



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**UNIDAD ENSENADA**  
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



## **Vulnerabilidad Sísmica de los Puentes Urbanos de Ensenada, BC**



### **TESIS**

Que para obtener el grado de  
MAESTRIA EN INGENIERIA  
presenta:

**Jesús Raymundo Juárez García**

**Ensenada, BC**

**Octubre de 2008**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD ENSENADA

## **Vulnerabilidad Sísmica de los Puentes Urbanos de Ensenada, BC**

### **TESIS**

Que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería presenta:

**Jesús Raymundo Juárez García**

Aprobada por:

Dr. Fortunato Espinoza Barreras  
Director de tesis

M.I. Pablo Andrés Rousseau Figueroa  
Miembro del comité

M.C. Alberto Parra Meza  
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Octubre de 2008

## INDICE

|                                                                                   | <b>Páginas</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>1.- Introducción</b>                                                           | <b>1</b>       |
| <b>2.- Puentes</b>                                                                | <b>3</b>       |
| <b>3.- Área de estudio</b>                                                        | <b>5</b>       |
| <b>4.- Sismicidad regional</b>                                                    | <b>8</b>       |
| <b>5.- Regionalización sísmica</b>                                                | <b>13</b>      |
| <b>6.- Objetivos</b>                                                              | <b>16</b>      |
| <b>7.- Vulnerabilidad sísmica de los puentes urbanos de<br/>Ensenada, BC.</b>     | <b>18</b>      |
| <b>8.- Vibración ambiental</b>                                                    | <b>25</b>      |
| <b>9.- Ponencia 1; Congreso Internacional Vértice 2006</b>                        | <b>26</b>      |
| <b>10.- Ponencia 2; XVI Congreso Nacional de Ingeniería<br/>Sísmica.</b>          | <b>34</b>      |
| <b>11.- Ponencia 3; XVI Congreso Nacional de Ingeniería<br/>Sísmica</b>           | <b>47</b>      |
| <b>12.- Conclusiones</b>                                                          | <b>59</b>      |
| <b>13.- Anexo 1 Conjuntos difusos</b>                                             | <b>61</b>      |
| <b>14.- Anexo 2 Ponencia en 14 World Conference on<br/>Earthquake Engineering</b> | <b>69</b>      |
| <b>15.- Referencias</b>                                                           | <b>78</b>      |

## 1.- INTRODUCCIÓN

Cuando el hombre no había aprendido aún a dominar a la naturaleza, cuando no había construido viviendas, carreteras, sistemas de distribución y almacenamiento de agua, gas y otros líquidos o los más altos edificios y estructuras diversas sobre la superficie terrestre, los sismos no tenían demasiada importancia porque el daño que causaban era pequeño o nulo. Pero el desarrollo histórico de las sociedades humanas ha ido creando toda una serie de instalaciones de muy diverso tamaño que se ven influidas directamente por los desplazamientos del suelo que implica un movimiento telúrico.

Los sismos o temblores son movimientos vibratorios de la tierra que se originan en su interior y se propagan a través de ella en todas direcciones en forma de ondas. Son producidos por la liberación repentina de energía en el interior de la tierra debido a un reajuste de esta. El reajuste se desarrolla mediante el movimiento relativo entre las placas tectónicas y a la zona donde se lleva a cabo este movimiento se le conoce como falla geológica. A los temblores que son producidos en estas condiciones se les conoce como sismos tectónicos. Existen otras causas que producen temblores, como por ejemplo el ascenso del magma hacia la superficie de la tierra originando los llamados sismos volcánicos.

Originalmente el tamaño de un temblor se medía por su intensidad, es decir por los efectos y daños que producía en un cierto lugar. La escala de intensidad más utilizada es la de Mercalli modificada, que es útil para zonas donde no se tienen instrumentos que registren los sismos y para mostrar los niveles de daños reales.

Hoy día se usa la magnitud, que permite clasificar a un sismo con base en la amplitud de onda máxima registrada por un sismógrafo. El concepto de magnitud se fundamenta en que la amplitud de las ondas sísmicas es una medida de la energía liberada en el punto de origen del temblor, llamado foco. El parámetro magnitud fue propuesto por Charles F. Richter en 1935.

En los últimos años, los sismólogos prefieren usar el momento sísmico para cuantificar el tamaño de un temblor, porque éste es uno de los parámetros sísmicos que se pueden determinar con mayor precisión. Está basado en el principio de que el movimiento a lo largo de una falla es

producido por un par de fuerzas en sentido opuesto a uno y otro lado de la falla. El momento sísmico es función del desplazamiento relativo a lo largo de la falla, del área de ruptura y de la rigidez del medio en que el temblor se origina.

En la tierra existen básicamente dos tipos de ondas sísmicas internas:

- (1) Ondas compresionales o longitudinales (P), que comprimen y dilatan el medio donde se propagan en la dirección del frente de ondas.
- (2) Ondas de corte o cizallamiento (S), que producen deformación en los sólidos en dirección perpendicular a la trayectoria del frente de ondas. La propagación de estas ondas produce un esfuerzo cortante en el medio, y de ahí su nombre.

Para relacionar el momento sísmico con las escalas convencionales de magnitud, Hanks y Kanamori definieron en 1979 (Bazan y Melli, 2004) una nueva escala con la fórmula;

$$M = \frac{2(\text{Log } M_0)}{3} - 10.7 \quad \text{donde:} \quad M_0 = \text{Energía liberada, en dinas-cm}$$

Esta ecuación refleja que la magnitud es una función lineal del logaritmo de la energía liberada, de tal manera que un incremento de un grado en M corresponde a un evento que libera 32 veces más energía.

Desde el punto de vista de la ingeniería, no interesa tanto la magnitud del sismo como sus efectos en los sitios donde existen o se van a construir las obras, esto es a la severidad de la sacudida sísmica que se experimenta en un sitio determinado. A esta característica de los sismos se le llama *intensidad* y es claro que un mismo sismo aunque tiene una sola magnitud, tendrá intensidades diferentes, según el sitio donde se registre. En general, la intensidad disminuye a medida que nos alejamos de la zona epicentral, y para una misma distancia al epicentro, son más intensos los sismos de mayor magnitud.

Las escalas más precisas son las de tipo instrumental, que definen la intensidad en función de la aceleración máxima del terreno en el sitio de interés. No obstante, por la imposibilidad de contar con instrumentos colocados precisamente en los diferentes sitios donde interesa conocer la intensidad, se prefiere recurrir a escalas de tipo cualitativo, que se basan en la severidad de los

daños producidos, en la violencia como es sentido el sismo por las personas, y en cambios producidos en la superficie del terreno.

Entre los aparatos para medir los sismos, se encuentran los sismógrafos, que se usan principalmente para determinar los epicentros y mecanismos focales. Para fines de ingeniería los más importantes son los acelerógrafos que proporcionan la variación de aceleraciones con el tiempo, en el lugar donde están colocados. El número y la calidad de estos aparatos han aumentado extraordinariamente en los años recientes y ha permitido grandes avances en el conocimiento de las características de la excitación sísmica inducida en las construcciones. Los mismos aparatos colocados en los edificios permiten determinar la respuesta de éstos a la acción sísmica.

Los acelerógrafos contienen sensores dispuestos de tal manera que registran la aceleración del terreno en tres direcciones ortogonales (dos horizontales y una vertical). Los parámetros más importantes para definir la intensidad del movimiento y sus efectos en las estructuras, son la *aceleración máxima* expresada generalmente como fracción de la gravedad, la duración de la fase intensa del movimiento y el contenido de frecuencias. Éste último se refiere a la rapidez del cambio de dirección del movimiento y es importante para definir el tipo de estructura que será más afectado. Esto último se refleja en el llamado espectro de respuesta.

Mientras más cerca está el período dominante del movimiento del suelo del período fundamental de vibración de la estructura, más críticos serán los efectos del sismo. En la generalidad de los sismos, la aceleración vertical del terreno es sustancialmente menor que las horizontales. Excepto en los registrados muy cerca del epicentro.

## 2.- PUENTES

Son obras muy interesantes en el campo de la ingeniería civil y constituyen una solución indispensable para salvar los obstáculos geográficos que impiden la comunicación entre las comunidades humanas. Desde tiempos muy remotos, su construcción es un claro ejemplo del proceso de desarrollo que todas las construcciones humanas experimentan y que van desde las

formas más simples hasta las más elaboradas y complejas. Es posible que el primer puente haya sido un simple tronco de árbol atravesado sobre un pequeño riachuelo. Los materiales utilizados, el cálculo y diseño, el proceso constructivo, la operación y el mantenimiento son aspectos particulares en los que se puede distinguir la evolución que a lo largo de la historia han tenido estas estructuras.

Pese a la sofisticación que en la actualidad ha alcanzado la construcción de puentes, son estructuras que como cualquier otra, están expuestas a la acción de los fenómenos naturales como el agua, el viento, los sismos, independientemente de las cargas propias que por su naturaleza deben resistir.

Existen diferentes razones por las que un puente puede colapsar, pero quizá la más destructiva y súbita son los sismos. Hay notables ejemplos en la historia reciente de los centros urbanos en diferentes países, en los que la ocurrencia de un movimiento telúrico deja en evidencia la altísima vulnerabilidad que estas estructuras tienen, tal como ocurrió con los sismos de Loma Prieta en 1989, Northridge en 1994 y Kobe en 1996. Por esa razón, es necesario identificar los puentes sísmicamente más vulnerables como un paso previo para la posterior elaboración de estudios de planificación, mejora sísmica y mitigación de desastres debidos a terremotos. Para los fines de este trabajo se entiende como *vulnerabilidad sísmica* de un puente, a la predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de una acción sísmica determinada y que está directamente relacionada con sus características de proyecto (Maldonado, 2000).

### 3.- ÁREA DE ESTUDIO

Ensenada, Baja California es una ciudad y puerto que se localiza en el noroeste de México, a 300 km al suroeste de Mexicali, la capital del estado y a 113 km al sur de Tijuana. Colinda al norte con los municipios de Playas de Rosarito, Tijuana y Tecate, al sur con el estado de Baja California Sur, al este con el Golfo de California y municipio de Mexicali, y al oeste con el Océano Pacífico. Posee una temperatura promedio anual de 21°C. Con una población de aproximadamente 260 000 habitantes en la zona urbana, registra una tasa anual de crecimiento de 2%. Esta ciudad, es la cabecera del municipio de Ensenada, considerado uno de los más antiguos de Baja California y el más grande del país en extensión territorial, ya que tiene una superficie de 51 952.3 km<sup>2</sup>, que representan el 74.1% de la extensión del estado de Baja California y el 2.6% de la superficie del país. Según el censo de población del año 2000, el municipio tenía 370 730 habitantes. Ensenada es el puerto más importante del Estado de Baja California (Figura 1).



Figura 1 Localización de la Ciudad de Ensenada, Baja California (<http://earth.google.es/>)

Para esta investigación, se define como área de estudio (Figura 2), la zona localizada entre las latitudes  $31^{\circ} 45''$  y  $31^{\circ} 54'$  norte y las longitudes  $116^{\circ} 32'$  y  $116^{\circ} 42'$  oeste. Es una delimitación que obedece a la necesidad de contar con información fidedigna de los puentes y sus características estructurales y sismo-resistentes. En la Tabla 1 se presentan todos los puentes urbanos de Ensenada.

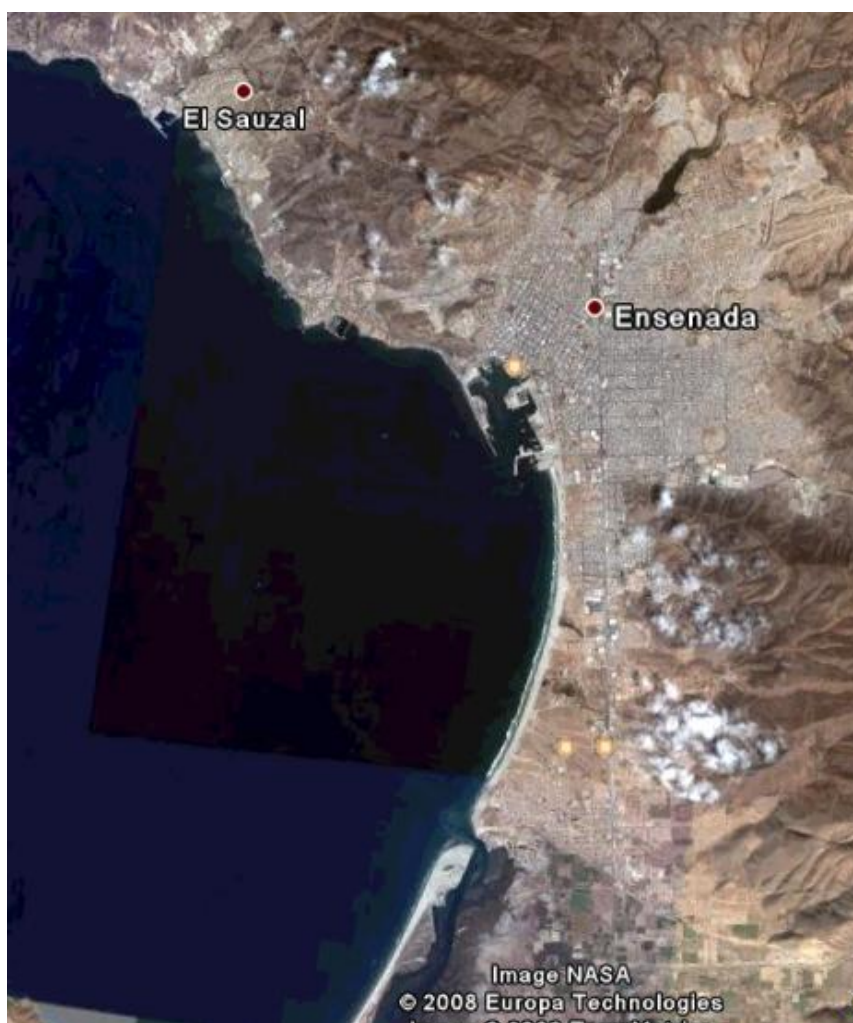


Figura 2 Área de estudio (<http://earth.google.es>).

En la ciudad de Ensenada existen ya algunos estudios que implican a ciertos puentes y su relación con la posibilidad de ocurrencia de un sismo (Cervantes, 2005 y Soares, 2003), sin

embargo se mencionan como casos específicos y desde una perspectiva diferente a la que se propone en este trabajo.

Tabla 1 Los puentes de la zona urbana de Ensenada según el obstáculo que salvan.

| No . | LOCALIZACIÓN                                  | OBSTÁCULO QUE SALVA                    |
|------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1    | BLVD. GRAL. LÁZARO CÁRDENAS                   | CAUCE (Arroyo)                         |
| 2    | CALLE SEGUNDA                                 | CAUCE (Arroyo)                         |
| 3    | AV. JUÁREZ                                    | CAUCE (Arroyo)                         |
| 4    | CALLE NOVENA                                  | CAUCE (Arroyo)                         |
| 5    | CALLE ONCE                                    | CAUCE ( Arroyo)                        |
| 6    | AV. ALISOS                                    | CAUCE ( Arroyo)                        |
| 7    | AV. AMBAR                                     | CAUCE (Arroyo)                         |
| 8    | AV. REFORMA                                   | CAUCE (Arroyo)                         |
| 9    | CALLE ESPINOZA                                | CAUCE (Arroyo)                         |
| 10   | CALLE ONCE (Universidad Xochicalco)           | CAUCE (Arroyo)                         |
| 11   | AV. REFORMA (Centro Comercial Misión)         | CAUCE (Arroyo)                         |
| 12   | PROL. IGNACIO ALLENDE (Iglesia Luz del mundo) | CAUCE (Arroyo)                         |
| 13   | CALLE BRONCE                                  | CAUCE (Arroyo)                         |
| 14   | AV. RIVEROLL                                  | CAUCE (Arroyo)                         |
| 15   | CALLE AGAVES                                  | CAUCE (Arroyo)                         |
| 16   | CALLE PUEBLA                                  | CAUCE (Arroyo)                         |
| 17   | PUENTE NUEVO                                  | BLVD. COSTERO                          |
| 18   | AV. PEDRO LOYOLA                              | CAUCE (Arroyo)                         |
| 19   | AV. REFORMA                                   | CARRETERA<br>TRANSPENINSULAR           |
| 20   | AV. MEXICO                                    | CAUCE (Arroyo)                         |
| 21   | ACCESO A VILLA BONITA                         | CAUCE (Arroyo)                         |
| 22   | ACCESO A ENSENADA POR EL RECINTO PORTUARIO    | VIALIDAD                               |
| 23   | HOTEL Y MARINA “CORAL”                        | ACCESO A ENSENADA<br>POR LA CALLE DIEZ |
| 24   | ACCESO A LA UABC                              | CARRETERA TIJUANA-<br>ENSENADA         |
| 25   | ACCESO A ENSENADA DESDE TECATE (Fondeport)    | CARRETERA TIJUANA-<br>ENSENADA         |
| 26   | CARR. TIJUANA-ENSENADA                        | ACCESO A CÍBOLAS DEL<br>MAR.           |
| 27   | ACCESO CARR. LIBRE A TIJUANA                  | CARRETERA TIJUANA-<br>ENSENADA         |
| 28   | SAN MIGUEL                                    | CAUCE (Arroyo)                         |
| 29   | CARR. TRANSPENINSULAR                         | CAUCE (Arroyo)                         |
| 30   | ACCESO A PLANTA DE CEMENTOS                   | CAUCE (Arroyo)                         |

En el área urbana de la ciudad de Ensenada no hay corrientes fluviales de flujo constante, sólo existen arroyos con caudal leve en época de lluvias, así que la posibilidad de falla por socavamiento o empuje del agua sobre estas estructuras es baja, y dadas las características sismológicas de la región, que tiene a las fallas de San Miguel y Agua Blanca como las que presentan las mayores posibilidades de peligro sísmico dada su cercanía y potencial geométrico para producir terremotos importantes (Soares, 2003), es que cobra mayor relevancia la eventual falla debida a un temblor. Se entiende por *peligro sísmico* a la descripción de los efectos originados por la acción sísmica en el suelo de una zona determinada (Maldonado, 2000).

#### 4.- SISMICIDAD REGIONAL

La ciudad de Ensenada constituye uno de los centros urbanos de mayor importancia en el norte de Baja California. En términos geográficos, se localiza en una región sísmicamente activa originada por la interacción entre las Placas de Norteamérica y del Pacífico, tal como se observa en las figuras 3 y 4.

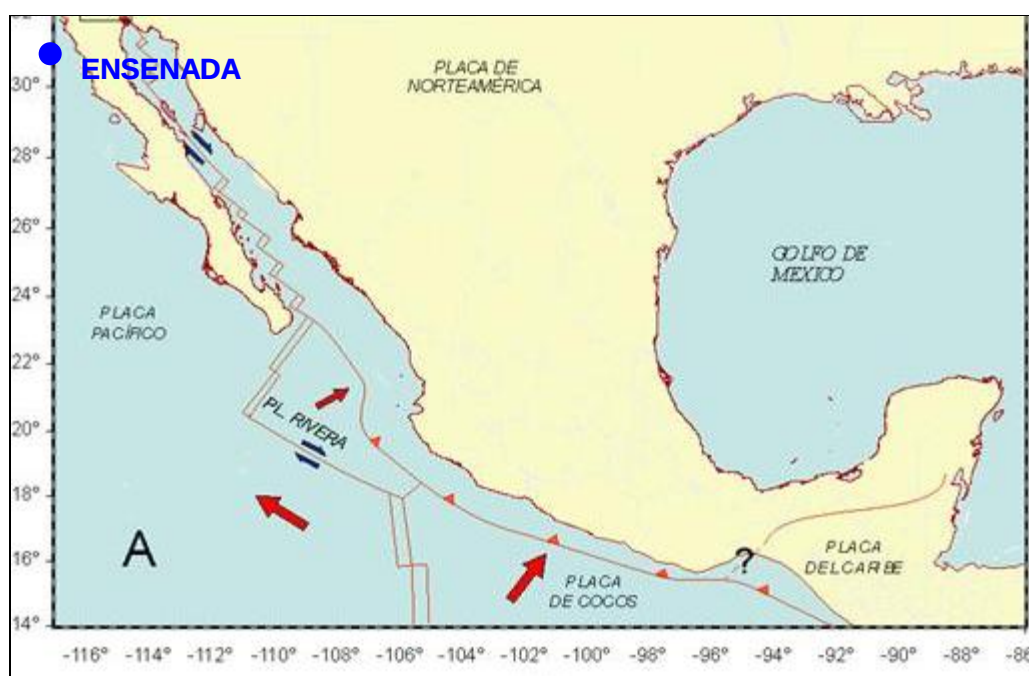


Figura 3 Localización geográfica de la Ciudad de Ensenada en un mapa que indica el esquema general de la tectónica de México. (<http://www.ssn.unam.mx/>)



Figura 4 Interacción de la placa del Pacífico y la de Norteamérica, que originan el sistema regional de fallas geológicas (<http://www.ssn.unam.mx/>)

En Baja California se tiene una elevada incidencia de sismicidad y existen numerosos sistemas de fallas regionales y locales. En la figura 5 se indican las fallas más conocidas en la Península de Baja California. Se aprecia que Ensenada está localizada entre las fallas de San Miguel y la de Agua Blanca, que forman parte del sistema de la falla de San Andrés (Ibarra, 2004).

Los datos históricos de sismicidad y sus registros instrumentales se empiezan a producir en la región a partir de la década de los 70's por la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), y ya desde los 60's, por la hoy conocida como *Southern California Seismic Network* (SCSN). En la figura 6 es posible ver la sismicidad reunida en la región norte de Baja California, México y sur de California, EE.UU. en el periodo 1993-1999. Los epicentros de los sismos ocurridos, configuran con claridad los trazos de las fallas incluidas en el mapa y se identifican así las fallas (o zonas de falla) de mayor actividad sísmica y que por tanto representan el riesgo más alto para la región. Los datos que se grafican expresan de una forma clara el elevado potencial de riesgo estructural ante la inminente ocurrencia de temblores de magnitud igual o mayor a 6.0.

De acuerdo al Departamento de Sismología del CICESE ocurren en el Estado de Baja California, más de 50 sismos de baja magnitud (menor 4) mensuales teniéndose una gran cantidad registrada por la Red Sísmica del Noroeste (Figura 6).



febrero de 1956, fecha en que ocurrieron sismos con magnitud de 6.8 en la falla de San Miguel (Ibarra, 2004).

