Análisis	2-4
2.4.3	Manipulación	2-6
2.4.4	Indagación	2-7
2.4.5	Despliegue y reporte	2-8
2.5	Características de los datos de un SIG	2-9
2.6	Estructura de base de datos	2-11
3.	Esquema de Análisis de Amenaza Sísmica	3-1
3.1	Método general	3-1
3.2	Tipo de análisis	3-1
3.3	Modelaje de sismicidad y fallas	3-1
3.4	Modelaje de la frecuencia sísmica	3-3
3.5	Modelaje del movimiento del suelo	3-3
3.6	Estimación de la Amenaza en Sitio	3-4
3.7	Análisis de incertidumbre	3-6
3.8	Efectos locales del sitio	3-6
3.9	Amenazas colaterales	3-8

4.	Determinación de la Amenaza Sísmica mediante SIG	4-1
4.1	Datos digitales requerido	4-1
4.2	Modelaje del movimiento del suelo	4-1
4.2.1	Análisis probabilístico	4-1
4.2.2	Análisis determinístico	4-2
4.3	Efectos locales del sitio	4-3
4.3.1	Modificación del movimiento del suelo	4-3
4.3.2	Licuefacción	4-4
4.3.3	Deslizamientos	4-5
4.3.4	Ruptura del suelo	4-5
4.4	Amenazas colaterales	4-6
4.4.1	Inundación	4-6
4.4.2	Incendios debidos a sismo	4-7
5.	Referencias y figuras	5-1
6.	Ilustraciones	6-1
7.	Anexos. Fórmulas de investigación de campo.	7-1

VOLUMEN II

1.	Generalidades	1-1
1.1	Introducción	1-1
1.2	Objetivos	1-2
1.2.1	Objetivo general	1-2
1.2.2	Objetivos específicos	1-2
1.3	Alcance	1-3
1.4	Antecedentes	1-3
2.	Aspectos teóricos	2-1
2.1	Consideraciones sobre ingeniería sísmica	2-1
2.1.1	Tectónico global y origen de los terremotos	2-1
2.1.2	Transmisión de la energía sísmica	2-2
2.1.3	Características principales de los sismos	2-3
2.1.3.1	Magnitud del sismo	2-3
2.1.3.2	Foco y epicentro	2-5
2.1.3.3	Intensidad	2-5
2.1.3.4	Momento Sísmico	2-6

2.1.3.5 Energía Sísmica	2-6
2.2 Sistemas de Información Geográfica	2-6
2.2.1 Definición y características	2-6
2.2.2 Atributos de un SIG	2-7
2.2.2.1 Captura de datos	2-7
2.2.2.2 Análisis	2-7
2.2.2.3 Manipulación	2-8
2.2.2.4 Selección	2-9
2.2.2.5 Despliegue	2-9
3. Distribución de la aceleración del sismo de Nicoya	3-1
3.1 Ubicación y características del sismo	3-1
3.2 Propagación de la onda sísmica	3-2
3.3 Distribución de la aceleración pico para el sismo de Nicoya	3-5
4. Evaluación de daños en carreteras	4-1
4.1 Licuación	4-1
4.1.1 Probabilidad de licuación	4-3
4.1.2 Zonas con probabilidad de licuación	4-4
4.1.3 Deformación permanente del suelo por licuación	4-5
4.1.4 Deformaciones en la zona de Guanacaste	4-6
4.2 Deslizamientos	4-6
4.2.1 Desplazamientos permanentes del terreno por deslizamiento	4-7
4.2.2 Determinación de deformaciones en la zona de Guanacaste	4-8
4.3 Determinación de daños en carreteras	4-8
4.4 Daños esperados en las carreteras de Guanacaste	4-10
5. Determinación de daños en puentes	5-1
5.1 Metodología de análisis de daños	5-1
5.2 Otros enfoques existentes	5-1
5.3 Descripción del método del “Risk Management Solutions, Inc”	5-3
5.3.1 Clasificación de puentes	5-4
5.3.2 Definición de los estados de daños	5-5
5.3.3 Funciones de daños en puentes	5-5
5.4 Revisión de la metodología para el sismo de Limón	5-6
5.5 Daños causados por el efecto de la aceleración	5-7
5.6 Daños esperados debido a la licuación	5-8
5.7 Daños ocasionados por la combinación de efecto de la aceleración y la licuación	5-9
6. Conclusiones y recomendaciones	6-1

