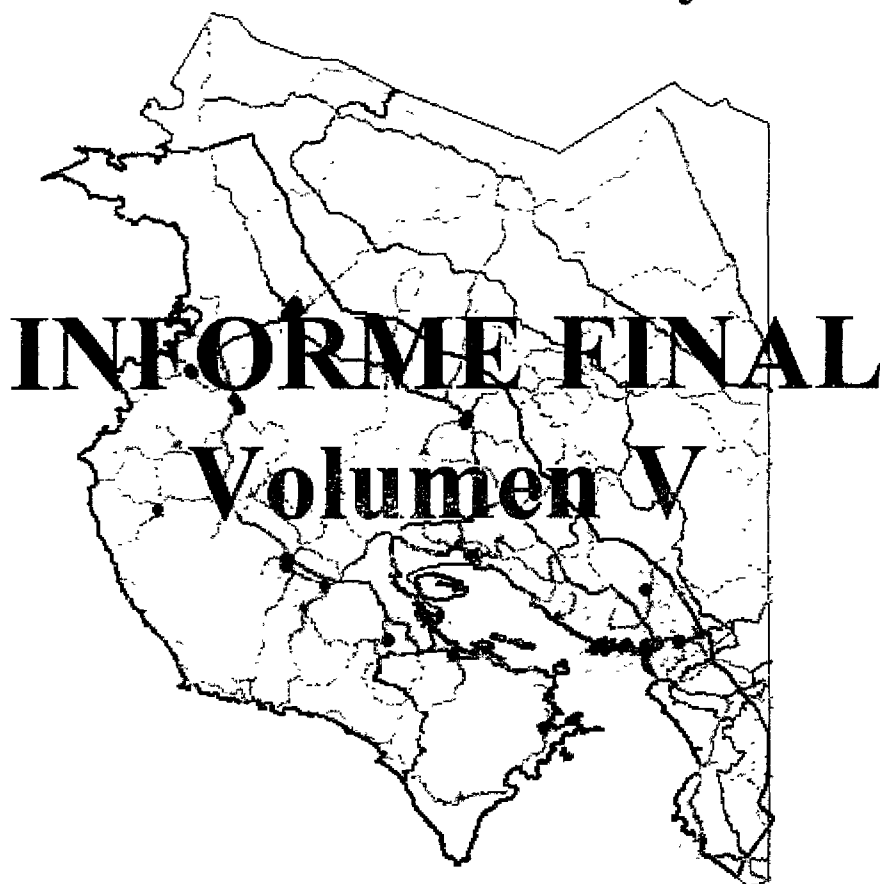


12134

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

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

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Colapso de los dos tramos principales del puente sobre el Río Estrella, durante el terremoto de 1991.	2-6
Figura 2.2	Falla en conexión, puente sobre el Río Nosara.	2-6
Figura 2.3	Detalle de conexión en puente Chirripó.	2-7
Figura 2.4	Colapso del tramo final del puente Chirripó por pérdida de soporte en la pila.	2-7
Figura 2.5	Colapso de dos tramos del puente sobre el Río Viscaya por falla en la pila central.	2-8
Figura 2.6	Detalle de unión entre vigas en pila del puente sobre el Río Viscaya.	2-8
Figura 2.7	Colapso del puente sobre el Río Bananito	2-9
Figura 2.8	Detalle de apoyo en pila central del puente sobre el Río Bananito	2-9
Figura 2-9	Hundimiento y rotación del bastión debido a las presiones generadas en el terreno por el sismo	2-10
Figura 2.10	Rotación del bastión en el puente sobre el Río Cuba.	2-10
Figura 2.11	Desplazamiento y volcamiento del bastión en puente sobre el Río Blanco, durante el terremoto de Limón, 1991.	2-11
Figura 2.12	Falla a flexión sobre la base de las columnas en el Hanshin Expressway.	2-11
Figura 2.13	Falla por cortante en columna.	2-12
Figura 2.14	Patrón típico de agrietamiento debido a cortante en unión viga-columna.	2-12
Figura 3.1	Superficie de ruptura de la Brecha Sísmica de Nicoya.	3-9
Figura 3.2	Area aproximada de ruptura del terremoto de Nicoya.	3-10