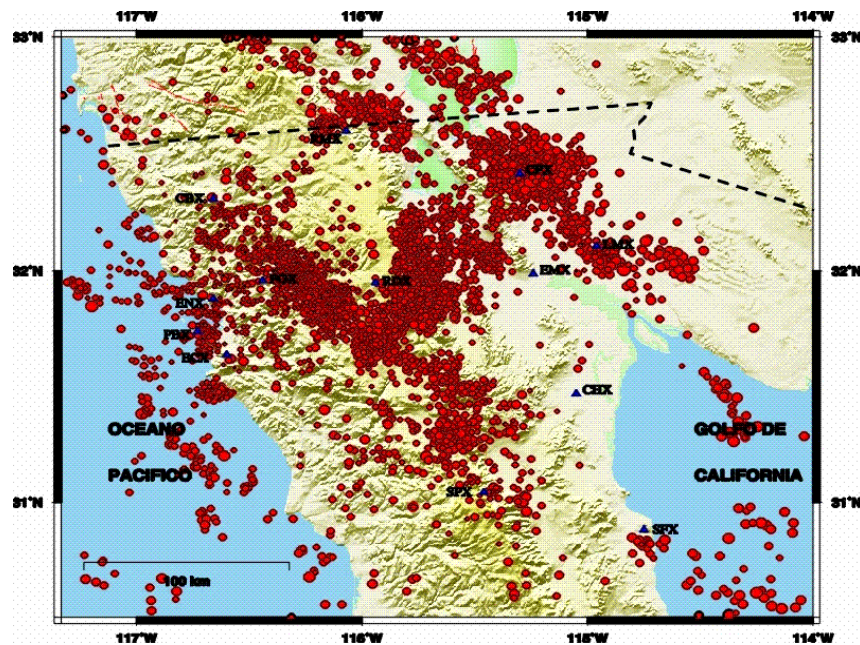


Figura 6 Mapa de localización de epicentros de sismos que ocurrieron de 1993 a 1999, registrados por la Red Sísmica del Noroeste del CICESE (2000).

Sismos muy recientes ubicados al sur de Mexicali, B.C. muestran el carácter activo de las fallas locales. El día 9 de Febrero del 2008, a las 01:12 horas (hora local del centro del país), se registró un sismo de magnitud  $M = 5.5$  cuyo epicentro se localizó aproximadamente 30 km. al sureste de la ciudad de Mexicali, Baja California. Desde ese día y hasta el 20 de febrero de 2008, se reportan 70 temblores con magnitud  $2.5 < M < 5.5$  (Catálogo de la RESNOM).

El origen de los temblores en esta zona se debe a la interacción entre la Placa del Pacífico, sobre la cual se ubica la Península de Baja California, y la Placa de Norteamérica, que contiene la mayor parte del territorio nacional.

El movimiento relativo entre las placas genera que la del Pacífico, al desarrollar un movimiento hacia el noroeste, se aleje de la placa Norteamérica, la cual se desliza en dirección sureste, sin ningún proceso de convergencia ni divergencia de placas. La liberación súbita de la

energía acumulada debido a ese movimiento, es la responsable de la ocurrencia de estos temblores.

En la Tabla 2 se enlistan los eventos registrados desde el día 07 de febrero de 1987 hasta el día 19 de febrero del 2008. En esta tabla se muestran las coordenadas epicentrales para cada uno de los eventos con magnitudes mayores que 5 así como su profundidad y magnitud. Se observa que a medida que pasan los años ocurren mas sismos de magnitud 5 o mayor.

Tabla 2. Listado de sismos ocurridos en Baja California del 30 de noviembre de 1976 al 27 de abril de 2008 entre las coordenadas 30 00.00N, -114 00.00W y 33 00.00N, -117 20.00W (<http://sismologia.cicese.mx/resnom/catalogo/eventos.php>).

| Fecha      | Latitud  | Longitud   | Profundidad (km) | Magnitud |
|------------|----------|------------|------------------|----------|
| -----      |          |            |                  |          |
| 1987 02 07 | 32 23.54 | -115 16.11 | 09.81            | 5.3      |
| 1991 12 03 | 31 45.53 | -115 49.33 | 16.56            | 5.0      |
| 1993 07 08 | 30 15.00 | -114 10.47 | 08.00            | 5.0      |
| 1995 08 02 | 30 19.06 | -114 12.82 | 32.87            | 5.1      |
| 1999 06 01 | 32 22.78 | -115 15.18 | 07.77            | 5.1      |
| 1999 09 10 | 32 22.57 | -115 14.91 | 02.83            | 5.2      |
| 2001 12 08 | 32 06.10 | -115 00.15 | 10.00            | 5.4      |
| 2002 02 22 | 32 20.99 | -115 17.57 | 12.05            | 5.3      |
| 2003 02 07 | 31 35.04 | -115 36.54 | 5.30             | 5.0      |
| 2005 04 27 | 30 26.76 | -114 18.12 | 10.00            | 5.3      |
| 2006 05 24 | 32 24.60 | -115 15.84 | 11.90            | 5.2      |
| 2008 02 09 | 32 27.36 | -115 18.96 | 12.90            | 5.5      |
| 2008 02 11 | 32 27.84 | -115 19.68 | 9.60             | 5.4      |
| 2008 02 12 | 32 28.50 | -115 20.34 | 10.00            | 5.1      |
| 2008 02 19 | 32 28.14 | -115 22.14 | 8.00             | 5.2      |

La configuración tectónica prevaleciente en la región, crea una permanente expectativa en relación con la posibilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de intensidad variable, que pueden propiciar una situación destructiva súbita.

El crecimiento de las ciudades fronterizas de Tijuana y Mexicali, así como de la porción de costa entre Tijuana y Ensenada, ha conllevado la construcción de edificaciones de altura considerable. Resulta evidente el potencial del riesgo sísmico de la región no solo por la

interacción entre las dos placas ya mencionadas, sino además por la existencia en el flanco oeste, del sistema de fallas mar adentro en las costas del océano Pacífico, que se debe a la interacción de las dos placas. Dadas las evidencias de que la mayoría de las fallas de la región son sísmicamente activas, y por tanto representan un elevado potencial de peligrosidad y riesgo sísmico, se justifica plenamente realizar estudios que permitan conocer en mejor medida el comportamiento esperado de la respuesta sísmica de estructuras ante movimientos fuertes o moderados del terreno, considerando que a la fecha en la región es escaso este tipo de estudios.

## 5.- REGIONALIZACIÓN SÍSMICA

Actualmente, la República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas. Esta zonificación se realizó con fines de diseño antisísmico. Empleando los registros históricos de grandes sismos en México, los catálogos de sismicidad y datos de aceleración del terreno como consecuencia de sismos de gran magnitud, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas definió la regionalización sísmica del país incluyendo un mapa en el Manual de diseño de obras civiles (1993), (figura 7).

En la zona A no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% del valor de la gravedad (g). Las zonas B y C presentan menor frecuencia de sismicidad o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el 70% de g. En la zona D han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones del terreno que se esperan pueden ser superiores al 70% de g. El Reglamento de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California (1992) considera a la ciudad de Ensenada, BC, dentro de la zona sísmica clasificada como C (figura 8), que tiene una categoría de frecuencia sísmica intermedia.

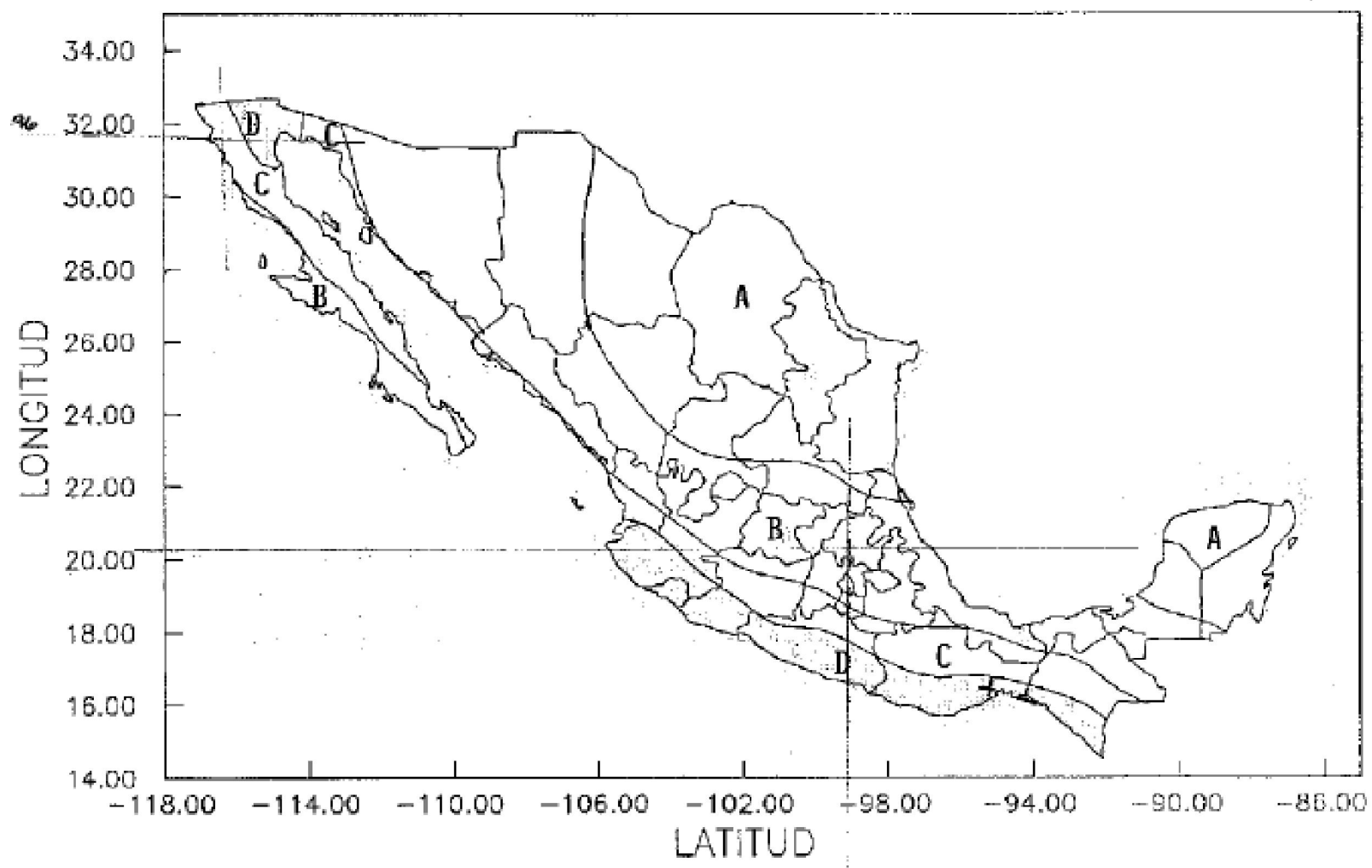


Figura 7 Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE, Manual de Diseño de Obras Civiles, 1993)

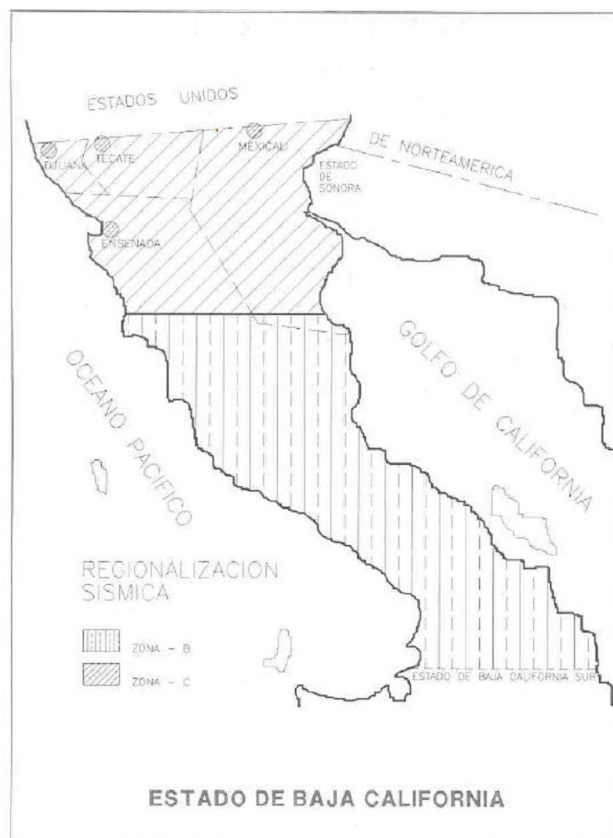


Figura 8 Zonas sísmicas del Estado de Baja California, (Reglamento de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, 1992).

Aunque esta región de la República Mexicana se considera como de sismicidad moderada, es necesario generar estudios de riesgo sísmico que contribuyan a la prevención de los daños que puede causar un sismo de magnitud por encima de los 6 grados.

Es recomendable que las instituciones o la autoridad permanezcan activos ante el riesgo potencial que representan los sismos. Es necesario crear programas específicos para continuar avanzando en la recopilación, procesamiento y análisis de datos relativos a la tipología, materiales y características estructurales de las edificaciones existentes en Baja California. Estos estudios deben conducir a la generación de un banco de datos que permita identificar estructuras o zonas particularmente vulnerables en la región y el consecuente diseño de un plan de acciones preventivas. Toda la información debiera concentrarse en un solo documento que oriente la acción conjunta de instituciones de investigación,

autoridades y sociedad. Saber para prever podría ser la divisa rectora en este proceso que debe iniciarse sin dilación.

En la investigación realizada para este trabajo acerca de la sismicidad existente en el Estado de Baja California, se han consultado diversas fuentes entre ellas el Sistema Sismológico Nacional (SSN), desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM, <http://sismologia.cicese.mx/resnom/catalogo/eventos.php>), auspiciada por el Centro de investigación Científica y Educación superior de Ensenada (CICESE) y de acuerdo con los catálogos históricos de sismos elaborados por estas instituciones, se confirma que la clasificación como zona C establecida para Ensenada es adecuada ya que la magnitud máxima de sismos registrados es de 5.5. No obstante, es necesario aclarar que la información más antigua registrada por este sistema data del año de 1976, aunque han ocurrido sismos de intensidad mayor (Ibarra, 2004)

## 6.- OBJETIVOS

Las características sismológicas de la región en que se encuentra localizada la ciudad de Ensenada, plantean la inaplazable necesidad de continuar avanzando en la elaboración de estudios tendientes a identificar las características de las estructuras que dan sustento a la realización de las actividades productivas, familiares, de estudio, convivencia y diversión. Tales estudios deben propiciar una mejor planeación, diseño, construcción y mantenimiento de las construcciones que inciden en todos los ámbitos de la vida cotidiana.

En esta perspectiva, el presente trabajo se propone en una primera instancia, la evaluación del índice de vulnerabilidad de todos los puentes urbanos de la ciudad de Ensenada utilizando el Método Maldonado, concebido como un método aplicable a las zonas donde no se cuenta con registros de daños. Como una primera aproximación a la identificación de los puentes más vulnerables y que por lo tanto requieren de un estudio más detallado para definir su nivel exacto de vulnerabilidad y en función de los resultados se tomen las medidas pertinentes por parte de la autoridad.

La determinación del índice de vulnerabilidad se hace utilizando un método aplicable en zonas donde no se pueden utilizar modelos de evaluación a partir de daños sísmicos observados, por la carencia de registros o estudios previos. Considerando esa ausencia de información antecedente, es propósito de este trabajo obtener la respuesta de cuatro puentes utilizando vibración ambiental como fuente de excitación.

Como un esfuerzo para iniciar el concentrado de la información relacionada con los fenómenos sísmicos y su influencia en las estructuras, que estudios muy recientes empiezan a documentar (Bejarano, 2000; Salgado, 2001; Soares, 2003; Vargas, 2004; Ibarra, 2004; Espinoza et al., 2004<sup>a</sup>; Espinoza et al., 2004<sup>b</sup>; Cervantes, 2007), esta investigación se plantea la implementación de un Sistema de Información Geográfica incluyendo inicialmente los datos de los puentes de Ensenada.

El vertiginoso crecimiento que la ciudad de Ensenada registra en los últimos cinco años, hace necesaria la adopción de una nueva actitud que implique la generación de la información y el análisis que contribuyan a pensar en la prevención y no sólo en la ejecución de acciones correctivas una vez ocurridos eventos sísmicos que incuestionablemente ponen en riesgo la integridad de propiedades y vidas humanas. Para avanzar en esta perspectiva, el presente trabajo da los pasos iniciales para crear una base de datos que sirvan en primera instancia para prevenir, y de darse el caso, hacer una evaluación posterremoto comparando información antes y después del sismo.

Sintetizando, los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- 1) Calcular el índice de vulnerabilidad con el Método Maldonado de todos los puentes urbanos de Ensenada
- 2) Efectuar mediciones de vibración ambiental de cuatro puentes
- 3) Crear un Sistema de Información Geográfica con los resultados obtenidos

## 7.- VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOS PUENTES URBANOS EN ENSENADA, BC

Para la determinación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, se han desarrollado diferentes metodologías (Gómez Soberón et al., 2000), mismas que pueden agruparse de esta forma;

- o *Técnicas directas*. Pronostican el daño causado por el sismo en una estructura con métodos tipológicos y mecánicos. Se utilizan en zonas de baja sismicidad.
- o *Técnicas indirectas*. Evalúan un índice vulnerabilidad de la estructura, que representa la calidad estructural existente ante cargas sísmicas. Son aplicables en estudios a gran escala.
- o *Técnicas convencionales*. Determinan un índice para comparar diferentes estructuras en la misma área de estudio, basado en la comparación y calibración de diversos factores que afectan la resistencia sísmica de una estructura. Califican empíricamente las características físicas de la estructura o utilizan criterios de normas sismoresistentes para evaluar las relaciones entre capacidad y demanda de una estructura. Son aplicables a estudios a gran escala.
- o *Técnicas híbridas*. Combinan elementos de diferentes técnicas. (Maldonado, 2000).

De manera particular, para el caso de los puentes, alrededor del mundo se han desarrollado diferentes métodos enfocados a la estimación de un factor numérico que sea capaz de indicar la magnitud del daño que un sismo puede ocasionar en este tipo de estructuras.

Hay estudios comparativos detallados de los principales métodos (Maldonado, 2000; Gómez, 2000), que pueden resumirse en lo siguiente;

1) Dicleli y Bruneau (1996) proponen un método rápido y eficiente para la evaluación sísmica de puentes de acero, apoyado en el cálculo de un número que se define

como la relación entre la importancia del puente y su vulnerabilidad. El modelo se basa en una aproximación cuantitativa que utiliza el conocimiento de la respuesta sísmica elástica e inelástica de algunos tipos de puentes de acero. Se enfoca a evaluar el riesgo en todas las zonas de amenaza sísmica.

2) Seong Kim se apoyó en información de las condiciones estructurales de los puentes a lo largo de su vida útil y de datos de daños sísmicos de algunos de ellos. Con esta información, realizó un estudio estadístico y propuso dos modelos: uno lineal y otro no lineal, que calculan un “índice de daño” que establece la relación entre 12 parámetros considerados de mayor importancia en el comportamiento sísmico de puentes y en el grado de daño. Cada grado se asocia a una categoría de vulnerabilidad “alta”, “moderada” y “baja”.

3) La guía ATC-6-2 (1983) establece dos procedimientos para evaluar la resistencia sísmica de puentes. Uno consiste en establecer una clasificación previa (vulnerabilidad del sistema estructural, sismicidad en el sitio de la estructura, importancia del puente) que identifica los puentes que necesitan un estudio detallado (donde se incluye la determinación de la relación capacidad/demanda para los componentes del puente) para luego incluirlos en un programa de atención; el otro corresponde a un método que evalúa cuantitativamente la capacidad sísmica y la efectividad total. El método evalúa la vulnerabilidad mediante la valoración de los elementos que se consideran más vulnerables (apoyos, pilas y cimentación) ante la acción de un sismo.

4) Pezeshk *et al.* (1993) desarrollaron un *procedimiento preliminar de clasificación sísmica* basado en la valoración de tres áreas principales: estructura, importancia y cimentación. Califica la vulnerabilidad de un puente asignando un máximo de 100 puntos, 50 distribuidos en diferentes parámetros estructurales, 20 para su importancia y 30 para la cimentación y sitio del puente.

5) El ATC-25 (1991) Estudia la vulnerabilidad sísmica e impacto de la ruptura de líneas vitales en los Estados Unidos. Propone funciones de vulnerabilidad para puentes de autopista, de carretera y de ferrocarril basadas en las matrices de probabilidad de daño y pérdidas de función y tiempos de restauración para cada escenario sísmico. Las funciones

de vulnerabilidad consideradas pueden describir el comportamiento sísmico esperado de cada puente y el tiempo requerido para su reparación.

6) Kiremidjian y Basöz (1997) obtuvieron curvas empíricas de fragilidad basados en estudios estadísticos a partir de datos reales recopilados durante los sismos de Loma Prieta y Northridge. estas curvas representan la probabilidad de sufrir o exceder un estado de daño, dado un nivel de acción sísmica.

Específicamente, para la realización de este trabajo se adoptó el Método Maldonado asumiendo la circunstancia de que se tiene la asesoría directa de la autora y para realizar una generalización en la aplicación del método a todos los puentes de la zona urbana de la ciudad de Ensenada continuando así un proyecto ya iniciado por Augusto Cervantes con el cálculo del índice de vulnerabilidad de un solo puente y cuyo resultado se presentó como Tesis de licenciatura en el año 2007, y en dos ponencias (XIII Congreso nacional de ingeniería sísmica en León, Guanajuato en 2003 y 13 Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica celebrada en 2004 en Vancouver, Canadá). Se efectuó trabajo de campo presentándose en el anexo 1 el formato que se utilizó para recabar la información que fue procesada usando como base Conjuntos difusos (Anexo 2) y los índices obtenidos se presentan en las dos últimas columnas de la Tabla 3, donde se observan otras características de los puentes en estudio como son su localización, dimensiones y obstáculo que salva. El puente localizado frente a la planta de Cementos fue retirado de este estudio debido a que no hubo facilidades para acceder a él y tomar datos.