6.1 Conclusiones	6-1
6.2 Recomendaciones	6-2
7. Referencias	7-1
Anexo A: Relaciones de atenuación	A-1
Anexo B: Mapas de aceleración, geología y pendientes	B-1
Anexo C: Estratigrafía de Guanacaste	C-1
Anexo D: Curvas de fragilidad	D-1
Anexo E: Clasificación, daños calculados y daños observados observados para los principales puentes de la zona de Limón	E-1
Anexo F: Clasificación, descripción y daños esperados para los puentes de Guanacaste	F-1
Anexo G: Definición y componentes de los puentes	G-1

VOLUMEN III

1. Generalidades	1-1
1.1 Introducción	1-1
1.2 Objetivos	1-3
1.2.1 Objetivo general	1-3
1.2.2 Objetivos específicos	1-3
1.3 Alcance del proyecto	1-4
1.4 Antecedentes teórico y/o prácticos del problema	1-5
2. Antecedentes	2-1
2.1 Aspectos Generales sobre desastres naturales	2-1
2.1.1 Efectos de los desastres	2-1
2.1.2 Definiciones	2-2
2.1.3 Amenaza y Riesgo Sísmico	2-3
2.2 Peligros Geológicos	2-4
2.2.1 Visión general del proceso de la planificación para el desarrollo	2-4

2.2.2 Terremotos	2-5
3. La Zona de Estudio	3-1
3.1 Delimitación	3-1
3.2 Historia Sísmica	3-3
4. Metodología para la Estimación de Daño para Edificios en General	4-1
4.1 Descripción de la metodología	4-1
4.1.1 Datos de Entrada Requeridos para el Análisis	4-2
4.1.2 Funciones de Daño	4-2
4.2 Descripción de los tipos de modelos para edificios	4-5
4.2.1 Sistemas Estructurales	4-6
4.3 Daño Estructural	4-9
4.4 Daño en edificios debido al movimiento del terreno	4-18
4.4.1 Generalidades	4-18
4.4.2 Curvas de Capacidad	4-18
4.4.3 Curvas de Fragilidad	4-20
4.4.4 Curvas de Fragilidad Estructural para PGA	4-21
4.5 Daño en Edificios debido a falla del terreno	4-21
4.5.1 Generalidades	4-21
4.5.2 Curvas de Fragilidad–Desplazamiento permanente del terreno	4-21
4.5.3 Asentamiento del terreno	4-23
5. Distribución de la Aceleración Pico en la Zona en Estudio	5-1
5.1 Generalidades	5-1
5.2 Relaciones de atenuación de Youngs et al	5-1
6. Caracterización de las Estructuras de los Centros Educativos y de Salud	6-1
6.1 Problemas de configuración en las edificaciones	6-1
6.1.1 Longitud	6-2
6.1.2 Flexibilidad	6-3
6.1.3 Falta de Redundancia	6-3
6.1.4 Torsión	6-4
6.1.5 Flexibilidad del diafragma	6-5
6.1.6 Concentración de esfuerzo en planta	6-6
6.1.7 Concentración de masa	6-6
6.1.8 Columnas débiles	6-7
6.1.9 Pisos débiles	6-7