Figura 3.3	Secciones transversales de la sismicidad previa y posterior al terremoto de Cóbano de 1990.	3-11
Figura 3.4	Espectro de aceleraciones para el terremoto de Nicoya.	3-11
Figura 3.5	Espectro de respuesta para suelo firme y tipo 5 CSCR.	3-12
Figura 3.6	Espectro de respuesta según ATC-32 para tipo de suelo firme	3-12
Figura 4.1	Esquema de bastión tipo asiento.	4-7
Figura 4.2	Vista lateral de las vigas de concreto postensado.	4-7
Figura 4.3	Superficie de rodamiento del puente.	4-8
Figura 4.4	Diafragma de concreto.	4-8
Figura 4.5	Tramo forzado por cuatro vigas pretensadas tipo canaleta.	4-9
Figura 4.6	Bastión tipo asiento con muros laterales o aletones.	4-9
Figura 4.7	Socavación severa alrededor de la escollera de mortero	4-10
Figura 4.8	Pila tipo cabeza de martillo.	4-10
Figura 4.9	Detalle de ménsula.	4-11
Figura 4.10	Sección transversal de la columna.	4-11
Figura 4.11	Apoyo elastomérico de viga tipo I en bastión	4-12
Figura 4.12	Detalle de anclaje para viga tipo I en planos.	4-12
Figura 4.13	Detalle de la junta entre el muro del bastión y la superestructura.	4-13
Figura 4.14	Llave de cortante en bastión.	4-13
Figura 4.15	Refuerzo de acero en la llave de cortante.	4-14
Figura 4.16	Apoyo de vigas canaleta en bastión.	4-14
Figura 4.17	Apoyo de vigas canaleta en pila.	4-15

Figura 5.1	Convención para las propiedades de sección de la superestructura	5-12
Figura 5.2	Convención para las propiedades de sección de la columna.	5-12
Figura 5.3	Radio equivalente para cimentaciones rectangulares.	5-13
Figura 5.4	Esquema del modelo discreto generado por SEISAB.	5-14
Figura 6.1	Esquema del modelo longitudinal 1.	6-12
Figura 6.2	Esquema del modelo longitudinal 2.	6-13
Figura 6.3	Convención de ejes para la columna.	6-13
Figura 6.4	Diagrama de interacción P vs M_x	6-14
Figura 6.5	Diagrama de interacción P vs M_y	6-14
Figura 6.6	Diagrama de interacción para placa en pila en la dirección transversal.	6-15
Figura 6.7	Diagrama de interacción para placa en la dirección longitudinal.	6-15
Figura 6.8	Mecanismo de transferencia de cortante por fricción.	6-16
Figura 7.1	Ampliación del banco de apoyo en bastión.	7-5
Figura 7.2	Alternativas para ampliación del banco de apoyo en pila.	7-5
Figura 7.3	Encamisado de la columna de la pila.	7-6
Figura A1	: Elevación principal.	A-2
Figura A2	: Planta general.	A-3
Figura A3	: Vista frontal y en planta de pila.	A-4
Figura A4	: Vista lateral de pila.	A-5
Figura A5	: Planta de placa aislada en pila.	A-6
Figura A6	: Sección transversal de columna en pila.	A-7
Figura A7	: Detalle de cabeza de pila.	A-8

Figura A8 : Llave sísmica.	A-9
Figura A9 : Sección transversal de viga I postensada.	A-10
Figura A10 : Vista frontal de estructura de los bastiones.	A-11
Figura A11 : Vista lateral de bastiones, sección transversal de columna.	A-12
Figura A12 : Detalle de muro aletón en bastiones.	A-13
Figura A13 : Vista en planta de muro frontal y aletones en bastión	A-14
Figura B1 : Factores de forma para placas rectangulares.	B-1
Figura B2 : Factores de empotramiento para placas.	B-2

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 : Coeficientes de regresión para suelo	3-5
Tabla 3.2 : Coeficientes de regresión para roca.	3-5
Tabla 3.3 : Valores de aceleraciones espectrales con base en las relaciones de atenuación de Youngs.	3-8
Tabla 5.1 : Propiedades de la superestructura.	5-5
Tabla 5.2 : Propiedades de la pila.	5-6
Tabla 5.3 : Coeficientes de rigidez para la cimentación circular.	5-7
Tabla 5.4 : Características geométricas de las placas aisladas del puente.	5-8
Tabla 5.5 : Coeficientes de rigidez de los resortes equivalentes de las placas.	5-9
Tabla 6.1 : Características vibratorias del modelo 1.	6-3
Tabla 6.2 : Características vibratorias del modelo 2.	6-3
Tabla 6.3 : Desplazamientos máximos en bastiones según modelo 1.	6-4
Tabla 6.4 : Desplazamientos máximos en bastiones según modelo 2.	6-5
Tabla 6.5 : Desplazamientos relativos máximos pila-superestructura en la dirección longitudinal.	6-5
Tabla 6.6 . Momentos elásticos máximos en columna debidos a sismo. en la dirección longitudinal	6-6
Tabla 6.7 : Momentos elásticos máximos en columna debidos a sismo en la dirección transversal.	6-6
Tabla 6.8 : Capacidades máximas para momento en la columna.	6-7
Tabla 6.9 : Cortantes máximos en la base de la columna.	6-8
Tabla 6.10 : Momentos elásticos máximos en la base de la placa.	6-10
Tabla 6.11 : Cortantes transversales máximos en llaves	6-11
Tabla 6.12 : Cortantes en el sistema de anclaje del bastión 1.	6-12