La mayoría de los puentes obtiene una calificación de *poco vulnerable* y la calificación más alta, *medianamente vulnerable* es asignada a los puentes 4, 5, 8, 12, 13, 25 y 28. Estos puentes requieren otros estudios.

Tabla 3 Datos de los puentes urbanos incluyendo el índice de vulnerabilidad sísmica de los puentes urbanos de Ensenada, BC

| NÚMERO       | LOCALIZACIÓN                 |               |               | OBSTÁCULO QUE SALVA | LONGITUD (m) | ANCHO (m)                        | No. DE VANOS | ÍNDICE DE VULNERABILIDAD | ESTADO                  |
|--------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------------|--------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|
|              | VIALIDAD                     | LATITUD       | LONGITUD      |                     |              |                                  |              |                          |                         |
| SECTOR NORTE |                              |               |               |                     |              |                                  |              |                          |                         |
| <u>1</u>     | BLVD. GRAL. LÁZARO CÁRDENAS  | 31°51'33.5"   | 116°37'11.7"W | ARROYO ENSENADA     | 61.50        | 2 secciones de 15.50 m cada una. | 4            | 2.3                      | POCO VULNERABLE         |
| <u>2</u>     | CALLE SEGUNDA                | 31°51'40.6"N  | 116°37'4.3"W  | ARROYO ENSENADA     | 54.7         | 15.50                            | 3            | 3.4                      | POCO VULNERABLE         |
| <u>3</u>     | AV. JUÁREZ                   | 31°51'51.7"N  | 116°36'58.9"W | ARROYO ENSENADA     | 61.70        | 16.70                            | 8            | 3.2                      | POCO VULNERABLE         |
| 4            | CALLE NOVENA (IMPULSORA}     | 31°52'7.30"N  | 116°36'54.3"W | ARROYO ENSENADA     | 43.30        | 17.60                            | 3            | 4.2                      | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 5            | CALLE ONCE (PUENTE JOROBADO) | 31°52'15.88"N | 116°36'52.9"W | ARROYO ENSENADA     | 50.00        | 20                               | 2            | 4.1                      | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 6            | ALISOS                       | 31°52'40.9"N  | 116°36'44.4"W | ARROYO ENSENADA     | 43.00        | 9.5                              | 3            | 2.8                      | POCO VULNERABLE         |
| 7            | AV. AMBAR                    | 31°52'57.7"N  | 116°36'38"W   | (ARROYO ENSENADA    | 18.00        | 21                               | 1            | 3.1                      | POCO VULNERABLE         |
| 8            | AV. REFORMA (PUENTE BONITO)  | 31°53'0.3"N   | 116°36'37.8"W | ARROYO ENSENADA     | 24.50        | 10                               | 5            | 4.7                      | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 9            | AV. ESPINOZA                 | 31°52'9.3"N   | 116°36'47.2"W | ARROYO EL AGUAJITO  | 20.60        | 10                               | 1            | 3.5                      | POCO VULNERABLE         |

| NUMERO            | LOCALIZACIÓN              |         |           | OBSTÁCULO QUE SALVA     | LONGITUD (m) | ANCHO (m)                 | No. DE VANOS | ÍNDICE DE VULNERABILIDAD | ESTADO          |
|-------------------|---------------------------|---------|-----------|-------------------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 10                | CAIEONE (XOHCAC)          | 3°528'N | 116°356'W | AIENEDI AROO ESEADA     | 180          | 168                       | 1            | 36                       | POCUNRABE       |
| 11                | AVHOMA (MÓN)              | 3°529'N | 116°324'W | AIENEDI AROO ESEADA     | 210          | 198                       | 1            | 33                       | POCUNRABE       |
| 12                | HÓLI AIENEDI (LZ DE MUNO) | 3°523'N | 116°342'W | AIENEDI AROO ESEADA     | 140          | 84                        | 3            | 38                       | MIDANMNEVUNRABE |
| 13                | CAIEBONE                  | 3°523'N | 116°352'W | AIENEDI AROO ESEADA     | 150          | 107                       | 1            | 41                       | MIDANMNEVUNRABE |
| 14                | AVHOMOL                   | 3°524'N | 116°350'W | AROCOTÁ FEIRA           | 210          | 145                       | 1            | 33                       | POCUNRABE       |
| 15                | CAIEACAMS                 | 3°533'N | 116°358'W | AROCOTÁ FEIRA           | 83           | 80                        | 1            | 33                       | POCUNRABE       |
| 16                | CAIEPUHA                  | 3°536'N | 116°371'W | AROCOTÁ FEIRA           | 110          | 140                       | 1            | 38                       | POCUNRABE       |
| <b>SECTOR SUR</b> |                           |         |           |                         |              |                           |              |                          |                 |
| 17                | PUNENUEC                  | 3°504'N | 116°348'W | AROCAL GALO             | 218          | 2 TRAMOS DE 230m CADA UNO | 1            | 28                       | POCUNRABE       |
| 18                | AVHIC LOOA                | 3°506'N | 116°332'W | AROCAL GALO             | 195          | 235                       | 1            | 31                       | POCUNRABE       |
| 19                | AVHOMA                    | 3°505'N | 116°310'W | AROCAL GALO Y LIRAMENIO | 625          | 260                       | 5            | 37                       | POCUNRABE       |

| NUMERO          | LOCALIZACIÓN                        |            |             | OBSTÁCULO QUE SALVA    | LONGITUD (m) | ANCHO (m) | No. DE VANOS | INDICE DE VULNERABILIDAD | ESTADO          |
|-----------------|-------------------------------------|------------|-------------|------------------------|--------------|-----------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 20              | AMÉXICO                             | 31°50'42"N | 116°32'43"W | ARCOH GALO             | 180          | 185       | 1            | 33                       | RECUNIRABE      |
| 21              | ACISOA VILAFONIA                    | 31°50'42"N | 116°32'18"W | ARCOH GALO             | 320          | 106       | 1            | 27                       | RECUNIRABE      |
| <b>SECORISE</b> |                                     |            |             |                        |              |           |              |                          |                 |
| 22              | ACISOA ENENADAPOR EL RINO PORUARO   | 31°51'29"N | 116°37'4"W  | CAREIRA TIJANA ENENADA | 350          | 360       | 1            | 38                       | RECUNIRABE      |
| 23              | MIRNACRA                            | 31°52'02"N | 116°39'04"W | CAR TIJANAENS          | 300          | 14        | 1            | 38                       | RECUNIRABE      |
| 24              | ACISOALA UAC                        | 31°51'59"N | 116°40'17"W | CARTIJANAENS           | 320          | 13        | 2            | 37                       | RECUNIRABE      |
| 25              | ACISOA ENENADA DESE TICAE (FONDORI) | 31°53'50"N | 116°42'17"W | CAREIRA TIJANA ENENADA | 285          | 9         | 2            | 4                        | MIDANMNEVUNRABE |
| 26              | ACISOA OBOASDEL MRDESE TIJANA       | 31°54'13"N | 116°42'10"W | CAREIRA TIJANA ENENADA | 250          | 220       | 3            | 28                       | RECUNIRABE      |
| 27              | ACISOA CARRILREA TIJANA             | 31°54'13"N | 116°43'38"W | CAREIRA TIJANA ENENADA | 258          | 9         | 2            | 3                        | RECUNIRABE      |

Continación Tabla No 3

| NUMERO |                           | LOCALIZACIÓN |             | OBSTÁCULO QUE SALVA   | LONGITUD (m) | ANCHO (m) | No. DE VANOS<br>INDICE DE VULNERABILIDAD |    | ESTADO                   |
|--------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------------|--------------|-----------|------------------------------------------|----|--------------------------|
| 28     | SANMUEL                   |              |             | CAYE(NO IDENTIFICADO) | 820          | 10        | 4                                        | 39 | MODERADAMENTE VULNERABLE |
| 29     | CAR TRANSUNAL(SAN CARLOS) | 31°46'16"N   | 116°35'17"W | CAYE(NO IDENTIFICADO) | 300          | 1750      | 3                                        | 38 | MODERADAMENTE VULNERABLE |

Continuación Tabla No. 3

## 8.- VIBRACIÓN AMBIENTAL

El reconocimiento de que los puentes deben soportar cargas dinámicas, lleva a la necesidad de construirlos con un diseño que garantice su integridad estructural, vida de servicio y aceptabilidad ambiental.

La medición de vibración en un puente puede servir para varios propósitos:

- 1) Reconocimiento del problema.** Donde se reporta que un puente está vibrando a niveles tales que causa preocupación a sus usuarios, es necesario establecer si realmente esos niveles comprometen la integridad estructural.
- 2) Monitoreo de control.** Donde los niveles máximos de vibración se han establecido por alguna entidad y esas vibraciones tienen que medirse y reportarse.
- 3) Documentación.** Donde las cargas dinámicas se han establecido en el diseño y se han hecho mediciones para verificar las predicciones de respuesta y proveer nuevos parámetros para el diseño. Se pueden usar cargas ambientales o impuestas. Por ejemplo, se pueden instalar acelerómetros para detectar si la respuesta sísmica origina cambios en la forma de operación de la estructura.
- 4) Diagnóstico.** Cuando se ha establecido que los niveles de vibración requieren ser investigados, se hacen mediciones para proporcionar información para los procedimientos de mitigación. Otro procedimiento de diagnóstico es usar la respuesta estructural a cargas ambientales o impuestas para establecer la condición estructural, por ejemplo después de una carga severa tal como un sismo.

Estos diversos propósitos requieren de una variedad de sistemas de medición cuya complejidad va desde los más simples a los más sofisticados, desplegados en diferentes tipos de investigación, caracterización y evaluación de las vibraciones que afectan a los puentes. Esto aplica a puentes ya existentes, los cuales pueden estar sujetos a algunas

nuevas o cambiantes fuentes de excitación o al diseño de puentes por construirse en un ambiente donde la estructura puede ser excitada significativamente.

#### 9.- PONENCIA 1: CONGRESO INTERNACIONAL VÉRTICE 2006

Para el desarrollo de esta investigación, no se encontró documento alguno en el que se especifiquen procedimientos para realizar la medición de vibraciones de puentes, por lo que un resultado adicional de esta tesis es la elaboración de una guía para ese propósito (Juárez et al., 2006) presentada en el Congreso Internacional de Ingeniería Vértice 2006, cuyo texto íntegro se adiciona a continuación respetándose el formato de presentación de la ponencia.

## LINEAMIENTOS PARA LA INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN PUENTES

Ing. Jesús Raymundo Juárez García<sup>1</sup>, Dr. Fortunato Espinoza Barreras<sup>2</sup>, Dra. Esperanza Maldonado Rondón<sup>3</sup>; Dra. Consuelo Gómez Soberón<sup>4</sup>; Ing. Héctor Fernando Velázquez Gurrola<sup>1</sup>, Ing. Felipe de Jesús Ricalde Lugo<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Estudiante del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería de la UABC, jjuares@uabc.mx

<sup>2</sup> Profesor de la UABC, fortunato@uabc.mx

<sup>3</sup> Investigadora de la Universidad Industrial de Santander, Colombia. emaldona@uis.edu.co

<sup>4</sup> Investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana, cgomez@correo.azc.uam.mx

Palabras clave: vibración ambiental, puentes, estudio sísmico, acelerómetros, norma

### RESUMEN

En este documento, se proponen lineamientos para la instalación de instrumentos de medición de vibraciones en puentes. La propuesta esta basada en la normatividad existente para medir vibraciones en edificios, elaborada por la American National Standards Institute (ANSI), considerando que la propia norma, en su versión ANSI S2.47 (1991) no incluye a los puentes como estructuras que pueden ser objeto de mediciones de vibración.

Para el caso de México, se ha revisado la Normativa para la infraestructura del transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (IMT, 2001/2004), la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Economía (SE, 1990), el Manual de Diseño de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad (IIE, 1996) y ninguna de ellas incluye un apartado relativo a la medición de vibraciones en puentes. No obstante, se tiene noticia de estudios recientes de vibración en puentes realizados en México por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Muriá et. al, 2005).

### INTRODUCCIÓN

Se reconoce que los puentes deben soportar vibraciones y su conocimiento es necesario para el diseño de la integridad estructural durante su vida de servicio. La medición de vibración en un puente puede servir para varios propósitos:

#### **1 Reconocimiento del problema**

Cuando se reporta que un puente vibra a niveles tales que causa preocupación a sus usuarios, es necesario establecer si realmente esos niveles de vibración comprometen la integridad estructural.

#### **2 Monitoreo de control**

Donde los niveles máximos de vibración se establecen por alguna entidad y esas vibraciones tienen que medirse y reportarse.

#### **3 Documentación**

Donde las cargas dinámicas se reconocen en el diseño y se hacen mediciones para verificar las predicciones de respuesta y proveer nuevos parámetros para el diseño. Se pueden usar cargas ambientales o impuestas.

#### **4 Diagnóstico**

Donde se establece que los niveles de vibración requieren ser investigados, se hacen mediciones para proporcionar información a ser utilizada en los procedimientos de mitigación. Otro procedimiento de diagnóstico es usar la respuesta estructural a cargas ambientales o impuestas para establecer la condición estructural, por ejemplo después de una carga severa tal como un sismo.

Estos diversos propósitos requieren de una variedad de sistemas de medición cuyo intervalo va desde los más simples a los más sofisticados, desplegados en diferentes tipos de investigación, caracterización y evaluación de estas vibraciones que afectan a los puentes. Esto aplica a puentes existentes, los cuales pueden estar sujetos a algunas fuentes de excitación nuevas o cambiantes, o al diseño de puentes que se construirán en un ambiente que puede ser excitado significativamente.

El material de esta propuesta se puede usar en una medición de la vibración estructural y no debe considerarse para evaluar si se trata de niveles aceptables o no. Quedan fuera aspectos económicos y sociales que podrían darse como apropiados por organismos regulatorios nacionales.

### **ALCANCE Y CAMPO DE APLICACIÓN**

Estos lineamientos establecen los principios básicos para realizar medición de vibraciones con el objetivo de evaluar los efectos de la vibración en puentes. La respuesta estructural depende de la excitación; con este fin, es deseable examinar los parámetros de medición afectados por la fuente, como frecuencia, duración, y amplitudes inducidos por cualquier fuente como terremotos, explosiones nucleares, efectos de viento, explosiones sónicas, tráfico, actividades de construcción, cargas laterales por flujo y otros.

La evaluación de los efectos de la vibración se dirige principalmente a la respuesta estructural, e incluye métodos analíticos apropiados donde la frecuencia, la duración, y la amplitud se pueden definir.

Hay diferencias entre las vibraciones producidas por terremotos y las artificiales. Las fuentes sismo-falla-ruptura son mas grandes en tamaño y mucho más profundas que las fuentes artificiales. Aquellas pueden causar daño a grandes distancias, tener mucho mayor flujo de energía y duración y un modelo diferente de propagación de onda. Por consiguiente, para el mismo valor de parámetro (por ejemplo, aceleración pico de partícula), los efectos en puentes son diferentes.

### **FACTORES RELACIONADOS CON LA FUENTE**

#### **1 Duración**

La duración de la fuerza de excitación dinámica es un importante parámetro. Para el propósito de esta propuesta, la respuesta puede ser considerada como continua o transitoria, y el tipo de respuesta será dictado por la relación entre las constantes de tiempo asociadas con la respuesta estructural y la función de forzamiento (forcing function).

La constante de tiempo de una respuesta resonante para el modo de resonancia  $n$ , en segundos,  $\tau_n$  esta dado por la siguiente fórmula:

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi\xi_n f_n}$$

Donde  $\xi_n$  es la razón de amortiguamiento del modo de resonancia  $n$ , expresado como una fracción;

$f_n$  es la frecuencia (lo más bajo esperado) en el modo  $n$  de la resonancia

## 2 Frecuencia

El intervalo de frecuencias de las vibraciones de interés depende de la distribución de contenido espectral de frecuencias de la excitación y de la respuesta mecánica del puente. Esto señala el contenido espectral como una muy importante propiedad de vibración de entrada.

Para simplicidad, el puente oscila con frecuencias en los límites de 0.1 a 500 Hz; este intervalo cubre la respuesta de puentes en una amplia variedad de causas de excitación natural (viento y terremoto) y artificial (construcción, voladura, tráfico). Las fuentes naturales, como terremotos, por lo general contienen energía en frecuencias en el intervalo de 0.1 a 30 Hz. La excitación por viento tiende a tener una energía significativa en la variedad de frecuencia de 0.1 a 2 Hz.

## 3 Amplitud

Los niveles de vibración de interés se extienden desde  $10^{-3}$  mm/s<sup>2</sup> cuando se considera como fuente de excitación la vibración ambiental hasta  $10^4$  mm/s<sup>2</sup> cuando ocurre un sismo de aceleración  $g$ .

### Posiciones de los sensores

Donde el objetivo es supervisar lo que se refiere a vibración impuesta, la posición preferida está en la cimentación, una posición típica que se localiza en un punto bajo en el pared externa de las pilas y en los estribos.

Las mediciones de vibración de respuesta generada por tráfico, cargas estáticas y dinámicas máximas, tracción y explosiones, muestran que la vibración puede amplificarse en proporción a la altura y longitud del puente, por lo tanto, es necesario hacer mediciones simultáneas en varios puntos a lo largo del mismo. Deben hacerse mediciones simultáneas en la cimentación y a campo abierto para establecer funciones de transferencia que es conveniente evaluar mediante funciones de coherencia.

Si un puente tiene más de 10 m de largo, deben instalarse posiciones de medición en intervalos horizontales de aproximadamente 10 m. Los puntos de medición adicionales

deben hacerse en respuesta a la petición de los usuarios y como una consecuencia de observaciones iniciales.

Para investigaciones de tipo analítico, el posicionamiento dependerá de los modos de deformación considerados. La mayoría de los casos prácticos están económicamente limitados a la identificación de los modos fundamentales y medición de las respuestas máximas en la estructura entera junto con observaciones sobre elementos tales como cubiertas, pilas y estribos.

La instalación de sensores en un puente depende de la vibración de respuesta. La determinación del comportamiento estructural o de la deformación por cortante del puente requiere mediciones directamente en los miembros cargados de la estructura. Usualmente esto involucra tres componentes de medición aunque son posibles arreglos de tipo radial u otros.

A veces, los movimientos de la cubierta o los parapetos son preocupantes, con amplitudes máximas en centros de claro o en posiciones intermedias. Aunque algunas veces estas vibraciones son muy severas, por lo general no comprometen la integridad estructural del puente. En la figura 1 se muestra un diseño típico de distribución de sensores en un puente.

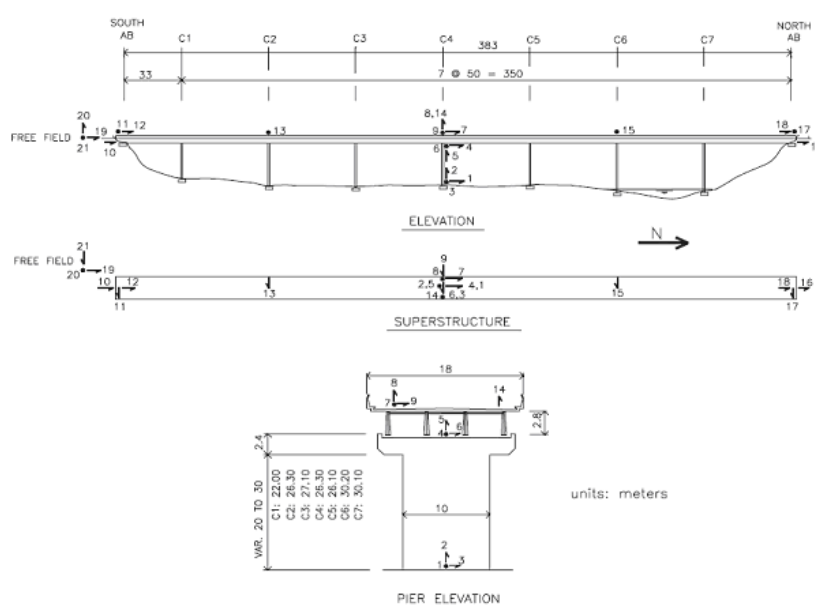


Figura 1 Ubicación de sensores con distribución horizontal y vertical en un puente (Sarrazin et. al, 2005).

En casos donde se deben hacer mediciones relativas a las vibraciones transmitidas por el suelo como cuando se estudian fuentes de vibración del suelo, es usual orientar los sensores con respecto a una dirección radial, definida como la línea que une la fuente y el sensor.

Cuando se estudian respuestas estructurales debidas a vibraciones del suelo, es más realista orientar los sensores con respecto a los ejes mayor y menor de la estructura.

Las mediciones de vibración hechas sobre o bajo la superficie del suelo pueden verse afectadas por la variación de la amplitud de una onda superficial con la profundidad. La cimentación del puente puede estar expuesta entonces a un movimiento que es diferente al observado en la superficie de la tierra dependiendo de la longitud de onda, profundidad de la cimentación y las condiciones de geotécnicas del sitio.

Para la vibración inducida por viento, a menudo se prescinde de las componentes verticales y la disposición del instrumento de medición debe hacerse considerando los modos rotacionales y de translación.

## **FIJACIÓN DE SENSORES**

### **Acoplamiento a elementos estructurales**

El objetivo debe ser reproducir fielmente el movimiento del sustrato sin introducir respuestas adicionales relacionadas con el sistema acelerómetro-sustrato. Debe tenerse cuidado con los ensamblajes triaxiales para evitar vaivenes o flexión.

La masa del sensor y la unidad de monitoreo no deben ser mayores que el 10% del elemento del puente en el cual se montan. El montaje será tan suave y ligero como sea posible.

Deben evitarse las abrazaderas. Es mejor fijar tres sensores uniaxiales a las tres caras de un cubo de metal rígidamente montados por medio de clavos o resina de alta adherencia. El montaje del sensor puede asegurarse al elemento del puente mediante tornillos de expansión. Para mediciones sobre elementos de concreto ligero es preferible utilizar juntas de yeso.

En circunstancias especiales, es aceptable pegar el sensor usando atracción magnética excepto en los casos en los que los acelerómetros a utilizar incluyen magnetos o bobinas porque se pueden modificar los campos magnéticos de los sensores

### **Acoplamiento al suelo**

Si las condiciones del suelo lo permiten, el sensor puede fijarse a una barra de acero (con un diámetro no menor a 10 mm) clavada a través de una capa superficial suelta. Esta varilla no debe hincarse más de unos milímetros bajo la superficie del suelo. Debe tenerse cuidado de asegurar el estrecho contacto de la barra con el suelo. En los casos en los que se esperan aceleraciones mayores a 0.2 g, es necesario un montaje firme para prevenir el deslizamiento. Se requiere cuidado para cualquier montaje en el que se emplee una barra de acero, para no introducir resonancias indeseadas.