6.2 Infraestructura de los Centros Educativos	6-8
6.2.1 Aspectos generales	6-8
6.2.2 Centros Educativos en estudio	6-9
6.3 Infraestructura de los Centros de Salud	6-15
6.3.1 Aspectos generales	6-15
6.3.2 Centros de Salud en estudio	6-15
6.4 Descripción de las estructuras analizadas	6-18
7. Daños en los Centro Educativos y de Salud	7-1
7.1 Aspectos generales	7-1
7.2 Descripción de daños de las estructuras considerando el PGA	7-2
7.2.1 Daños esperados para los Centros Educativos	7-2
7.2.2 Descripción de daños en Centros de Salud	7-7
7.3 Daños por deslizamiento del terreno	7-10
7.4 Daños por licuación en las estructuras	7-10
7.5 Daños esperados en las estructuras de los centros educativos y de salud	4-10
8. Conclusiones y Recomendaciones	8-1
8.1 Conclusiones	8-1
8.2 Recomendaciones	8-6
9. Referencias Bibliográficas	9-1
Anexo A:	
Matriculas en escuela de la zona en estudio	A-1
Colegios de la zona de estudio	A-20
Anexo B: Escuelas y clínicas evaluadas en el estudio	
Escuelas de Puntarenas	B-1
Escuelas de Guanacaste	B-12
Colegios de Puntarenas	B-37
Colegios de Guanacaste	B-51
Clínicas de Puntarenas	B-79
Clínicas de Guanacaste	B-86

VOLUMEN IV

1. Introducción	1-1
1.1 Justificación	1-1
1.2 Objetivos	1-4
1.3 Ubicación del área de estudio	1-5
1.4 Metodología	1-6
2. Marco geológico	2-1
2.1 Antecedentes sobre el origen y emplazamiento del Complejo de Nicoya y la cobertura sedimentaria	2-1
2.2 Estratigrafía Regional	2-4
2.2.1 Complejo de Nicoya	2-5
2.2.2 Formación Sabana Grande	2-6
2.2.3 Formación Conglomerado Barbudal	2-6
2.2.4 Formación Rivas o Curú	2-7
2.2.5 Rocas clásticas y bioclásticas	2-8
2.2.5.1 Formación Barra Honda	2-8
2.2.5.2 Formación Brito	2-8
2.2.6 Formación Masachapa	2-9
2.2.7 Rocas volcánicas	2-9
2.2.7.1 Formación Bagaces	2-10
2.2.7.2 Formación Liberia	2-10
2.2.8 Manglares y Pantanos	2-11
2.2.9 Depósitos Recientes	2-11
2.3 Aspectos geomorfológicos y neotectónicos	2-14
2.3.1 Consideraciones generales	2-14
2.3.2 Formas de origen volcánico denudacional	2-16
2.3.2.1 Serranías de la Península de Nicoya	2-16
2.3.2.2 Meseta volcánica de Santa Rosa	2-17
2.3.3 Formas de origen sedimentario denudacional	2-17
2.3.4 Formas de origen fluvial	2-18
2.3.5 Consideraciones sobre Neotectónica	2-18
2.4 Aspectos de geología estructural	2-20
3. Aspectos sismológicos	3-1
3.1 Sismotectónica	3-1
3.2 Sismicidad en la región del Pacífico norte de Costa Rica	3-10
4. Generalidades sobre amplificación de la señal sísmica en el subsuelo	4-1