Donde los sensores tienen que montarse en la tierra, con el objeto de minimizar la distorsión por acoplamiento, deben sepultarse a una profundidad al menos tres veces la dimensión principal del sensor/unidad de montaje. O bien, puede fijarse a un plato superficial rígido con una proporción de masas ( $m/\rho r^3$ ) no menos de 2. La variable  $m$  es la masa del plato superficial y  $r$  es el radio de un círculo con la misma área que el plato. Este puede ser, por ejemplo, una losa de pavimento bien fijada. Para la mayor parte de los suelos, el intervalo de la densidad de masa,  $\rho$ , va de los 1500 a los 2600 kg/m<sup>3</sup>.

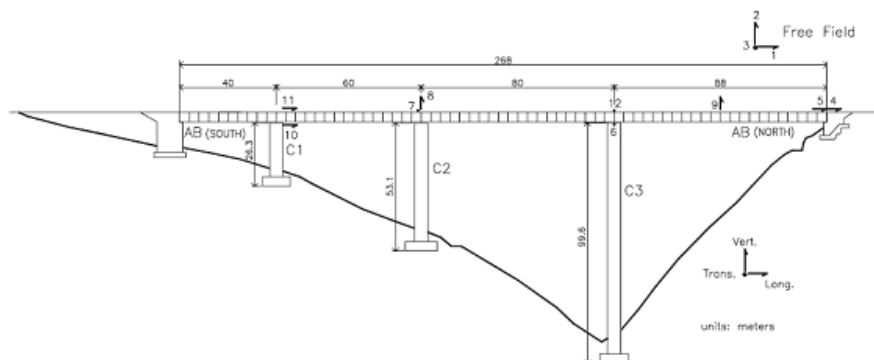


Figura 2 Ubicación horizontal, vertical y a campo abierto de acelerómetros (Sarrazin et. al, 2005).

## COMENTARIOS A LA PROPUESTA

Existe una tipología diversa de puentes que hacen necesario considerar factores ausentes en los edificios, como por ejemplo la acción de cargas laterales sobre las pilas en puentes construidos sobre cuerpos de agua. En este trabajo se hace una propuesta que se considera muy adecuada y los autores consideramos que es conveniente complementarla a futuro recabando más información sobre los trabajos ya realizados en puentes.

La caracterización apropiada de la vibración de un puente requiere un número de posiciones de medición que dependen del tamaño y la complejidad del puente, la pregunta de interés y la disponibilidad de acelerómetros.

## REFERENCIAS

**American National Standard Institute, 1990 (ANSI S2.47-1990).** *Vibration of Buildings-Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of their Effects on Buildings.* Acoustical Society of America. Nueva York, Estados Unidos de América.

**CFE (Comisión Federal de Electricidad), Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1993.** *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño Sísmico.* Editado por CFE, México.

**Instituto Mexicano del Transporte. 2001/2004.** <http://normas.imt.mx/carr.htm>

**Murià Vila, David; Sánchez Ramírez, Abraham Roberto, Gómez Martínez, Roberto; Rodríguez Gutiérrez, Gerardo y Mendoza García, Miguel Ángel. 2005.** *N° A09-03 Pruebas Experimentales En Las Vías Elevadas De La Ciudad De México.* Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas. Concepción, Chile.

**Sarrazin, Mauricio; Moroni, Ofelia y Roesset, Jose M. 2005.** *Evaluation of Dynamic Response Characteristics of Seismically Isolated Bridges in Chile.* Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol 34:425–448.

**Secretaría de Economía, 1990.** <http://www.economia-noms.gob.mx/>

#### 10.- PONENCIA 2 : XVI CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA SÍSMICA

La siguiente etapa de investigación y sus resultados se presentaron en dos ponencias (Huerta et al., 2007; Juárez et al., 2007) en el XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica celebrado en noviembre de 2007 en la ciudad de Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero. Estos artículos se transcriben a continuación.

## **VIBRACIÓN AMBIENTAL EN PUENTES URBANOS DE ENSENADA, BC**

**Carlos Isidro Huerta López<sup>1</sup>, Fortunato Espinoza Barreras<sup>2</sup>, Jesús Raymundo Juárez García<sup>2</sup>, José Guadalupe Acosta Chang<sup>1</sup>, Rosalba Sofía Contreras Porras<sup>1</sup>, América Reynaga Márquez<sup>2</sup>, Esmeralda Ramírez González<sup>2</sup>, González Ortega José Adrián<sup>2</sup>, Yuriam Baltazar Cifuentes<sup>3</sup>, Mariana Figuera Martínez<sup>4</sup> y Ramón Salazar Rodríguez<sup>2</sup>**

### **RESUMEN**

Se trabaja de manera conjunta entre la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) para caracterizar los puentes urbanos de Ensenada, Baja California. Con este proyecto se obtienen datos de vibración ambiental de cuatro puentes para complementar el Sistema de Información Geográfica (SIG) a presentarse en otro trabajo en este mismo congreso. El objetivo final es tener información para evaluar la situación de los puentes regionales y elaborar un SIG que permita estimar el riesgo sísmico.

### **ABSTRACT**

This is a joint research between the Autonomous University of Baja California (UABC) and the Center of Scientific Research and Higher Education of Ensenada (CICESE) to characterize the urban bridges of Ensenada, Baja California. With this project there is obtained information of ambient vibration of four bridges to complement the System of Geographical Information (SIG) to appearing in another work in the same congress. The final aim is to have information to evaluate the situation of the regional bridges and to elaborate a SIG that allows to estimate the seismic risk.

### **INTRODUCCIÓN**

Este trabajo se realiza en Ensenada, Baja California, ciudad al norte de México y a 300 km al sur de Los Ángeles, California. Esta ciudad se localiza en una zona de sismicidad moderada de acuerdo con el mapa de regionalización sísmica de México y del Reglamento de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California promulgado en 1992 y no existen

---

<sup>1</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, CP 22870, Ensenada, BC. [chuerta@cicese.mx](mailto:chuerta@cicese.mx)

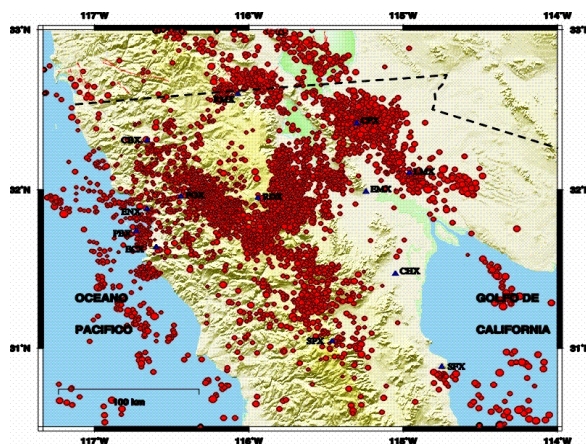
<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, km 107 carretera Tijuana-Ensenada, 22870 Ensenada, BC, teléfono (646) 1317814. [jjuares@uabc.mx](mailto:jjuares@uabc.mx), [fortunato@uabc.mx](mailto:fortunato@uabc.mx)

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Facultad de Física. [yuriambaltazar@yahoo.com.mx](mailto:yuriambaltazar@yahoo.com.mx)

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Tamaulipas. Ingeniería en Geociencias. [maf14@hotmail.com](mailto:maf14@hotmail.com)

estudios tendientes a la prevención del desastre que pudiera ocasionar la eventual falla de una o varias de estas estructuras debido a la ocurrencia de algún terremoto. De acuerdo al Departamento de Sismología del CICESE (<http://sismologia.cicese.mx/resnom/catalogo/mes.php>), ocurren en el Estado de Baja California, más de 50 sismos de baja magnitud (menor 4) mensuales teniéndose una gran cantidad registrada por la Red Sísmica del Noroeste (Figura 1).

El objetivo de este estudio es medir experimentalmente la respuesta estructural de los puentes urbanos de Ensenada, BC, para identificar el periodo fundamental de vibración de estas estructuras. Hasta el verano de 2007 se ha trabajado en cuatro puentes y se continuará hasta tener los 29 existentes en la ciudad. Información preliminar sobre esta investigación desde el punto de vista de los estudiantes que están participando fue presentada por Reynaga et al. (2007).



**Figura 1** Mapa de localización de epicentros de sismos que ocurrieron de 1993 a 1999. Fueron registrados por la Red Sísmica del Noroeste del CICESE (2000).

## VIBRACIÓN AMBIENTAL

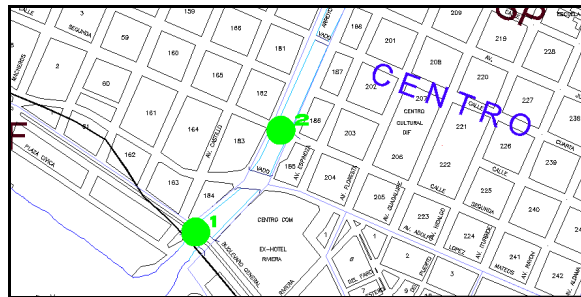
La fuente de excitación utilizada para medir la respuesta de las estructuras es el ruido cultural o vibración ambiental que consiste en ondas de muy pequeña amplitud y periodos comprendidos entre 0.1 y 10 s. Se genera principalmente por la actividad humana y se debe al funcionamiento de maquinaria industrial y al tráfico de vehículos. Además también contiene vibraciones producidas por el viento, que son introducidas en el subsuelo por árboles, edificaciones o por su impacto con el relieve. Su fuente no está asociada a terremotos y algunos investigadores consideran que el ruido de origen natural está formado por ondas superficiales generadas en zonas de interacción océano-continente, modos fundamentales de vibración del planeta, cambios en la presión atmosférica y actividad volcánica interna, además de las fuentes artificiales anteriormente citadas (Espinoza, 1999). Esta fuente de excitación tiene la ventaja de ser de tan baja amplitud que es no destructiva, es decir que no agrede a la estructura.

## PUENTES EN ESTUDIO

Se realizan mediciones de vibración en cuatro puentes urbanos de la ciudad de Ensenada, siendo todos de concreto reforzado y tres de ellos con vigas pretensadas simplemente apoyadas sobre pilas y uno de cajón nervado apoyado sobre los estribos (Tabla 1). Ubicaciones y fotos de los puentes se muestran en las figuras 2, 3 y 4 (puente Calle Segunda), en las figuras 5, 6 y 7 (puente Villabonita), en las figuras 8, 9 y 10 (puente El Gallo) y figuras 11 y 12 (puente Calle Nueve).

**Tabla 1 Datos de los cuatro puentes medidos incluyendo tipos estructurales, dimensiones en planta, número de vanos y obstáculos que salvan.**

| PUENTE        | TIPO ESTRUCTURAL                                                           | LONGITUD | ANCHURA | NÚMERO DE VANOS | OBSTÁCULO QUE SALVA |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|----------|---------|-----------------|---------------------|
| Calle Segunda | concreto armado con vigas pretensadas simplemente apoyadas sobre pilas     | 54.70 m  | 15.40 m | tres            | Arroyo Ensenada     |
| Villabonita   | concreto armado con vigas pretensadas simplemente apoyadas sobre pilas     | 32.00 m  | 10.60 m | uno             | Arroyo El Gallo     |
| El Gallo      | concreto armado como cajón nervado apoyado directamente sobre los estribos | 18.00 m  | 18.50 m | uno             | Arroyo El Gallo     |
| Calle Nueve   | concreto armado con vigas pretensadas simplemente apoyadas sobre pilas     | 43.30 m  | 17.60 m | tres            | Arroyo Ensenada     |



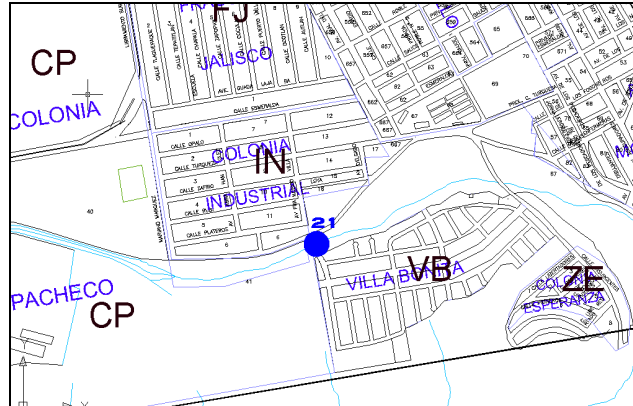
**Figura 2 Fotografía y parte del mapa con la localización del puente de la calle Segunda. En la parte inferior se observa el puente Boulevard General Lázaro Cárdenas.**



**Figura 3 Fotografías de ambos estribos del puente de la calle Segunda.**



**Figura 4 Fotografía del puente de la calle Segunda, desde aguas abajo (vista desde el mar).**



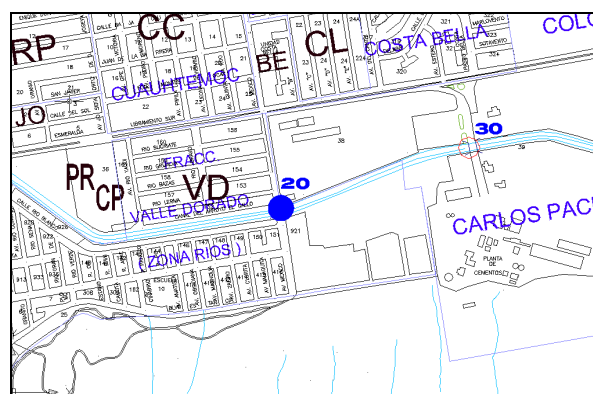
**Figura 5 Fotografía y parte del mapa con la localización del puente Villabonita.**



**Figura 6 Vista desde abajo del puente Villabonita**



**Figura 7 Vista desde aguas arriba del puente Villabonita**



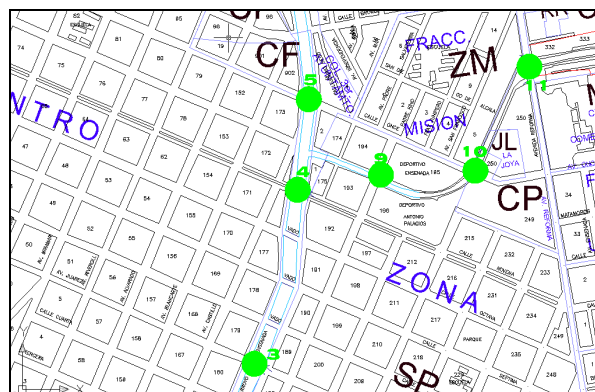
**Figura 8 Fotografía y parte del mapa con la localización del puente El Gallo.**



**Figura 9** Fotografías del puente El Gallo tomadas sobre la calle México.



**Figura 10** Fotografía del puente El Gallo desde el cauce aguas abajo.



**Figura 11** Fotografía y parte del mapa con la localización del puente de la calle Nueve. Se observan las localizaciones de otros puentes.



**Figura 12** Fotografía del puente de la calle Nueve tomada desde aguas abajo.

## TRABAJO DE CAMPO

### INSTRUMENTACIÓN

En la recolección de las señales se utilizó una grabadora Kinometrics modelo SSR-1 de seis canales, cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 2. Para establecer los parámetros de grabación se utiliza una computadora portátil que se conecta a la grabadora y con el protocolo de comunicación se definen los parámetros para iniciar la toma de datos (Figura 13). Cuando la señal se registra por los sensores, entra a la grabadora, donde dependiendo de la forma en que se desee registrar la señal, se selecciona el número de canales de registro, la velocidad de muestreo, la ganancia, y el tipo de filtro que se desee utilizar.

**Tabla 2 Especificaciones de la grabadora Kinometrics modelo SSR-1.**

|                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Tipo de almacenamiento         | Memoria de estado sólido        |
| Convertidor analógico digital  | 16 bits                         |
| Rango máximo de voltaje        | $\pm 2.5$ v                     |
| Tipos de filtros               | Butterworth de 6 polos y Bessel |
| Frecuencia de corte de filtros | 5, 15 ó 50 Hz                   |
| Ganancias                      | 1, 10, 100 ó 1000               |
| Frecuencia de muestreo         | 50, 100 o 200 muestras/s        |

Como sensores, se utilizaron tres acelerómetros EpiSensor modelo FBA ES-T (Figura 14) que usan elementos piezoeléctricos para detectar las tres componentes ortogonales de las vibraciones. Sus especificaciones se presentan en la tabla 3.



**Figura 13 Grabadora y computadora personal para la toma de datos de vibración ambiental**



**Figura 14 Acelerómetros y accesorios utilizados en la toma de datos.**

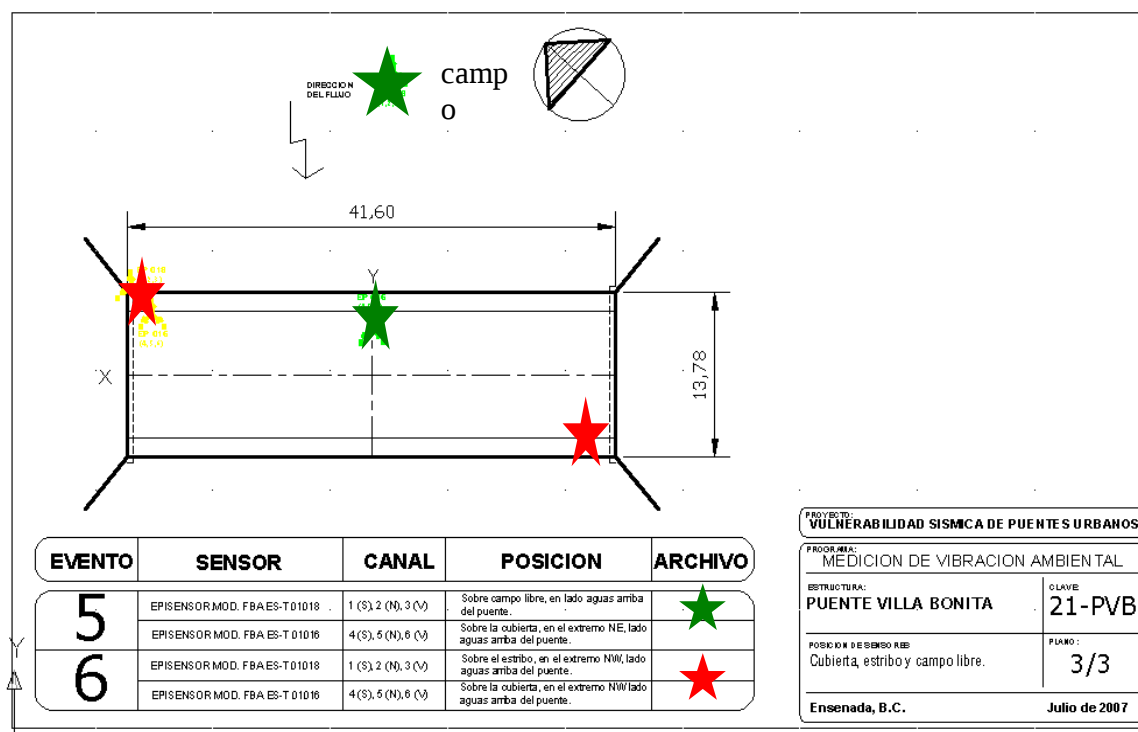
**Tabla 3 Especificaciones de los acelerómetros triaxiales Epi-Sensor modelo FBA ES-T.**

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| Ancho de banda                   | DC-200 Hz    |
| Sensitividad (X, Y, Z)           | 20 V/g       |
| Rango a escala total             | $\pm 0.25$ g |
| Voltaje al rango de escala total | 20 V         |

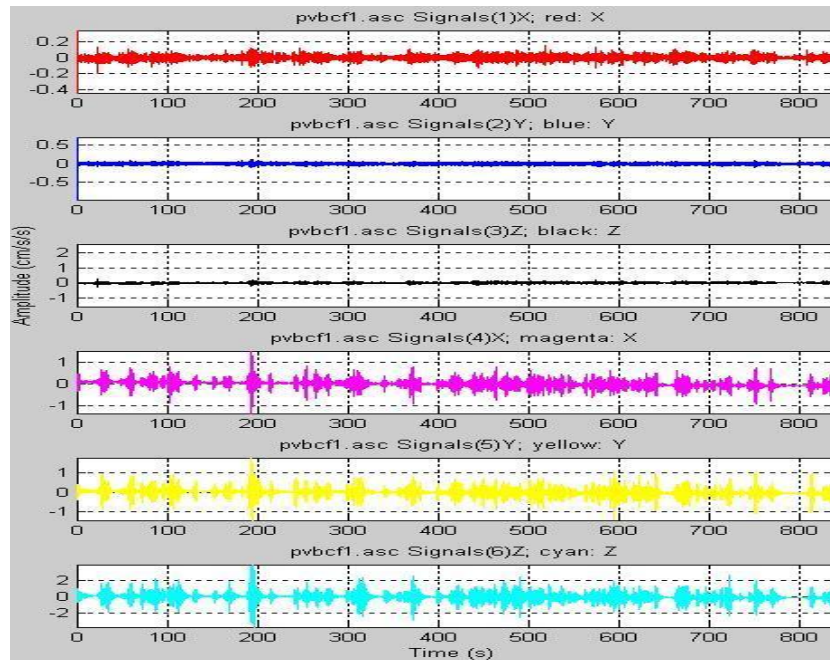
## MEDICIÓN DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Se efectuaron mediciones de vibración ambiental con diferentes arreglos de sensores dependiendo de las características geométricas de cada puente. En la figura 15 se muestran dos de las configuraciones utilizadas presentándose en este trabajo los datos y resultados obtenidos cuando se coloca un acelerómetro en el centro del claro y otro en campo libre sobre el cauce del arroyo correspondiente. Para cada uno de los arreglos se registraron simultáneamente las tres direcciones ortogonales del movimiento asignándose siempre el eje X a la dirección longitudinal, el eje Y a la transversal y el Z a la vertical.