4.1	Introducción	4-1
4.2	Características del movimiento sísmico del terreno	4-2
4.2.1	Parámetros de amplitud	4-2
4.2.2	Parámetros de contenido de frecuencias	4-4
4.2.2.1	Espectro del movimiento sísmico del terreno	4-5
4.2.2.2	Parámetros espectrales	4-7
4.2.2.3	Razón $v_{m\acute{a}x}/a_{m\acute{a}x}$	4-8
4.2.3	Duración	4-8
4.2.4	Discusión	4-9
4.3	Factores que afectan el movimiento sísmico del terreno	4-10
4.4	Influencia de las condiciones del suelo en las características del movimiento sísmico del terreno	4-12
5.	Programa de análisis de respuesta sísmica del terreno	5-1
5.1	Limitaciones que presenta el programa SHAKE (NORAD-CEPREDENAC, 1997)	5-1
5.2	Modelo matemático del SHAKE	5-2
5.3	El efecto de las propiedades del semi-espacio elástico	5-7
5.4	Transformada de Fourier	5-8
5.5	Comportamiento no lineal del suelo	5-9
5.6	Método lineal equivalente	5-9
5.7	Método de solución exacta	5-11
6.	Análisis de la información obtenida	6-1
6.1	Mapa geológico	6-1
6.2	Mapa tipos de suelos	6-2
6.3	Mapa geológico y sondeos geofísicos	6-4
6.4	Determinación de los parámetros geofísicos del suelo y roca a utilizar en el análisis	6-9
7.	Resultados del programa de análisis de respuesta sísmica terreno	7-1
7.1	Movimientos sísmicos de entrada y su influencia en la amplificación sísmica	7-1
7.2	Resultados generales del programa	7-3
7.3	Métodos espectrales y funciones de transferencia	7-4
7.4	Espectros de respuesta propuestos y funciones de transferencia	7-5
7.5	Resultados generales de los tres grupos de pozos estudiados	7-29
7.6	Espectros de diseño propuestos	7-33
7.7	Limitaciones	7-40
8.	Conclusiones	8-1

8.1 Conclusiones	8-1
8.2 Recomendaciones	8-5
9. Bibliografía	9-1
<u>ANEXO 1</u> Información general de los movimientos sísmicos utilizados	A1
<u>ANEXO 2</u> Perfiles geológicos de los pozos utilizados en los tres grupos de estudio y resultados del programa	A2-1
• Primer grupo de estudio	A2-2
• Segundo grupo de estudio	A2-3
• Tercer grupo de estudio-	A2-4
• Grupo A	A2-5
• Grupo B	A2-6

VOLUMEN V

1. Introducción	1-1
1.1 Justificación	1-1
1.2 Objetivos	1-2
1.3 Alcance y limitaciones	1-2
1.4 Metodología	1-3
2. Vulnerabilidad sísmica y tipos de daños en puentes	2-1
2.1 Generalidades	2-1
2.2 Tipos de daños en puentes debidos a terremotos	2-1
2.2.1 Desplazamientos	2-1
2.2.2 Daños en columnas	2-4
2.2.3 Fallas en las uniones	2-5
2.2.4 Falla en las fundaciones	2-5
3. Estimación de la demanda sísmica	3-1
3.1 Antecedentes	3-1
3.2 Medición de los sismos	3-1
3.3 Atenuación de la aceleración del terreno	3-3
3.4 Aplicación de las relaciones de atenuación al terremoto de Nicoya	3-5
3.5 Determinación del espectro de respuesta para el análisis	3-7
4. Descripción de la estructura	4-1
4.1 Localización	4-1
4.2 Generalidades	4-1
4.3 Especificaciones	4-1
4.3.1 Diseño y construcción	4-1
4.3.2 Materiales	4-2
4.3.2.1 Concreto	4-2
4.3.2.2 Acero de refuerzo	4-2
4.4 Descripción de la superestructura	4-2
4.4.1 Tramo de vigas de concreto postensado	4-2
4.4.2 Tramo de vigas tipo canaleta	4-3
4.5 Descripción de la subestructura	4-3
4.5.1 Bastiones	4-4
4.5.2 Pila	4-4
4.6 Apoyos y conexiones	4-4
4.6.1 Claros de vigas tipo I postensadas	4-5
4.6.2 Claro de vigas pretensadas tipo canaleta	4-5

5.	Consideraciones acerca del modelo y método de análisis	5-1
5.1	Descripción del programa SEISAB	5-1
5.1.1	Introducción	5-1
5.1.2	Características del modelo generado	5-1
5.1.3	Métodos de análisis	5-3
5.1.4	Combinación de respuestas modales	5-3
5.1.5	Combinaciones de carga	5-4
5.2	Modelo de la superestructura	5-4
5.3	Modelo de la pila	5-5
5.4	Modelo de bastiones y fundaciones	5-6
5.4.1	Efecto del suelo en placas aisladas	5-6
5.4.2	Efecto del suelo en los bastiones	5-9
6.	Análisis de resultados	6-1
6.1	Discusión acerca del modelo utilizado	6-1
6.2	Caracterización modal	6-2
6.3	Revisión de desplazamientos	6-3
6.3.1	Desplazamientos en los bastiones	6-3
6.3.2	Desplazamientos en las conexiones pila-superestructura	6-5
6.4	Revisión de la columna de la pila	6-6
6.4.1	Flexocompresión	6-6
6.4.2	Cortante	6-8
6.5	Revisión de la placa de fundación de la pila	6-9
6.6	Revisión de conexiones	6-11
6.6.1	Llaves de cortante	6-11
6.6.2	Dovelas	6-11
7.	Conclusiones y recomendaciones	7-1
7.1	Conclusiones	7-1
7.2	Recomendaciones	7-4
8.	Referencias	8-1
Anexo A:	Detalles constructivos para los componentes principales del puente sobre el Río Nosara.	A-1
Anexo B:	Diagramas para la estimación de α y β	B-1

Indice de Figuras

Figura 4.1:	Curvas de Fragilidad.....	4-3
Figura 5.1:	Comportamiento de la ecuación de Youngs.....	5-5
Figura 6.1:	Relación entre la onda del sismo y la longitud de la estructura	6-2
Figura 6.2:	Redundancia de las estructuras.....	6-4
Figura 6.3:	Zonas potenciales de concentración de esfuerzos.....	6-6
Figura 6.4:	Escuelas de la zona de estudio.....	6-12
Figura 6.5:	Colegios de la zona de estudio.....	6-12
Figura 6.6:	Organización de los Centros de Salud.....	6-17

Índice de Tablas

Tabla 2.1:	Relación aproximada entre magnitud, intensidad, aceleración, liberación de energía e incidencia de un terremoto.....	2-8
Tabla 2.2 :	Relación del tipo de humedad con el tipo de movimientos.....	2-10
Tabla 4.1:	Tipos de estructuras propuestos por la metodología HAZUS.....	4-5
Tabla 4.2:	Relaciones de daños para PGD – Cimentaciones Superficiales...	4-22
Tabla 4.3:	Clasificación de susceptibilidad para la licuación.....	4-23
Tabla 4.4:	Asentamiento del terreno por Licuación según las categorías de susceptibilidad.....	4-24
Tabla 6.1:	Análisis para las escuelas de la zona de estudio.....	6-10
Tabla 6.2:	Análisis para los colegios de la zona de estudio.....	6-10
Tabla 6.3:	Escuelas incluidas en el análisis.....	6-13
Tabla 6.4:	Colegios incluidas en el análisis.....	6-14
Tabla 6.5:	Clínicas de la zona de estudio.....	6-16
Tabla 7.1:	Criterios de demanda sísmica.....	7-1
Tabla 7.2:	Aceleración base según la zona de estudio.....	7-1
Tabla 7.3:	Daño en escuelas por PGA, con corrección de Z_t a los 50 km.....	7-3
Tabla 7.4:	Daño en colegios por PGA, con corrección de Z_t a los 50 km.....	7-4
Tabla 7.5:	Daño en clínicas por PGA, con corrección de Z_t a los 50 km.....	7-8
Tabla 7.6:	Daño por deslizamientos en centros educativos y de salud.....	7-12
Tabla 7.7:	Daño por licuación en centros educativos y de salud.....	7-13