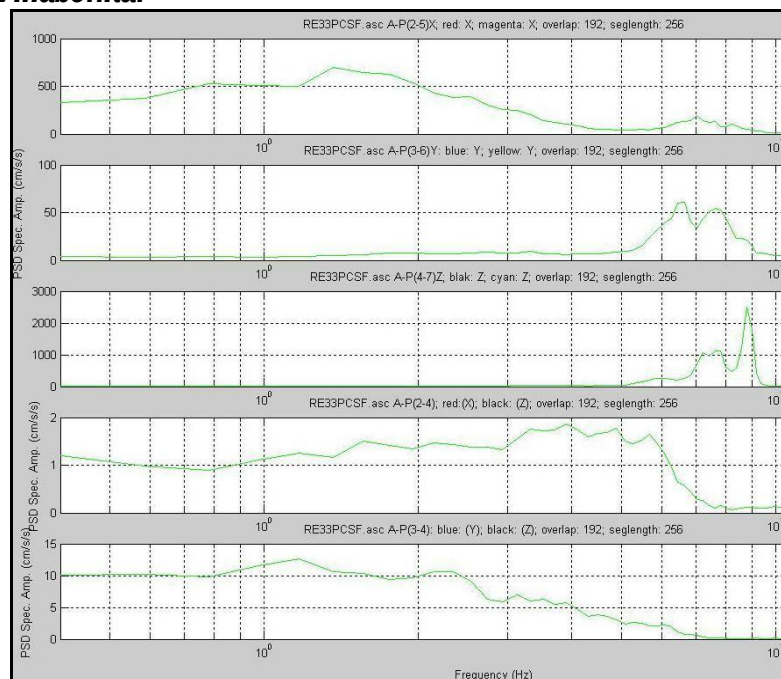
La longitud de las series de tiempo colectadas fue de entre 10 y 20 minutos y la frecuencia de muestreo en todos los casos fue de 50 Hz. Las señales de vibración ambiental registradas (figura 16), se procesaron en el dominio de las frecuencias para obtener las funciones de transferencia (figuras 17 a 20) utilizando como salida la señal en la cubierta del puente y como entrada la señal medida en campo libre.



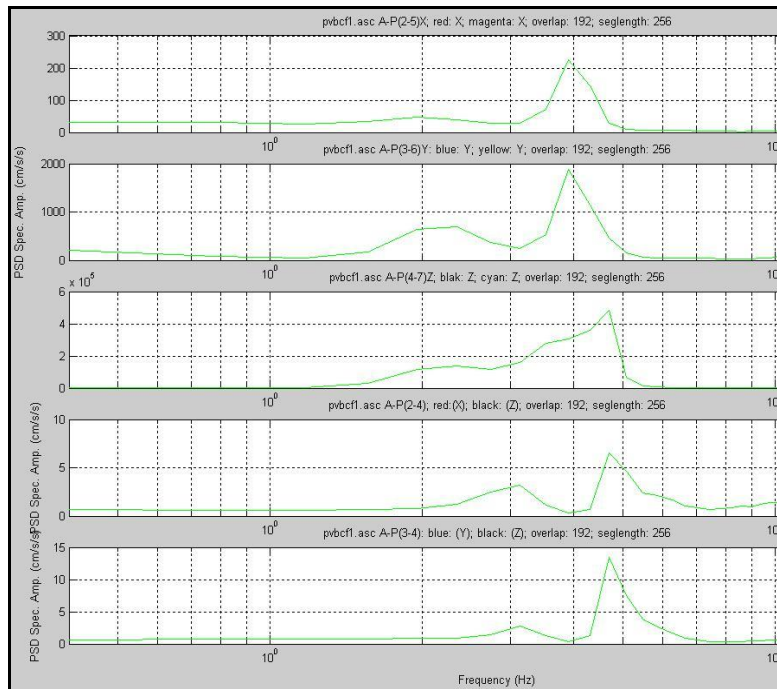
**Figura 15 Ubicación de los acelerómetros en dos de los arreglos utilizados.**



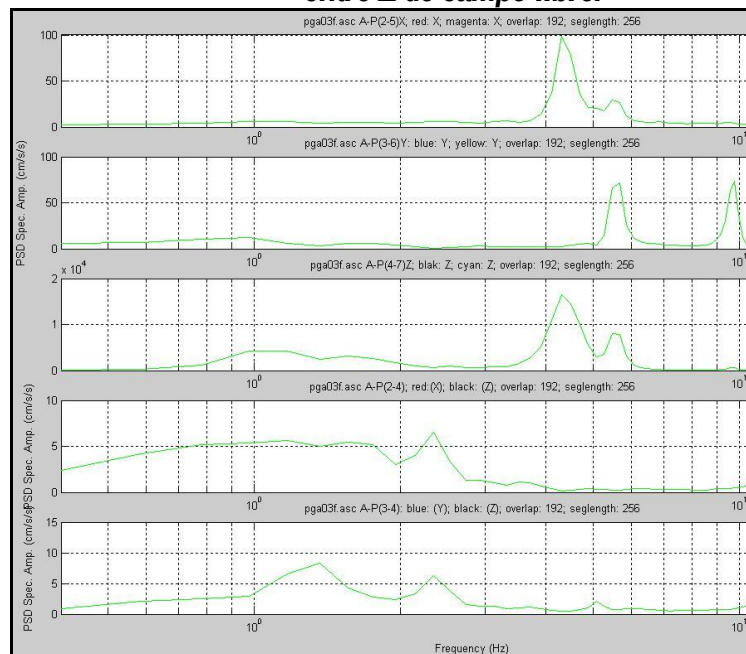
**Figura 16** Aceleraciones medidas en dos sensores de tres canales cada uno y de arriba hacia abajo las direcciones X, Y y Z. Las tres primeras series de tiempo corresponden a campo libre y las últimas al sensor en la cubierta del puente Villabonita.



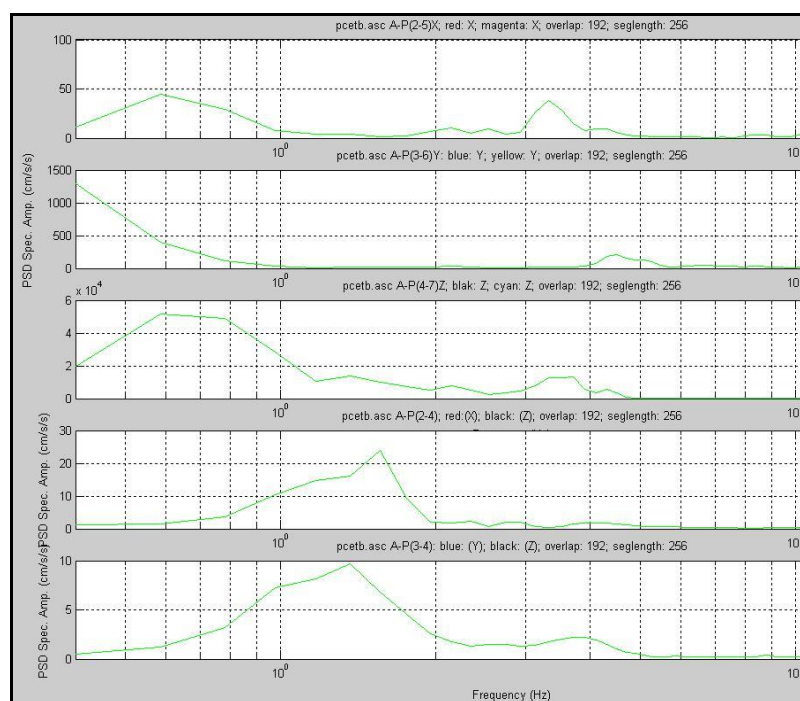
**Figura 17** Las tres primeras gráficas corresponden a los cocientes de las densidades espectrales de potencia (PSD) de las señales medidas en la cubierta del puente de la calle Segunda y en campo libre, en las direcciones X, Y y Z respectivamente y las últimas dos a los cocientes de las componentes horizontales X y Y, cada una entre Z de campo libre.



**Figura 18** Las tres primeras gráficas corresponden a los cocientes de las densidades espectrales de potencia (PSD) de las señales medidas en la cubierta del puente Villabonita y en campo libre, en las direcciones X, Y y Z respectivamente y las últimas dos a los cocientes de las componentes horizontales X y Y, cada una entre Z de campo libre.



**Figura 19** Las tres primeras gráficas corresponden a los cocientes de las densidades espectrales de potencia (PSD) de las señales medidas en la cubierta del puente El Gallo y en campo libre, en las direcciones X, Y y Z respectivamente y las últimas dos a los cocientes de las componentes horizontales X y Y, cada una entre Z de campo libre.



**Figura 20** Las tres primeras gráficas corresponden a los cocientes de las densidades espectrales de potencia (PSD) de las señales medidas en la cubierta del puente de la calle Nueve y en campo libre, en las direcciones X, Y y Z respectivamente y las últimas dos a los cocientes de las componentes horizontales X y Y, cada una entre Z de campo libre.

## RESULTADOS

De las gráficas de las figuras 17, 18, 19 y 20 se identifican las frecuencias y periodos fundamentales que se muestran en la tabla 3. El puente más rígido es El Gallo, 0.2 s de periodo en sus tres componentes y el más flexible el puente de la calle Nueve con periodo de 1.7 s en la dirección longitudinal. Los periodos de los suelos varían de 0.3 a 0.8 s.

**Tabla 3** Frecuencias en Hertz del modo fundamental de vibración de los cuatro puentes. Entre paréntesis se muestran los periodos correspondientes en segundos. El valor asociado a la componente x del suelo en Calle Segunda no fue identificado.

| PUENTE        | X            | Y           | Z         | SUELO     |           |
|---------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|               | longitudinal | transversal | vertical  | X         | Y         |
| Calle Segunda | 1.4 (0.7)    | 6.5 (0.2)   | 8.8 (0.1) | -----     | 1.2 (0.8) |
| Villabonita   | 3.8 (0.3)    | 3.8 (0.3)   | 4.6 (0.2) | 3.2 (0.3) | 3.2 (0.3) |
| El Gallo      | 4.3 (0.2)    | 5.6 (0.2)   | 4.3 (0.2) | 1.2 (0.8) | 1.4 (0.7) |
| Calle Nueve   | 0.6 (1.7)    | 4.4 (0.2)   | 0.7 (1.4) | 1.6 (0.6) | 1.4 (0.7) |

## REFERENCIAS

<http://sismologia.cicese.mx/resnom/catalogo/mes.php>

Espinoza B. F. (1999), “**Determinación de características dinámicas de estructuras**”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Juárez G. J. (2007), “**Estudio sísmico de los puentes urbanos de Ensenada, BC**”, Tesis de Maestría en trámite, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México.

Red Sísmica del Noroeste del CICESE (2000), comunicación personal.

Reynaga M. A., Contreras P. R. S., González O. J. A., Figuera M. M., Ramírez G. E., Baltazar C. Y., Jesús Juárez G. J. R., Salazar R. R., Espinoza B. F., Carlos Isidro Huerta L. C. I. (2007), “**Experiencias de Estudiantes en la Investigación Científica**”, Congreso Internacional de Ingeniería Vértice 2007. Memorias ISBN 978-970-735-089-2, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México.

11.- PONENCIA 3; XVI CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA SÍSMICA

## **SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE PUENTES URBANOS DE ENSENADA, BC**

**Jesús Raymundo Juárez García<sup>1</sup>, Fortunato Espinoza Barreras<sup>1</sup>, Juan Pablo Torres Herrera<sup>1</sup>, Carlos Isidro Huerta López<sup>2</sup>, Esperanza Maldonado Rondón<sup>3</sup>, Luis Ángel Monge De La Cruz<sup>1</sup> y Felipe de Jesús Ricalde y Lugo<sup>1</sup>**

### **RESUMEN**

Los parámetros de los 29 puentes urbanos de Ensenada, BC, México, utilizados para calcular el índice de vulnerabilidad con el Método Maldonado, basado en conjuntos difusos, se incluyen en un Sistema de Información Geográfica basado en el WEB. Se busca que esta base de datos se incremente y sirva para evaluar la funcionalidad de los puentes y preparar planes de contingencia, dentro del ámbito de la protección civil.

### **ABSTRACT**

The parameters of 29 urban bridges of Ensenada, BC, México, used to calculate the index of vulnerability with the Method Maldonado, based on diffuse sets, are included in a System of Geographical Information based on the WEB. There is looked that this database increases and serves to evaluate the functionality of the bridges and to prepare plans of contingency, inside the area of the civil protection.

### **INTRODUCCIÓN**

Este trabajo se realiza en Ensenada, Baja California, ciudad al norte de México y a 300 km al sur de Los Ángeles, California. Esta ciudad se localiza en una zona de sismicidad moderada de acuerdo con el mapa de regionalización sísmica de México y del Reglamento

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, km 107 carretera Tijuana-Ensenada, 22870 Ensenada, BC, teléfono (646) 1317814.  
[jjuares@uabc.mx](mailto:jjuares@uabc.mx), [boommonge@hotmail.com](mailto:boommonge@hotmail.com), [pablotorres@uabc.mx](mailto:pablotorres@uabc.mx),  
[fortunato@uabc.mx](mailto:fortunato@uabc.mx)

<sup>2</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, CP 22870, Ensenada, BC. [chuerta@cicese.mx](mailto:chuerta@cicese.mx)

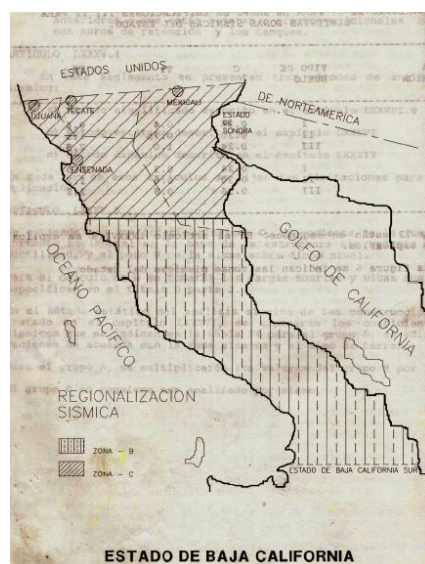
<sup>3</sup> Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Ofic. 119, A.A. 678 Bucaramanga, Colombia. [emaldona@uis.edu.co](mailto:emaldona@uis.edu.co)

de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California promulgado en 1992 (Figura 1) y no existen estudios tendientes a la prevención del desastre que pudiera ocasionar la eventual falla de una o varias de estas estructuras debido a la ocurrencia de algún terremoto.

Objetivos de este estudio son el cálculo del índice de vulnerabilidad de los 29 puentes urbanos de Ensenada con el Método Maldonado y la aportación de una base de datos que se incluye en un Sistema de Información Geográfica que actualmente se encuentra en proceso de elaboración por un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Baja California y que contendrá un mapa de riesgo sísmico para la región. La parte del mapa correspondiente a puentes se forma a partir de los resultados del trabajo que aquí se expone.

### **MÉTODO MALDONADO**

En el cálculo del índice de vulnerabilidad se utilizan 19 parámetros, considerados los más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción sísmica (Tabla 1) y fueron determinados por Maldonado (2000) como parte de su tesis doctoral.



**Figura 1** Mapa de Regionalización Sísmica donde se observa que todas las ciudades de Baja California están en la zona C, de sismicidad moderada (Reglamento de Edificación de Baja California, 1992).

**Tabla 1** Los 19 parámetros utilizados que se determinaron con base en los estudios realizados sobre comportamiento sísmico de puentes, experiencias posterremoto, estudios de modelos existentes y opiniones de expertos (Maldonado, 2000).

| <b>PARÁMETROS DEL MODELO</b> |                                           |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>símbolo</b>               | <b>descripción</b>                        |
| K <sub>1</sub>               | Año de proyecto y construcción del puente |
| K <sub>2</sub>               | Tipo de superestructura                   |
| K <sub>3</sub>               | Forma de la superestructura               |

|                 |                                                    |
|-----------------|----------------------------------------------------|
| K <sub>4</sub>  | Existencia de articulaciones internas              |
| K <sub>5</sub>  | Material de la superestructura                     |
| K <sub>6</sub>  | Tipo de pila                                       |
| K <sub>7</sub>  | Tipo de cimentación                                |
| K <sub>8</sub>  | Material de pila                                   |
| K <sub>9</sub>  | Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez  |
| K <sub>10</sub> | Longitud de apoyos en pilas                        |
| K <sub>11</sub> | Tipos de suelo                                     |
| K <sub>12</sub> | Tipo de estribo                                    |
| K <sub>13</sub> | Longitud de apoyos en estribos                     |
| K <sub>14</sub> | Tipo de aparato de estribo                         |
| K <sub>15</sub> | Estado de conservación del puente                  |
| K <sub>16</sub> | Procedimiento constructivo                         |
| K <sub>17</sub> | Procedimiento constructivo de las pilas (concreto) |
| K <sub>18</sub> | Potencial de licuefacción                          |
| K <sub>19</sub> | Elementos no estructurales                         |

## CÁLCULO DE ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

Dado que el modelo se basa en opiniones de expertos, que en algunos casos son subjetivas e imprecisas, se utilizaron técnicas de conjuntos difusos. Las matemáticas difusas se utilizan para cuantificar lo cualitativo y en este trabajo se emplean para relacionar las calificaciones de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia. El método tradicional de combinación de varias piezas de información, con desigual importancia o pesos, es el llamado “peso promedio” y es utilizado como se expresa en la ecuación 1, donde  $IV$  es el índice de vulnerabilidad sísmica del puente,  $K_i$  es una medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro  $i$ . Los valores  $W_i$  (pesos) son la medida de la opinión de la importancia asociada al parámetro  $i$  respecto a los demás parámetros. Los valores  $K_i$  y  $W_i$  son números difusos (Maldonado et al., 1998).

$$IV = \frac{\sum_{i=1}^{19} w_i K_i}{\sum_{i=1}^{19} w_i} \quad (1)$$

## CONJUNTOS DIFUSOS

El concepto de conjuntos difusos lo introduce Zadeh en 1965, como un intento de vencer la severidad de la teoría clásica de conjuntos y poder reunir proposiciones que, por la naturaleza de lo que representan, contienen incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, generalidad, errores, aproximaciones, borrosidad. Visto desde otra perspectiva, los

conjuntos difusos son una generalización de la teoría convencional de conjuntos, los cuales Zadeh incorporó para representar la vaguedad de la vida diaria y para poder, a través de ellos realizar cálculos con palabras (Sinha et al., 2000).

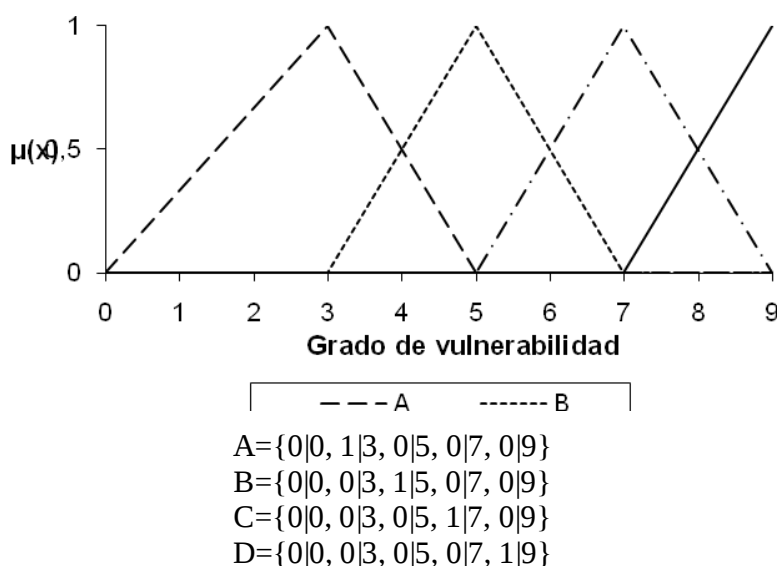
Un aspecto fundamental de los conjuntos difusos es que, a diferencia de los conjuntos clásicos, tienen la capacidad de modelar formas de razonamiento no preciso, los cuales juegan un papel importante en la notable habilidad humana para tomar decisiones correctas en entornos de incertidumbre e imprecisión. Tal capacidad depende, a su vez, de la habilidad humana para inferir respuestas aproximadas a preguntas inexactas (Konar, 2000).

## FUNCIONES DE PERTENENCIA

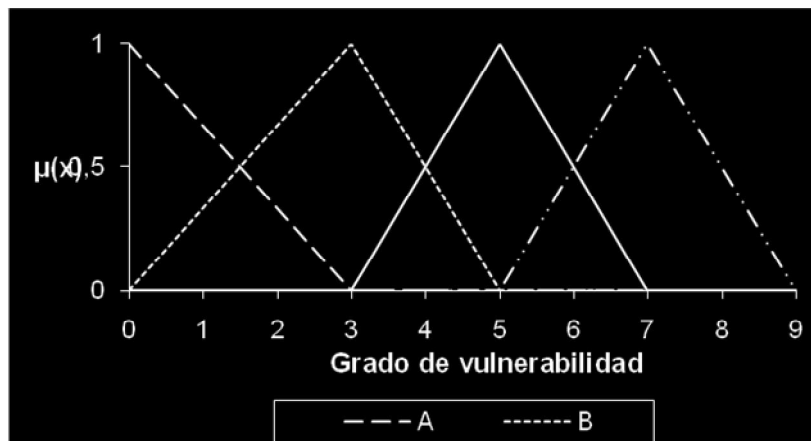
La teoría de los conjuntos difusos define el grado en el cual el elemento  $x$  del conjunto  $X$  está incluido en el subconjunto  $A$  mediante la llamada *función de pertenencia* (*membership function*),  $\mu_A(x)$ . Dicha función es un conjunto de números ordenados si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de  $\mu_A(x)$  indica el grado en que el valor  $x$  de la variable  $X$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$ .

Para la construcción de las funciones de pertenencia se aprovechó la información de las respuestas de las encuestas obtenidas de expertos de cinco países: España, Colombia, Ecuador, Venezuela y México. Los valores de pertenencia se calcularon en base al número de respuestas favorables de cada clasificación.

Como un ejemplo, las funciones de pertenencia definidas para los parámetros  $K_1$  (año de proyecto y construcción del puente) y  $K_2$  (tipo de superestructura) se muestran en las figuras 2 y 3, mientras que las funciones de peso correspondientes se presentan en las figuras 4 y 5 (Espinoza, 2003, Espinoza et al., 2004 y Cervantes, 2007).