Índice de Mapas

Mapa 3.1:	Posible Área de ruptura del terremoto de Nicoya.....	3-5
Mapa 3.2:	Densidades poblacionales de los Distritos de Costa Rica para El mes de setiembre de 1997.....	3-6
Mapa 3.3:	Densidad de población de los Distritos de Costa Rica y delimitaciones de importancia.....	3-7
Mapa 3.4:	Ubicación de la Zona de Estudio.....	3-8
Mapa 3.5:	Detalle 1 de la Zona de Estudio.....	3-9
Mapa 3.6:	Detalle 2 de la Zona de Estudio.....	3-10
Mapa 3.7:	Detalle 3 de la Zona de Estudio.....	3-11
Mapa 3.8:	Densidad de población de los Distritos de la Zona de Estudio..	3-12
Mapa 5.1:	Formaciones Geológicas de la Zona de Estudio.....	5-6
Mapa 5.2:	Distribución espacial de la aceleración pico para la zona de Estudio.....	5-7
Mapa 5.3:	Aceleración del terreno en las zonas cercanas a Nicoya y Santa Cruz ...	5-8
Mapa 5.4:	Deformaciones permanentes del terreno por licuación.....	5-9
Mapa 5.5:	Deformaciones permanentes del terreno por deslizamiento.....	5-10
Mapa 6.1:	Ubicación de los Centros de Educación Primaria para la zona de estudio.....	6-22
Mapa 6.2:	Ubicación de los Centros de Educación Secundaria para la zona de estudio.....	6-23
Mapa 6.3:	Ubicación de los Centros de Educación Primaria en estudio.....	6-24
Mapa 6.4:	Ubicación de los Centros de Educación Secundaria en estudio..	6-25
Mapa 6.5:	Areas de Influencia para los Centros de Educación de Enseñanza Secundaria con más de 500 estudiantes.....	6-26
Mapa 6.6:	Areas de Influencia para los Centros de Educación de Enseñanza Primaria con más de 500 estudiantes.....	6-27
Mapa 6.7:	Zonas de influencia de los hospitales y las clínicas en el área de estudio.....	6-28

Mapa 6.8:	Clínicas y Hospitales presentes en la zona de estudio.....	6-29
Mapa 6.9:	Centros de Salud según su tipo.....	6-30
Mapa 7.1:	Deformaciones presentes en las estructuras por el PGD.....	7-14
Mapa 7.2:	Daño en las estructuras debido al PGD.....	7-15
Mapa 7.3:	Deformaciones en las estructuras que presentan licuación.....	7-16
Mapa 7.4:	Daño en las estructuras debido a la licuación.....	7-17
Mapa 7.5:	Daño para estructuras tipo C1L.....	7-18
Mapa 7.6:	Daños en Centros de Salud. Estructuras tipo C3L.....	7-19
Mapa 7.7:	Daños en Colegios. Estructuras tipo C3L.....	7-20
Mapa 7.8:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo C3L.....	7-21
Mapa 7.9:	Daño para estructuras tipo C2H.....	7-22
Mapa 7.10:	Daños en Centros de Salud. Estructuras tipo PC2L.....	7-23
Mapa 7.11:	Daños en Colegios. Estructuras tipo PC2L.....	7-24
Mapa 7.12:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo PC2L.....	7-25
Mapa 7.13:	Daños en Centros de Salud. Estructuras tipo S1L.....	7-26
Mapa 7.14:	Daños en Colegios. Estructuras tipo S1L.....	7-27
Mapa 7.15:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo S1L.....	7-28
Mapa 7.16:	Daño para estructuras tipo S2L.....	7-29
Mapa 7.17:	Daño en colegios y clínicas. Estructuras tipo S3L.....	7-30
Mapa 7.18:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo S3L.....	7-31
Mapa 7.19:	Daño en colegios y clínicas. Estructuras tipo URML.....	7-32
Mapa 7.20:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo URML.....	7-33
Mapa 7.21:	Daño para estructuras tipo W1L.....	7-34
Mapa 7.22:	Daños en Colegios. Estructuras tipo W2L.....	7-35
Mapa 7.23:	Daños en Escuelas. Estructuras tipo W2L.....	7-36