**Figura 2 Año de proyecto y construcción del puente ( $K_1$ ).**



$$A = \{1|0, 0|3, 0|5, 0|7, 0|9\}$$

$$B = \{0|0, 1|3, 0|5, 0|7, 0|9\}$$

$$C = \{0|0, 0|3, 1|5, 0|7, 0|9\}$$

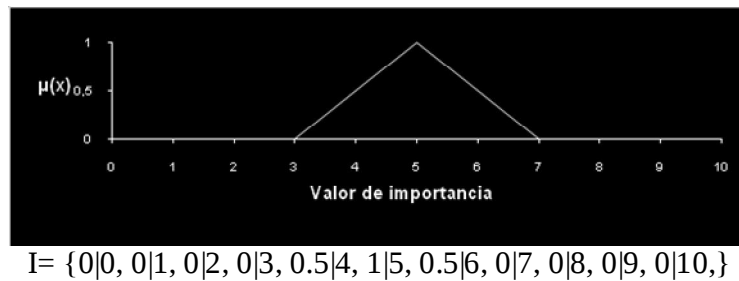
$$D = \{0|0, 0|3, 0|5, 1|7, 0|9\}$$

**Figura 3 Tipo de superestructura ( $K_2$ ).**



$$I = \{0|0, 0|1, 0|2, 0|3, 0|4, 0|5, 0|6, 0|7, 0|8, 0|9, 0|10, \}$$

**Figura 4 Función de peso del parámetro  $K_1$  (año de proyecto y construcción del puente).**



**Figura 5 Función de peso del parámetro  $K_2$  (tipo de superestructura).**

## PUENTES DE ENSENADA

Se realiza un levantamiento de datos en campo y se determinan las coordenadas geográficas de los puentes utilizando un aparato GPS 76 Garmin (Figura 6). Ya que este trabajo amplía la información de la WEB y se quiere mostrar su confiabilidad, los autores recurrimos a la utilización del software conocido como *Google Earth*, encontrando una diferencia máxima de ocho minutos (aproximadamente 2 m) entre la información proporcionada por el aparato y la determinada utilizando *Google* lo cual no es relevante para esta investigación. Esta información y otros datos se muestran en la Figura 7 donde se resalta con color rojo las coordenadas geográficas más diferentes.



**Figura 6 Aparato GPS 76 GARMIN utilizado para la determinación de las coordenadas geográficas de los puentes.**

|    |                                            |               |                |               |                |                               |       |                         |   |     |                         |
|----|--------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------------|-------|-------------------------|---|-----|-------------------------|
| 1  | BLVD. ORAL. LÁZARO CÁRDENAS                | 31°51'31.44"  | 116°37'14.86"W | 31°51'33.5"   | 116°37'11.7"W  | ARROYO ENSENADA               | 61.50 | 2 tramos de 15.50 m c/u | 4 | 2.3 | POCO VULNERABLE         |
| 2  | CALLE SEGUNDA                              | 31°51'40.27"N | 116°37'6.65"W  | 31°51'40.6"N  | 116°37'4.3"W   | ARROYO ENSENADA               | 54.7  | 15.5                    | 3 | 3.4 | POCO VULNERABLE         |
| 3  | AV. JUÁREZ                                 | 31°51'51.48"N | 116°37'1.67"W  | 31°51'51.7"N  | 116°36'58.9"W  | ARROYO ENSENADA               | 61.7  | 16.7                    | 8 | 3.2 | POCO VULNERABLE         |
| 4  | CALLE NOVENA (IMPULSORA)                   | 31°52'7.50"N  | 116°36'57.24"W | 31°52'7.30"N  | 116°36'54.3"W  | ARROYO ENSENADA               | 43.3  | 17.6                    | 3 | 4.5 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 5  | CALLE ONCE (PUENTE JOROBADO)               | 31°52'15.88"N | 116°36'55.97"W | 31°56'16.6"N  | 116°36'52.9"W  | ARROYO ENSENADA               | 50    | 20                      | 2 | 4.1 | POCO VULNERABLE         |
| 6  | ALISOS                                     | 31°52'40.62"N | 116°36'47.22"W | 31°52'40.9"N  | 116°36'44.4"W  | ARROYO ENSENADA               | 43.00 | 9.5                     | 3 | 2.8 | POCO VULNERABLE         |
| 7  | AV. AMBAR                                  | 31°52'58.12"N | 116°36'41.69"W | 31°52'57.7"N  | 116°36'38"W    | ARROYO ENSENADA               | 18.00 | 21                      | 1 | 3.1 | POCO VULNERABLE         |
| 8  | AV. REFORMA (PUENTE BONITO)                | 31°53'0.08"N  | 116°36'40.29"W | 31°53'0.3"N   | 116°36'37.8"W  | ARROYO ENSENADA               | 24.50 | 10                      | 5 | 4.7 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 9  | AV. ESPINOZA                               | 31°52'8.63"N  | 116°36'48.87"W | 31°52'9.3"N   | 116°36'47.2"W  | ARROYO EL AGUAJITO            | 20.60 | 10                      | 1 | 3.5 | POCO VULNERABLE         |
| 10 | CALLE ONCE (XOCHICALCO)                    | 31°52'9.41"N  | 116°36'38.41"W | 31°52'8.1"N   | 116°36'36.1"W  | AFLUENTE DEL ARROYO ENSENADA  | 18.10 | 16.8                    | 1 | 3.6 | POCO VULNERABLE         |
| 11 | AV. REFORMA (MISIÓN)                       | 31°52'19.20"N | 116°36'32.38"W | 31°52'19.30"N | 116°36'29.4"W  | AFLUENTE DEL ARROYO ENSENADA  | 28.10 | 19.8                    | 1 | 3.3 | POCO VULNERABLE         |
| 12 | PRÓL... I. ALLENDE (LUZ DEL MUNDO)         | 31°52'30.54"N | 116°35'50.84"W | 31°52'30.5"N  | 116°35'48.2"W  | AFLUENTE DEL ARROYO ENSENADA  | 14.00 | 8.4                     | 3 | 3.8 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 13 | CALLE BRONCE                               | 31°52'33.58"N | 116°35'36.44"W | 31°52'33.8"N  | 116°35'35.2"W  | AFLUENTE DEL ARROYO ENSENADA  | 15.00 | 10.7                    | 1 | 4.1 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 14 | AV. RIVEROLL                               | 31°52'50.25"N | 116°36'53.73"W | 31°52'49.9"N  | 116°36'50.7"W  | ARROYO DONA PETRA             | 21.60 | 14.5                    | 1 | 3.3 | POCO VULNERABLE         |
| 15 | CALLE AGAVES                               | 31°53'12.39"N | 116°37'2.20"W  | 31°53'8.3"N   | 116°36'57.8"W  | ARROYO DONA PETRA             | 8.30  | 8.7                     | 1 | 3.3 | POCO VULNERABLE         |
| 16 | CALLE PUEBLA                               | 31°53'9.06"N  | 116°37'0.82"W  | 31°53'16.9"N  | 116°37'1.1"W   | ARROYO DONA PETRA             | 11.70 | 14.6                    | 1 | 3.8 | POCO VULNERABLE         |
| 17 | PUENTE NUEVO                               | 31°50'44.01"N | 116°36'45.84"W | 31°50'49.7"N  | 116°34'21.5"W  | ARROYO EL GALLO               | 21.80 | 2 tramos de 12.30 m c/u | 1 | 2.8 | POCO VULNERABLE         |
| 18 | AV. PEDRO LOYOLA                           | 31°50'45.88"N | 116°36'30.43"W | 31°50'46.00"N | 116°36'28.2"W  | ARROYO EL GALLO               | 19.25 | 23.5                    | 1 | 3.1 | POCO VULNERABLE         |
| 19 | Av. REFORMA                                | 31°50'46.48"N | 116°36'14.13"W | 31°50'45.8"N  | 116°36'10.8"W  | ARROYO EL GALLO Y LIBRAMIENTO | 62.65 | 26.00                   | 5 | 3.7 | POCO VULNERABLE         |
| 20 | AV. MÉXICO                                 | 31°50'44.50"N | 116°35'26.47"W | 31°50'43.20"N | 116°35'24.3"W  | ARROYO EL GALLO               | 18.00 | 18.5                    | 1 | 3.3 | POCO VULNERABLE         |
| 21 | ACCESO A VILLA BONITA                      | 31°50'49.42"N | 116°34'24.52"W | 31°50'49.2"N  | 116°34'21.8"W  | ARROYO EL GALLO               | 32.00 | 10.6                    | 1 | 2.7 | POCO VULNERABLE         |
| 22 | ACCESO A ENSENADA POR EL RECINTO PORTUARIO | 31°51'29.00"N | 116°38'11.12"W | 31°59'29.10"N | 116°38'7.4"W   | CARRETERA TIJUANA-ENSENADA    | 30.50 | 36.00                   | 1 | 3.8 | POCO VULNERABLE         |
| 23 | MARINA CORAL                               | 31°52'0.38"N  | 116°39'43.32"W | 31°52'0.2"N   | 116°39'40.4"W  | CARR. TIJUANA-ENS             | 30.00 | 14                      | 1 | 3.8 | POCO VULNERABLE         |
| 24 | ACCESO A LA UABC                           | 31°51'59.48"N | 116°40'4.49"W  | 31°51'59.9"N  | 116°40'1.7"W   | CARR. TIJUANA-ENS             | 32.00 | 13                      | 2 | 3.7 | POCO VULNERABLE         |
| 25 | ACCESO A ENSENADA DESDE TECATE (FONDEPORT) | 31°53'57.13"N | 116°42'20.82"W | 31°53'55.00"N | 116°42'17.7"W  | CARRETERA TIJUANA-ENSENADA    | 28.15 | 9                       | 2 | 4.0 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 26 | ACCESO A CIBOLAS DEL MAR DESDE TIJUANA.    | 31°54'13.41"N | 116°43'24.13"W | 31°54'13.13"N | 116°43'21.00"W | CARRETERA TIJUANA-ENSENADA    | 25.70 | 22.6                    | 3 | 2.8 | POCO VULNERABLE         |
| 27 | ACCESO A CARR. LIBRE A TIJUANA             | 31°54'13.35"N | 116°43'42.67"W | 31°54'13.00"N | 116°43'39.8"W  | CARRETERA TIJUANA-ENSENADA    | 25.80 | 9                       | 2 | 3.0 | POCO VULNERABLE         |
| 28 | SAN MIGUEL                                 | 31°54'11.83"N | 116°43'53.51"W |               |                | CAUCE (NO IDENTIFICADO)       | 82.00 | 10                      | 4 | 3.9 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |
| 29 | CARR. TRANSPENINSULAR (SAN CARLOS)         | 31°46'16.62"N | 116°35'20.62"W | 31°46'16.5"N  | 116°35'17.00"W | CAUCE (NO IDENTIFICADO)       | 38.00 | 17.5                    | 3 | 3.8 | MEDIANAMENTE VULNERABLE |

**Figura 7** Datos de los 29 puentes urbanos de Ensenada. La primer columna contiene un número de identificación, la segunda el nombre de la vialidad a lo largo de la cual se encuentra, de la tercera a la sexta, se presentan las coordenadas geográficas obtenidas de google earth y medidas con un GPS, respectivamente. La séptima columna muestra el obstáculo que salva el puente y de la octava a la décima, la longitud, anchura y número de vanos. En las dos últimas columnas se observa el valor calculado del índice de vulnerabilidad y su interpretación.

Se construye un catálogo con fotografías y en este trabajo se presenta parte de él con información de uno de los puentes, el 2, de la calle Segunda (Figuras 6, 7, y 8).



**Figura 6 Fotografía y parte del mapa con la localización del puente 2, calle Segunda. En la parte inferior se observa el puente 1, Boulevard General Lázaro Cárdenas.**



**Figura 7 Fotografías de ambos estribos del puente 2, calle Segunda.**

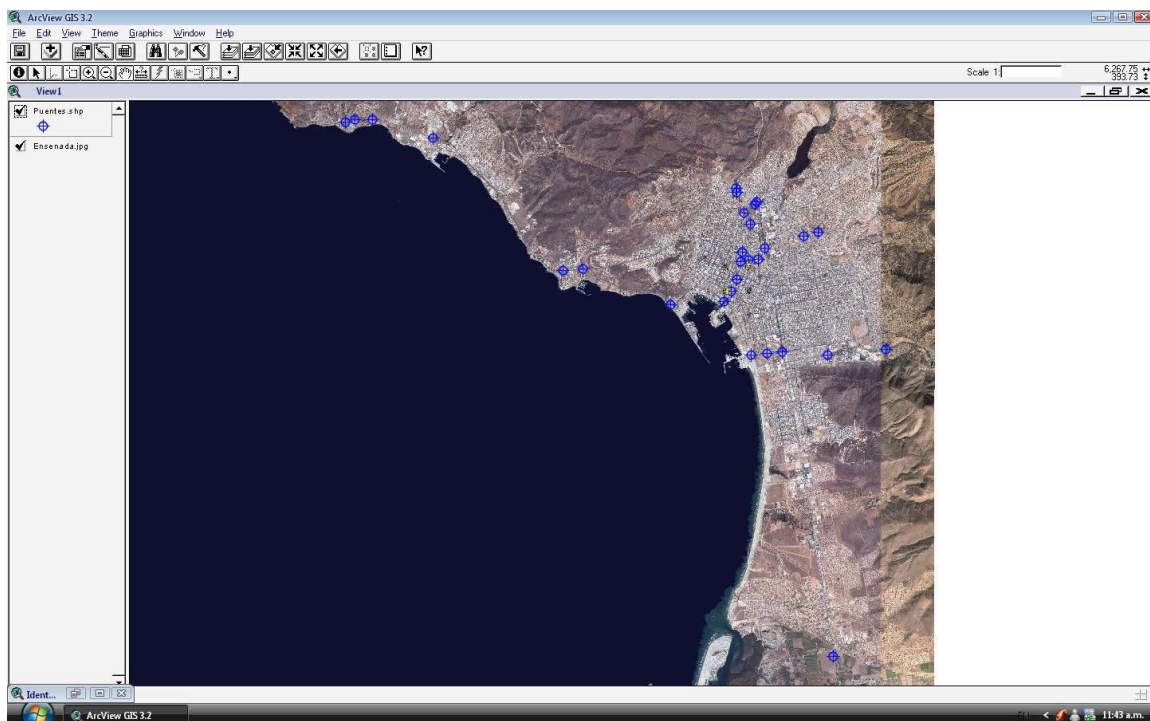


**Figura 8 Fotografía del puente 2, calle Segunda, desde aguas abajo (vista desde el mar).**

## SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Una herramienta relativamente reciente en estudios de riesgo sísmico son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) los cuales facilitan la implementación de los métodos de análisis, el manejo de la información y, sobre todo, la visualización de los resultados, gracias a su capacidad georeferencial, lo que permite modelar elementos geográficos de la zona de estudio de una forma más real, ya que puede mostrar un panorama aéreo a escala. Además, el soporte de base de datos en la que están contruidos los SIG facilita el manejo de los datos de una manera sencilla y rápida lo que apunta directamente en la reducción del riesgo (Mena, 2002).

En aspectos técnicos, el SIG esta construido con la herramienta ArcView (Figuras 9 y 10), y su ejecución sobre ArcExplorer (Figura 11). La primera permite visualizar y editar el mapa en modo de escritorio y la segunda visualizar el mapa sobre el WEB. El formato empleado para el manejo de los datos vectoriales es Shapefile (SHP), y para la imagen *raster* es JPG.



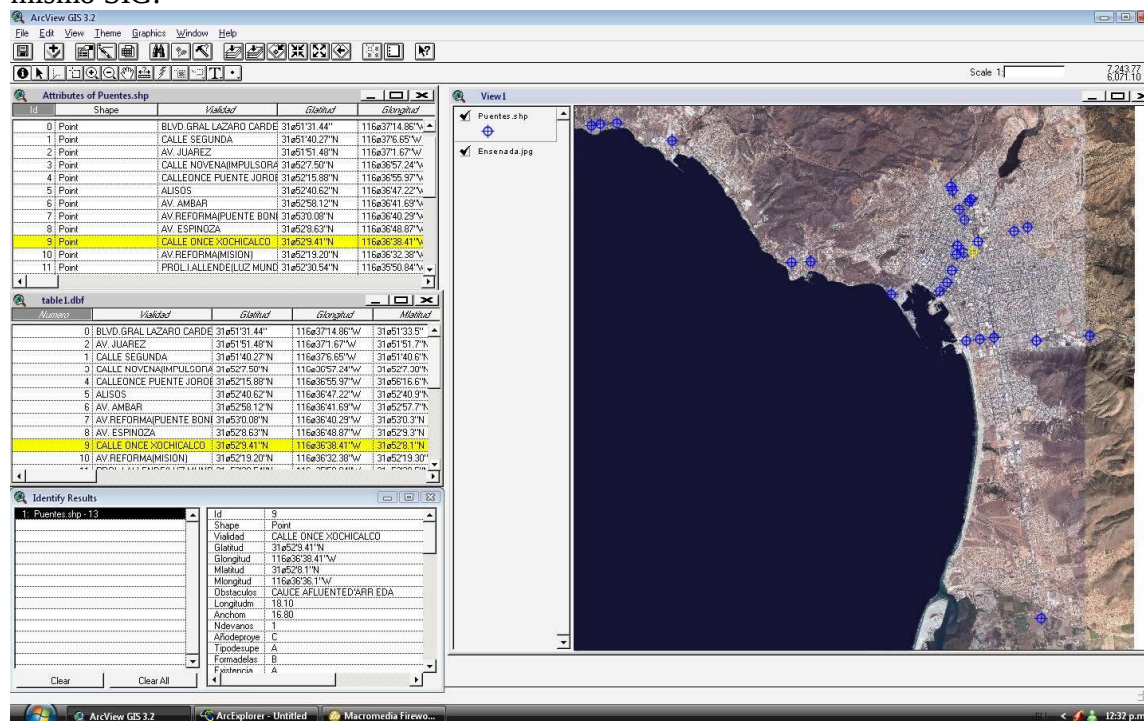
**Figura 9 Visualización del mapa en modo escritorio mediante ArcView, mostrando todos los puentes de la zona urbana de Ensenada, BC, México.**

## RESULTADOS

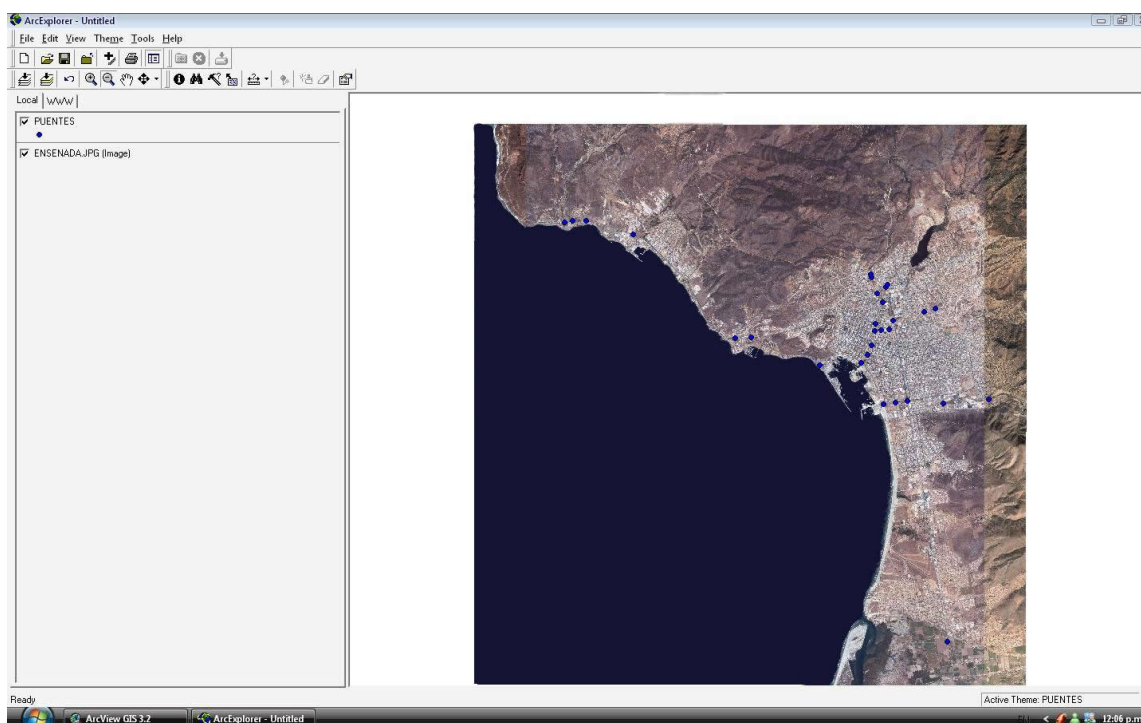
Como resultado de esta investigación actualmente se tiene implementado, en una base de datos incorporada a un SIG, el índice de vulnerabilidad de todos los puentes de la

zona urbana de la ciudad y puerto de Ensenada Baja California, calculados utilizando el método Maldonado.

El SIG maneja dos modos de visualización: escritorio y WEB; para la edición de los datos solo contempla el modo escritorio, dejando para trabajo a futuro la modalidad WEB. La visualización incluye aspectos de interacción con la base de datos, tanto en aspectos de geolocalización de los puentes como en los propios resultados del procesamiento de los parámetros. Como trabajo futuro se busca que los datos de campo se procesen dentro del mismo SIG.



**Figura 10 Visualización del mapa en modo escritorio mediante Arcview, mostrando las características de uno de los puentes de la zona urbana de Ensenada, BC, México.**



**Figura 11 Visualización del mapa en modo WEB usando ArcExplorer. Se muestran todos los puentes de la zona urbana de Ensenada, BC, México.**

## CONCLUSIONES

Se genera un Sistema de Información Geográfica basado en el WEB con información de los 29 puentes urbanos, disponiéndose así, de una herramienta que da soporte en la generación y disposición de mapas de riesgo sísmico y en la determinación de planes de contingencia en casos de desastre.

## REFERENCIAS

Cervantes Gutiérrez Augusto Rodrigo (2007), **“Cálculo del Índice de Vulnerabilidad de un Puente Urbano en Ensenada, BC, Utilizando Conjuntos Difusos”**, Tesis de licenciatura en trámite, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México, 120 pp.

Espinoza Barreras Fortunato, Cervantes Gutiérrez Augusto Rodrigo, Maldonado Rondón Esperanza, Chio Cho Gustavo (2003), **“Cálculo del Índice de Vulnerabilidad de un Puente Urbano en Ensenada, BC, Utilizando Conjuntos Difusos”**, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato, México, Artículo X-07.

Fortunato Espinoza, Ulises Mena, Esperanza Maldonado, Carlos I. Huerta, Gustavo Chio, Augusto R. Cervantes y Donobhan Presichi (2004), **“Urban Bridge Stability Study in**

**Ensenada, Baja California, México**”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 2725.

Konar Amit (2000), “**Artificial Intelligence and soft computing**”, Department of Electronics and Telecommunication Engineering, University Jadavpur, Calcuta, India.

Maldonado E., Casas y Canas J. A. (1998). **Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes**. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS -28 1998, Centro internacional de métodos numéricos en Ingeniería, Edificio C1, Campus Norte Universidad Politécnica de Cataluña, España, 284 pp.

Maldonado Rondón Esperanza (2000). “**Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes**”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Mena Ulises (2002), “**Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas**”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 240 pp.

(1992), “**Reglamento de Edificación de Baja California**”, Periódico Oficial del Estado de Baja California, Tomo XCIX, No. 21, 30 de junio de 1992, Mexicali, BC, México, 342 pp.

Sínha S. Narres y Gupta Madan M. (2000), “**Soft computing & intelligent systems**”, Department of Electronics, United States of America.

Estos dos trabajos se integraron en uno solo (Espinoza et al., 2008) que se presentó en el 14 World Conference of Earthquake Engineering celebrado en Beijing, China en octubre de 2008. El trabajo completo se presenta en el Anexo 3.

## 12.- CONCLUSIONES

Se obtuvieron los índices de vulnerabilidad de 29 puentes urbanos, los periodos fundamentales de 4 de esos puentes y un Sistema de Información Geográfica disponible en web.

Además se cuenta con una guía para medición de vibración en puentes, una gran cantidad de datos para obtener otra información como periodo predominante de suelo en el sitio del puente, amortiguamientos y formas modales.

Esta tesis puede ser continuada completando la obtención de lo antes mencionado en los 29 puentes de los que ya se conoce el índice de vulnerabilidad y de los que están actualmente en construcción.

También es posible (a) obtener el periodo predominante del suelo en los sitios de los puentes, amortiguamientos y formas modales utilizando los datos de vibración, (b) complementar midiendo la vibración del resto de los 29 puentes, (c) modelar utilizando elementos finitos cuando se disponga de los planos estructurales como es el caso de los puentes que actualmente se construyen, (d) analizar utilizando nuevas técnicas como wavelets y redes neuronales.

## Anexo 1

### CONJUNTOS DIFUSOS

## CONJUNTOS DIFUSOS

### 3.1 Introducción

El concepto de conjuntos difusos lo introduce Zadeh, en 1965, como un intento de vencer la severidad de la teoría clásica de conjuntos, y poder reunir proposiciones que por la naturaleza de lo que representan, contienen incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, generalidad, errores, aproximaciones, borrosidad. Visto desde otra perspectiva, los conjuntos difusos son una generalización de la teoría convencional de conjuntos, los cuales Zadeh, incorporó para representar la vaguedad de la vida diaria y para poder a través de ellos, realizar cálculos con palabras (Sinha y otros, 2000).

Muchos de los razonamientos en ingeniería se realizan básicamente sobre predicados. Es en base a razonamientos, como se clasifican los niveles de daño sufridos por las estructuras después de ocurrido un sismo, como se controla la carga que debe soportar una viga en laboratorio, como se decide que estructuras deben ser rehabilitadas o reemplazadas, como se clasifican a las estructuras en bien o mal construidas, como se determina la seguridad estructural, como se efectúan los diagnósticos estructurales; como se avanza en la investigación, y con todo ello se suele condicionar el futuro a partir de decisiones que se suponen en el presente y que se toman a partir de conclusiones obtenidas con premisas que reflejan un conocimiento que es inexacto, incompleto y no totalmente fiable (Maldonado, 2000).

Un aspecto fundamental de los conjuntos difusos es que, a diferencia de los conjuntos clásicos, tienen la capacidad de modelar formas de razonamiento no preciso, los cuales juegan un papel importante en la notable habilidad humana para tomar decisiones correctas en entornos de incertidumbre e imprecisión. Tal capacidad depende, a su vez, de la habilidad humana para inferir respuestas aproximadas a preguntas inexactas (Konar, 2000).

| Edad | Grado $\mu$ |
|------|-------------|
| 20   | 0           |
| 30   | 0.05        |
| 40   | 0.15        |
| 50   | 0.4         |
| 60   | 0.8         |
| 65   | 0.94        |
| 70   | 0.98        |
| 80   | 1           |

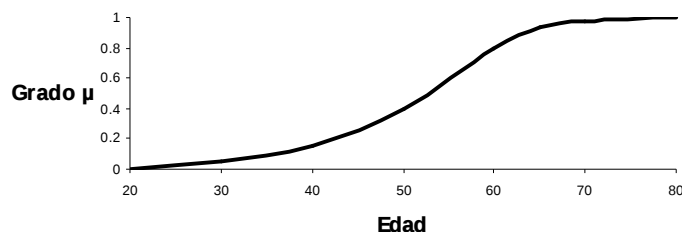


Figura 3.1 Grado de viejo.

Tomando un ejemplo expuesto por Terano y otros en 1992, en el que se estudia la ambigüedad del significado de “*viejo*”, en términos de la expresión de cantidad, con un rango de edad variando entre 20 y 80 años el grado en el cual la edad  $x$  (años) pueden ser llamada “*vieja*” es  $\mu$ ; esto es a la edad  $x$  le corresponde el grado  $\mu$  el cual está entre 0 y 1

( $0 \leq \mu \leq 1$ ). Sin el eje horizontal es  $x$  y el eje vertical es  $\mu$ , la gráfica se dibuja como en la Figura 3.1 y, en ella, se expresa la ambigüedad de “*viejo*” en términos de cantidad.

En otras palabras, es la cuantificación del grado de ambigüedad la edad transcurrida en años, la cuantificación de la palabra y, el eje vertical, muestra el grado en el que una persona puede ser etiquetada como “*vieja*”.

### 3.2 Representación

Hablando en términos más simples, la teoría de conjuntos difusos parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto,  $\mu$ , generalmente definida como un número natural entre el  $[0,1]$  (Sinha y otros, 2000). Así, se introduce el concepto de conjunto difuso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística  $A$ . Para cada conjunto difuso se define una función de pertenencia o inclusión  $\mu_A(x)$ , que representa el grado en que la variable  $x$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$  (Maldonado, 2000).

Estos conjuntos surgen al clasificar objetos de un universo conocido “ $U$ ” que corresponden a una determinada propiedad, que se le da a los objetos en cuestión en cierto grado (Konar, 2000).

$$A = \{ \mu_A(x) \mid x, x \in X \}$$

Donde  $\mu_A(x)$  es llamada la función de pertenencia o grado de pertenencia (también grado de compatibilidad o grado de verdad) de  $x$  en  $A$ , es decir  $\mu_A(x)$  define el grado en el cual el elemento  $x$  del conjunto  $X$  está incluido en el subconjunto  $A$ . Es así como la función de pertenencia es la que define el conjunto difuso (Maldonado, 2000).

El intervalo de la función de pertenencia puede ser un subconjunto de números reales no negativos, aunque sea de práctica general que la función de pertenencia esté definida entre 0 y 1 como  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ . Según los estudios de Zimmermann que desarrolló en 1996, los elementos que cuentan con cero como valor de pertenencia, normalmente, no son listados. No siendo esto una regla general a aplicar (Maldonado, 2000).

### 3.3 Ejemplo de conjunto difuso

Para ilustrar mejor la definición de conjunto difuso en un contexto de ingeniería, se presenta el caso de la evaluación de la probabilidad de falla de una viga de concreto armado. Se planteó asociar un adjetivo para grietas observadas, “*menor*” para grietas cortas y pequeñas, “*significante*” para grietas que podrían afectar la capacidad de la viga y “*mayor*” para grietas que eran grandes y que, probablemente, reducirían la capacidad de la viga. Se supone que se califique como grieta menor a aquella que tenía un ancho entre 0 y 7

micrómetros, “*significante*” alrededor de 11 micrómetros y “*mayor*” cuando el ancho excediera los 12 micrómetros (Maldonado, 2000).

Así pues las funciones de pertenencia, utilizadas en estos tres tipos de ancho de grietas se definieron como:

$$\begin{array}{lll} \mu_A(x) = 1 - x/7 & 0 \leq x \leq 7 & \text{micrómetros} \\ \mu_A(x) = 1/6 (x-5) & 5 \leq x \leq 11 & \text{micrómetros} \\ \mu_A(x) = 1 - (x-11)/6 & 11 \leq x \leq 17 & \text{micrómetros} \\ \mu_A(x) = 1/8(x-12) & 12 \leq x \leq 20 & \text{micrómetros} \end{array}$$

Y fueron presentadas como se muestra en la Figura 3.2:

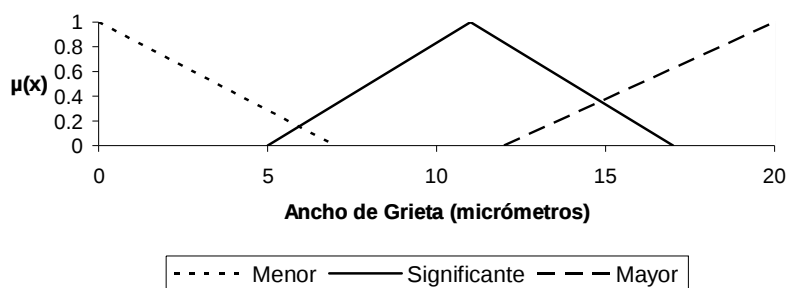


Figura 3.2 Representación de los conjuntos difusos ancho de grieta menor, significativo y mayor.

Estas funciones de pertenencia se utilizaron, posteriormente, para determinar la probabilidad de falla por cortante y por flexión en la viga (Maldonado, 2000).

### 3.4 Ejemplo de función de pertenencia

Tomando un ejemplo propuesto por Kecman, (2001) para explicar el concepto de conjunto difuso, se tiene una función de pertenencia para el conjunto de números reales cercanos a 0, expresada como

$$\mu_A(x) = 1 / (1 + 10x^2)$$

con su representación gráfica en la Figura 3.3.

Usando esta función, se puede determinar el grado de pertenencia de cada número real al conjunto difuso, lo que significa el grado en el cual esos números están cerca de cero. Por ejemplo, el número 3 tiene asignado un grado de 0.01, el número 1 tiene un grado de 0.09, el número 0.25 un grado de 0.62 y el número 0 un grado de 1.

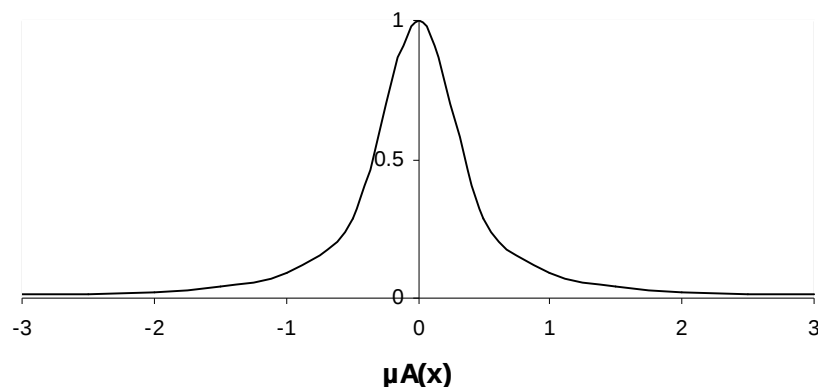


Figura 3.3 Función de pertenencia del conjunto difuso de números reales a 0.

Se puede intuitivamente, esperar que mediante la realización de alguna operación sobre la función correspondiente al conjunto de números cercanos a 0, se siga obteniendo una función igualmente representativa del mismo conjunto; un ejemplo es elevar la expresión anterior al cuadrado

$$\mu_A(x) = [1 / (1 + 10x^2)]^2$$

### 3.5 Construcción de las funciones de pertenencia

La teoría de los conjuntos difusos define el grado en el cual el elemento  $x$  del conjunto  $X$  está incluido en el subconjunto  $A$  mediante la llamada *función de pertenencia* (*membership function*),  $\mu_A(x)$ . Dicha función es un conjunto de números ordenados si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de  $\mu_A(x)$  indica el grado en que el valor  $x$  de la variable  $X$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$ .

Maldonado (Maldonado, 2000; Maldonado et al., 2000) construyó las funciones de pertenencia utilizando las respuestas de encuestas obtenidas de los expertos de cinco países: España, Colombia, Ecuador, Venezuela y México. Los valores de pertenencia los calculó en base al número de respuestas favorables de cada clasificación.

### 3.6 Grados de vulnerabilidad de las categorías de los parámetros

La escala comprendida en la variación del grado de vulnerabilidad se presenta entre 0 y 9, indicando 0 “*nada vulnerable*” y 9 “*absolutamente vulnerable*”. Las funciones de pertenencia y los valores de importancia de los 19 parámetros se muestran en el Anexo C.

### 3.7 Operaciones aritméticas con números e intervalos difusos

#### 3.7.1 Definición

Para calcular con números e intervalos difusos, primero se necesita la definición de las operaciones aritméticas básicas como la suma, multiplicación y la división:

A partir de la definición de los conjuntos A y B como:

$$\begin{aligned}A &= \{\mu(i) | i\} \\ B &= \{\mu(j) | j\}\end{aligned}$$

Donde  $\mu(i)$  y  $\mu(j)$  son los grados de pertenencia de los elementos  $i$  y  $j$ , respectivamente.

Las operaciones citadas se expresan como:

- a) Adición  $A+B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) | [i+j]\}$
- b) Producto  $A*B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) | [i*j]\}$
- c) División  $A \oslash B = \max\{\min(\mu_A(i), \mu_B(j)) | [i \oslash j]\}$

Estas operaciones aritméticas para números e intervalos difusos, generalizan las operaciones aritméticas usuales para los números reales y también las operaciones de los intervalos aritméticos. Muchas de las leyes que se cumplen para la aritmética de los números reales, se generalizan a estas operaciones para intervalos difusos, aunque no todas ellas. Para la adición y la multiplicación de intervalos difusos, se aplica la ley conmutativa y la asociativa. Cuando se realizan los productos y divisiones, los resultados constituyen una aproximación triangular, dado que el número difuso resultante queda deformado. A medida que se va realizando operaciones con números difusos, tales como las sumas, restas, etcétera, los números difusos se van ensanchando en términos absolutos, aunque no se produce un aumento de la desviación relativa.

#### 3.7.2 Ejemplos

Para ilustrar mejor las operaciones aritméticas difusas, se presenta un ejemplo con los conjuntos difusos A y B de la Figura 3.4:

$$\begin{aligned}A &= \{0|1, 0|2, 0.5|3, 1|4\} \\ B &= \{0|1, 1|2, 0.5|3, 0|4\}\end{aligned}$$

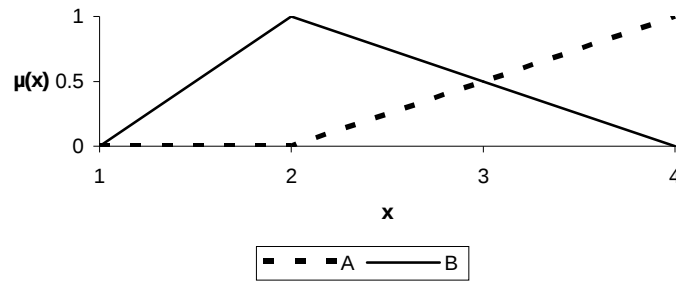


Figura 3.4 Representación de los conjuntos difusos A y B.

a) Adición (Figura 3.5)

$$\begin{aligned}
 (A+B) = & \max\{\min(0,0) \mid [1+1]\} \\
 & \max\{\min(0,1) \mid [1+2], \min(0,0) \mid [2+1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5) \mid [1+3], \min(0,1) \mid [2+2], \min(0.5,0) \mid [3+1]\} \\
 & \max\{\min(0,0) \mid [1+4], \min(0,0.5) \mid [2+3], \min(1,0) \mid [4+1], \min(0.5,1) \mid [3+2]\} \\
 & \max\{\min(0,0) \mid [2+4], \min(1,1) \mid [4+2], \min(0.5,0.5) \mid [3+3]\} \\
 & \max\{\min(0.5,0) \mid [3+4], \min(1,0.5) \mid [4+3]\} \\
 & \max\{\min(1,0) \mid [4+4]\}
 \end{aligned}$$

$$(A+B) = \{0 \mid 2, 0 \mid 3, 0 \mid 4, 0.5 \mid 5, 1 \mid 6, 0.5 \mid 7, 0 \mid 8\}$$

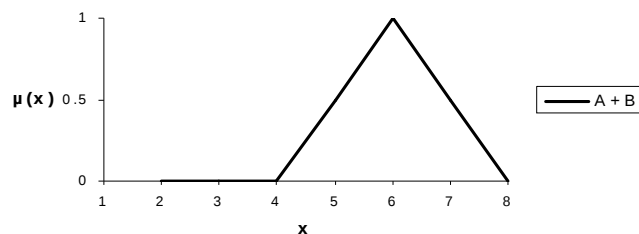


Figura 3.5 Representación de los conjuntos difusos A + B.

Multiplicación (Figura 3.6)

$$\begin{aligned}
 A*B = & \max\{\min(0,0) \mid [1*1]\} \\
 & \max\{\min(0,1) \mid [1*2], \min(0,0) \mid [2*1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5) \mid [1*3], \min(0.5,0) \mid [3*1]\} \\
 & \max\{\min(0,0) \mid [1*4], \min(0,1) \mid [2*2], \min(1,0) \mid [4*1]\} \\
 & \max\{\min(0,0.5) \mid [2*3], \min(0.5,1) \mid [3*2]\} \\
 & \max\{\min(0,0) \mid [2*4], \min(1,1) \mid [4*2]\} \\
 & \max\{\min(0.5,0.5) \mid [3*3]\}
 \end{aligned}$$

$$\max\{\min(0.5,0) \mid [3*4], \min(1,0.5) \mid [4*3]\}$$

$$\max\{\min(1,0) \mid [4*4]\}$$

$$A*B = \{0 \mid 1, 0 \mid 2, 0 \mid 3, 0.5 \mid 4, 0.5 \mid 6, 1 \mid 8, 0.5 \mid 9, 0.5 \mid 12, 0 \mid 16\}$$

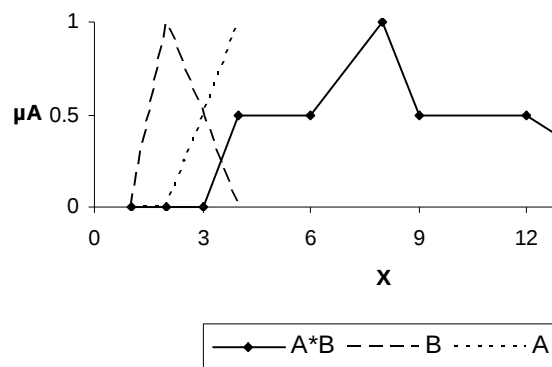


Figura 3.6 Representación de los conjuntos difusos  $A*B$ .

División (Figura 3.7)

$$A \oslash B = \max\{\min(0,0) \mid [1/1], \min(0,1) \mid [2/2], \min(0.5,0.5) \mid [3/3], \min(1,0) \mid [4/4]\}$$

$$\max\{\min(0,0) \mid [2/1], \min(1,1) \mid [4/2]\}$$

$$\max\{\min(0.5,0) \mid [3/1]\}$$

$$\max\{\min(1,0) \mid [4/1]\}$$

$$A \oslash B = \{0.5 \mid 1, 1 \mid 2, 0 \mid 3, 0 \mid 4\}$$

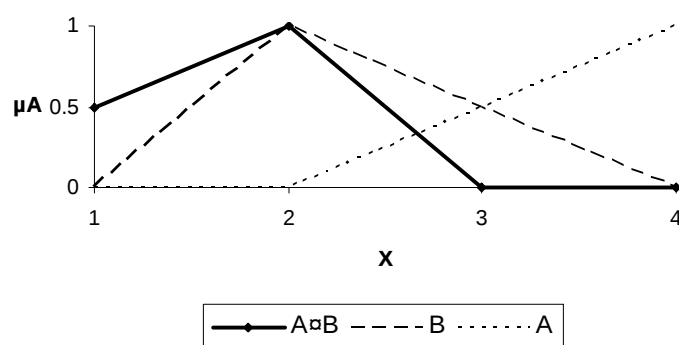


Figura 3.7 Representación de los conjuntos difusos  $A \oslash B$ .

## Anexo 2

Ponencia en  
14 WCEE

# SEISMIC STUDY OF THE URBAN BRIDGES OF THE CITY OF ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Fortunato Espinoza Barreras<sup>1</sup>, Carlos Isidro Huerta López<sup>2</sup>, Jesús Raymundo Juárez García<sup>1</sup>,  
Juan Pablo Torres Herrera<sup>1</sup>, Esperanza Maldonado Rondón<sup>3</sup>, Rosalba Sofía Contreras  
Porras,<sup>4</sup> América Reynaga Márquez<sup>5</sup>, Esmeralda Ramírez González<sup>5</sup>, González Ortega José  
Adrián<sup>5</sup>, Luis Ángel Monge De La Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professor, Ensenada Engineering School, Autonomous University of Baja California, Ensenada, Mexico.

<sup>2</sup> Senior-Research Scientist/Professor, Dept. of Seismology, Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada, Ensenada, Mexico.

<sup>3</sup> Civil Engineering School, Industrial University of Santander, Bucaramanga, Colombia.

<sup>4</sup> Student, Center for Scientific Research and Higher Education of Ensenada, Ensenada, Mexico.

<sup>5</sup> Student, Ensenada Engineering School, Autonomous University of Baja California, Ensenada, Mexico.

Email: fortunato@uabc.mx, [m-huerta@alumni.utexas.net](mailto:m-huerta@alumni.utexas.net), jjuares@uabc.mx

## ABSTRACT :

The coastal city of Ensenada Mexico (300 km south of Los Angeles, California), lies in an area close to the San Andres fault system, hence, seismic risk studies aimed to prevent the disaster that an eventual fail of the infrastructure (particularly the 29 city's urban bridges) might cause, are required. The objective of this research is to characterize those bridges in a Geographic Information System (GIS) according to their vulnerability. To achieve this goal, the study has been integrated in three stages: microtremors' measurement, to determine the bridge's fundamental periods; seismic vulnerability computation with Maldonado method (fuzzy sets) and correlation with the structural models of finite-element of some bridges; and the GIS construction. With this information, a GIS showing the seismic vulnerability for each bridge is available to be harness by the local emergency management agency.

## KEYWORDS:

Bridges, seismic research, seismic vulnerability, microtremors, fuzzy sets

## 1. BRIEF BRIDGES DESCRIPTION

Table 1. Bridges main data: structural type, plan dimensions, span number and crossing stream.

| Bridge        | Structural type                                                        | Length | Width | Span Number | Stream          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------------|-----------------|
| Calle Segunda | Reinforced concrete with simply supported over piers prestressed beams | 54.70  | 15.40 | 3           | Ensenada Stream |
| Villabonita   | Reinforced concrete with simply supported over piers prestressed beams | 32.00  | 10.60 | 1           | El Gallo Stream |
| El Gallo      | Reinforced concrete caisson supported over the abutments               | 18.00  | 18.50 | 1           | El Gallo Stream |
| Calle Nueve   | Reinforced concrete with simply supported over piers prestressed beams | 43.30  | 17.60 | 3           | Ensenada Stream |

Four of twenty nine bridges of Ensenada City (Table 1) were subjected to measurements of microtremors. The bridges, with 2 or 4 circulation tracks, were erected with reinforced concrete, three of them with prestressed simple-supported over piers beams and one, with a caisson system supported over the abutments (Figure 1).



Figure 1 One of the 29 Ensenada urban bridges: Calle 9.

## 2. EQUIPMENT SPECIFICATIONS

### 2.1. Sensors

Four EpiSensor FBA ES-T accelerometers that use piezoelectric elements to detect the three orthogonal components of the microtremors were used. Their specifications are shown in the table 2.

Table 2. Triaxial EpiSensor FBA ES-T accelerometer specifications

|                         |                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bandwidth               | DC-200 Hz                                                                                                               |
| Cross-axis sensitivity: | < 1% (including misalignment)                                                                                           |
| Full-scale range:       | User selectable at $\pm 0.25g$                                                                                          |
| Outputs:                | User selectable at: $\pm 2.5V$ single-ended; $\pm 10V$ single-ended;<br>$\pm 5 V$ differential; $\pm 20 V$ differential |

### 2.2. Event recorder

To record the waves, a Kinometrics SSR-1 six channels recorder was used (Table 3). A laptop is used to set the recording parameters: the computer is plugged to the recorder and using a communication protocol, the parameters to start the record are defined. When a wave is registered by the accelerometer, enters to the recorder, where according to the way the sign should be registered, the number of channels, sample velocity, gain, and filter type is selected.

Table 3. Kinemetrics SSR-1 recorder specifications

|                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| Storage type               | Solid state memory             |
| Available channels         | 6                              |
| Analogic-digital converter | 16 bits                        |
| Filters type               | 6 poles Butterworth and Bessel |
| Filter's crop frequency    | 5, 15 ó 50 Hz                  |
| Gain                       | 1, 10, 100 ó 1000              |
| Sample frequency           | 50, 100 o 200 samples/s        |

### 3. PROCEDURE

#### 3.1. Excitation source

Microtremors –consisting in low energy waves and periods between 0.1 and 10 s–, are the excitation source used to measure the structure's response. Microtremors are mainly generated by human activity, industrial machinery performance and vehicular traffic. Also, contains wind-produced vibrations induced into the soil by trees, buildings or by their impact on the relief. This source is not associated to earthquakes and some researchers regard that microtremors (natural or cultural noise) is formed by superficial waves generated at ocean-continent interaction zones, by planet's fundamental vibration modes, by atmospheric pressure changes and by internal volcanic activity, as well as by artificial sources previously quoted (Espinoza, 1999). As an advantage, this excitation source is non-destructive –does not cause damage to the structure– because of its low acceleration, in order of  $10^{-3} \text{ cm/s}^2$ .

#### 3.2. Sensor's arrays

To measure the microtremors and according to the geometric characteristics of each bridge, different arrays of sensors were disposed on the structure. For each array, all three orthogonal directions of movement were registered, assigning always the x, y and z, axis to longitudinal, transversal and vertical directions, respectively. For instance, to measure the longitudinal (in the direction of the traffic of vehicles), transversal (in the direction of the flow of the stream), and vertical components, the sensors were placed in the corners of the El Gallo bridge and free field as shown in Figure 2.

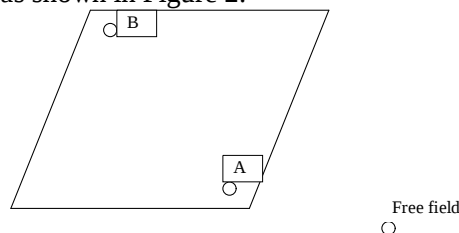


Figure 2 Outline of El Gallo bridge and measured points

#### 3.3. Data recording.

Collected time series range was between 10 and 20 minutes and sample frequency was 50 Hz, for all cases. Registered microtremors waves were processed at the frequencies domain to obtain transfer functions using as input the signal measured at free field and as output the signal at the bridge's deck.

### 4. MALDONADO METHOD AND CALCULATION OF VULNERABILITY INDEX

In this work the fuzzy sets are used to quantify the vulnerability index relating the qualifications of each

parameter and its respective values of importance (Cervantes, 2007). The traditional method of combination of several pieces of information, with unequal importance or weights is used to calculate the seismic vulnerability index of the Ensenada urban bridges. The vulnerability index is expressed in the following formula (Eqn. 4.1):

$$IV = \frac{\sum_{i=1}^{19} w_i K_i}{\sum_{i=1}^{19} w_i} \quad (4.1)$$

where  $IV$  is the seismic vulnerability index of the bridge,  $K_i$  is a measurement of the degree of vulnerability of the category of parameter  $i$ . The  $W_i$  values (weights) are the measurement of the opinion of the importance associated to parameter  $i$  with respect to the other parameters. The values  $K_i$  and  $W_i$  are fuzzy numbers. Regarded the most relevant and influential on the bridge behavior under a seismic action, those parameters were determined by Maldonado (2000) and are used to calculate the vulnerability index  $IV$ .

Table 4. Maldonado Method uses 19 parameters that were determined based in studies realized on behavior seismic of bridges, postearthquake experiences, studies of existing models and opinions of experts.

| Parameter of the model |                                                    |
|------------------------|----------------------------------------------------|
| Symbol                 | Description                                        |
| $K_1$                  | Year of project and construction of the bridge     |
| $K_2$                  | Type of superstructure                             |
| $K_3$                  | Shape of the superstructure                        |
| $K_4$                  | Existence of internal joints                       |
| $K_5$                  | Material of the superstructure                     |
| $K_6$                  | Type of pile                                       |
| $K_7$                  | Type of foundation                                 |
| $K_8$                  | Material of pile                                   |
| $K_9$                  | Longitudinal irregularity in geometry or stiffness |
| $K_{10}$               | Length of stirrup                                  |
| $K_{11}$               | Soil type                                          |
| $K_{12}$               | Type of stirrup                                    |
| $K_{13}$               | Length of abutment                                 |
| $K_{14}$               | Type of support                                    |
| $K_{15}$               | Conservation condition                             |
| $K_{16}$               | Constructive procedure                             |
| $K_{17}$               | Constructive procedure of the piles (concrete)     |
| $K_{18}$               | Liquefaction potential                             |
| $K_{19}$               | Nonstructural elements                             |

## 5. FINITE ELEMENT MODEL

A three-dimensional finite element modeling technique for slab-on-girder bridges was used to verify the experimental tests. Figure 3 shows a model of the standard single span of the so-called El Gallo bridge (Espinoza et al, 2004).

For the bridge's analyses, the live loads were considered using the criterions of the regulation of the

AASHTO (1992); while the accidental loads were considered the criterions of the manual of civil works of the Electrical Federal Commission (1993); at last the different elements of concrete reinforced were design in agreement with the Regulation of the Constructions of Concrete Reinforced ACI-318-95.

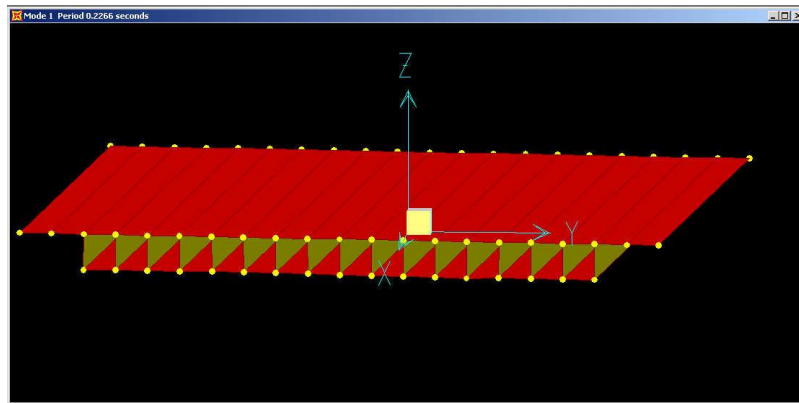


Figure 3. Lateral view of El Gallo Bridge.

A structural analysis program (SAP2000) was used to perform analyses. As shown in Figure 3, the model includes shell elements for the superstructure. The bridge members properties were  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  for steel and  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$  for concrete. The total dead load was  $1470 \text{ kg/m}^2$  and the live load was  $2903 \text{ kg/m}^2$ . Furthermore, a concentrated load of  $3132 \text{ kg}$  was considered in agreement of AASHTO code. Fundamental period obtained using modal analyses is  $0.23\text{s}$ .

From analysis of the time series (Figure 4) we obtained Fourier spectra (Figure 5) and identify frequencies and fundamental periods (table 6). The stiffest bridge is El Gallo, with around  $0.2 \text{ s}$  in its three components, and the most flexible, Calle Nueve bridge with  $1.7 \text{ s}$  at longitudinal direction. Soils periods vary from  $0.3$  to  $0.8 \text{ s}$ .

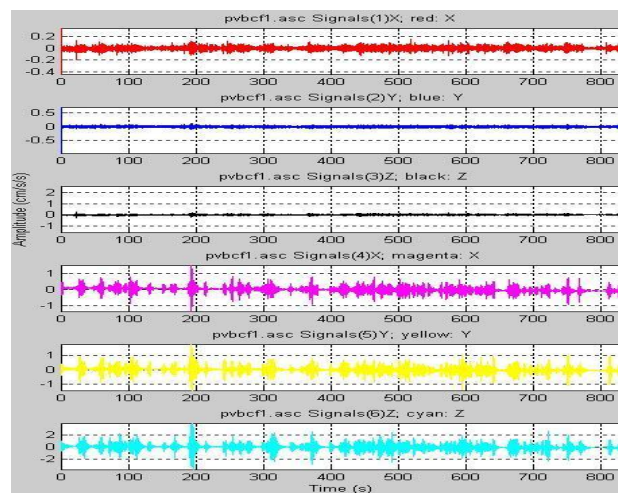


Figure 4 Accelerations measured in two sensors with 3 channels ( $x = \text{longitudinal}$ ,  $y = \text{transversal}$  and  $z = \text{vertical}$ ) in up to down order. Upper signals belong to free field and the bottom ones to deck of Villabonita bridge.

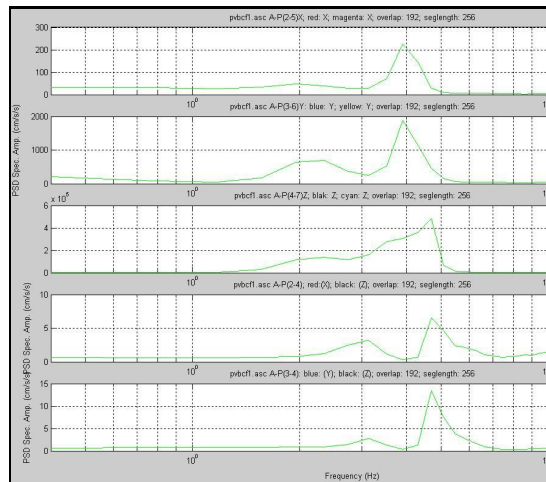


Figure 5. Power Spectral density of signals measured at Villabonita bridge. The upper graphs correspond to x,y and z component and bottom graphs represent transfer function in x and y component.

Table 6 Vibration fundamental mode frequencies (Hz) of the four bridges. Inside parenthesis, periods in seconds are shown. Associated value with the X component of Calle Segunda bridge was not identified.

| Bridge        | X            | Y           | Z         | Soil      |           |
|---------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|               | Longitudinal | Transversal | Vertical  | X         | Y         |
| Calle Segunda | 1.4 (0.7)    | 6.5 (0.2)   | 8.8 (0.1) | -         | 1.2 (0.8) |
| Villabonita   | 3.8 (0.3)    | 3.8 (0.3)   | 4.6 (0.2) | 3.2 (0.3) | 3.2 (0.3) |
| El Gallo      | 4.3 (0.2)    | 5.6(0.2)    | 4.3 (0.2) | 1.2 (0.8) | 1.4 (0.7) |
| Calle Nueve   | 0.6 (1.7)    | 4.4 (0.2)   | 0.7 (1.4) | 1.6 (0.6) | 1.4 (0.7) |

## 6. GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS)

GIS is a relatively recent tool assisting seismic risk researches. It eases analysis method implementation, data management and in particular, results visualization thanks to its georeferencial capacity, which permits to model geographic elements in the research zone in a more realistic way. In addition, database support on which SIG data is built, ease data managements in a simple and quick way (Mena, 2002).

To generate the web based GIS, Bridges' geographic coordinates, the IV and other columns are lumped. The SIG is built with ArcView and its execution runs on ArcExplorer. The first application permits to visualize and to edit the map and the second one permits to visualize the map on the web. Vectorial data format is Shapefile (.shp) and raster image format is Joint Photographic Experts Group (.jpeg). Once finished, this tool brings support in the generation and disposition of seismic risk maps and in the determination of contingency plans on emergency cases (Juarez et al, 2007).

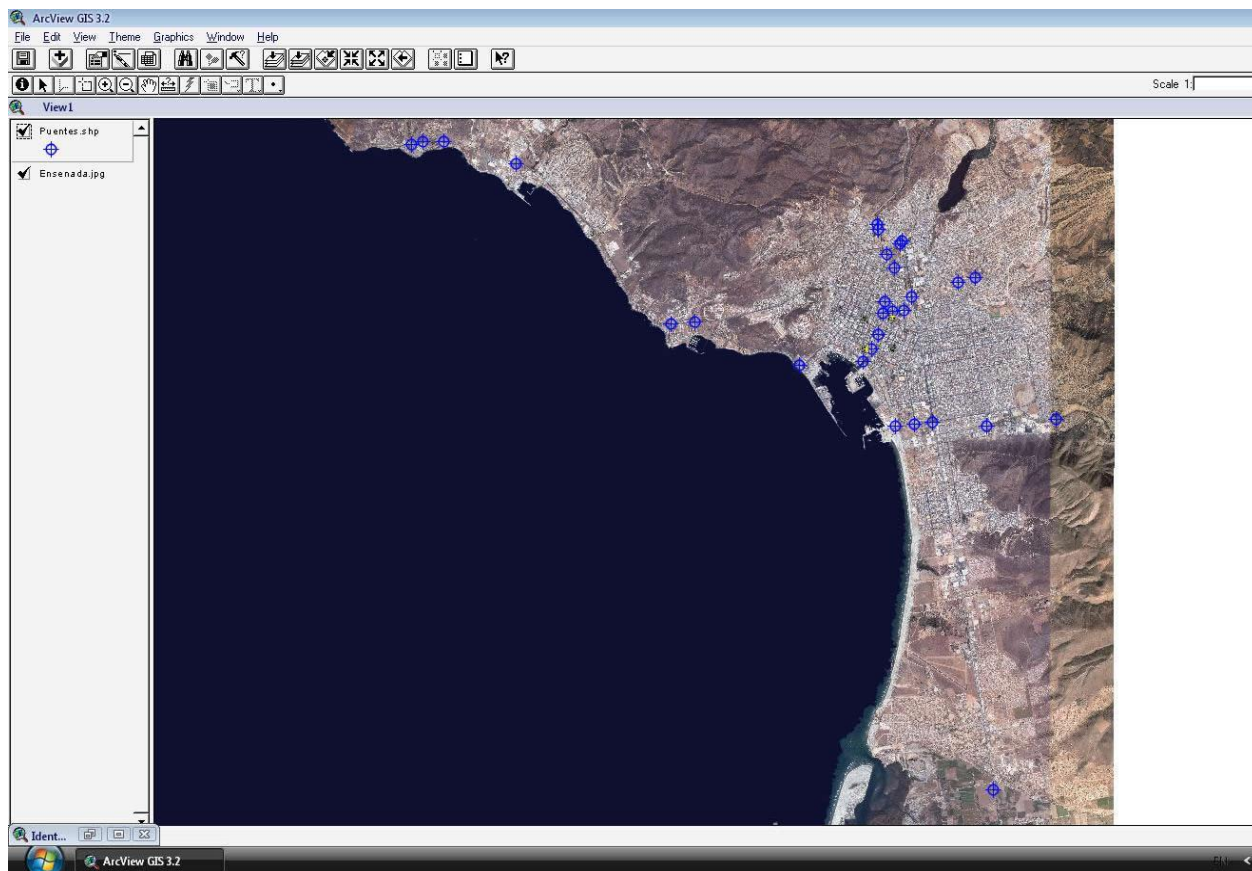


Figure 6. Map's visualization with ArcView, showing all bridges constructed in the urban zone of Ensenada, Baja California Mexico.

## 7 RESULTS

Database and web-based GIS are shown in figures 6 and 7, respectively. As a result, a GIS containing the vulnerability index for all bridges in the urban zone of Ensenada, is available to be harness by the local emergency management agency.

Table 7 SIG's generatrix table; first column: identification number; second: road name; third and fourth: geographical coordinates obtained from a Garmin GPS device; fifth: negotiated hurdle by the bridge; sixth to eight: bridge's length, width and span number; ninth and tenth: vulnerability index and its interpretation, respectively.

|   |                              |              |               |                 |       |                     |   |     |                        |
|---|------------------------------|--------------|---------------|-----------------|-------|---------------------|---|-----|------------------------|
| 1 | Bld. General Lázaro Cárdenas | 31°51'33.5"N | 116°37'11.7"W | Ensenada Stream | 61.50 | 2 tranches of 15.5m | 4 | 2.3 | Low vulnerability      |
| 2 | Calle Segunda                | 31°51'40.6"N | 116°37'4.3"W  | Ensenada Stream | 54.70 | 15.5                | 3 | 3.4 | Low vulnerability      |
| 3 | Av. Juárez                   | 31°51'51.7"N | 116°36'58.9"W | Ensenada Stream | 61.70 | 16.7                | 8 | 3.2 | Low vulnerability      |
| 4 | Calle Novena                 | 31°52'7.30"N | 116°36'54.3"W | Ensenada Stream | 43.30 | 17.6                | 3 | 4.5 | Moderate vulnerability |

|   |              |              |               |                    |       |     |   |     |                        |
|---|--------------|--------------|---------------|--------------------|-------|-----|---|-----|------------------------|
| 5 | Calle Once   | 31°56'16.6"N | 116°36'52.9"W | Ensenada Stream    | 50.00 | 20  | 2 | 4.1 | Low vulnerability      |
| 6 | Alisos       | 31°52'40.9"N | 116°36'44.4"W | Ensenada Stream    | 43.00 | 9.5 | 3 | 2.8 | Low vulnerability      |
| 7 | Av. Ambar    | 31°52'57.7"N | 116°36'38"W   | Ensenada Stream    | 18.00 | 21  | 1 | 3.1 | Low vulnerability      |
| 8 | Av. Reforma  | 31°53'0.3"N  | 116°36'37.8"W | Ensenada Stream    | 24.50 | 10  | 5 | 4.7 | Moderate vulnerability |
| 9 | Av. Espinoza | 31°52'9.3"N  | 116°36'47.2"W | El Aguajito Stream | 20.60 | 10  | 1 | 3.5 | Low vulnerability      |

|    |                                         |               |                |                       |       |                      |   |     |                        |
|----|-----------------------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------|----------------------|---|-----|------------------------|
| 10 | Calle Once (Xochicalco)                 | 31°52'8.1"N   | 116°36'36.1"W  | Ensenada Stream       | 18.10 | 16.8                 | 1 | 3.6 | Low vulnerability      |
| 11 | Av. Reforma (Mision)                    | 31°52'19.30"N | 116°36'29.4"W  | Ensenada Stream       | 28.10 | 19.8                 | 1 | 3.3 | Low vulnerability      |
| 12 | I. Allende                              | 31°52'30.5"N  | 116°35'48.2"W  | Doña Petra Stream     | 14.00 | 8.4                  | 3 | 3.8 | Moderate vulnerability |
| 13 | Calle Bronce                            | 31°52'33.8"N  | 116°35'35.2"W  | Doña Petra Stream     | 15.00 | 10.7                 | 1 | 4.1 | Moderate vulnerability |
| 14 | Av. Riveroll                            | 31°52'49.9"N  | 116°36'50.7"W  | Doña Petra Stream     | 21.60 | 14.5                 | 1 | 3.3 | Low vulnerability      |
| 15 | Calle Agaves                            | 31°53'8.3"N   | 116°36'57.8"W  | El Gallo Stream       | 8.30  | 8.7                  | 1 | 3.3 | Low vulnerability      |
| 16 | Calle Puebla                            | 31°53'16.9"N  | 116°37'1.1"W   | El Gallo Stream       | 11.70 | 14.6                 | 1 | 3.8 | Low vulnerability      |
| 17 | Puente Nuevo                            | 31°50'49.7"N  | 116°34'21.5"W  | El Gallo Stream       | 21.80 | 2 tranches of 12.30m | 1 | 2.8 | Low vulnerability      |
| 18 | Av. Pedro Loyola                        | 31°50'46.00"N | 116°36'28.2"W  | El Gallo Stream       | 19.25 | 23.5                 | 1 | 3.1 | Low vulnerability      |
| 19 | Av. Reforma                             | 31°50'45.8"N  | 116°36'10.8"W  | El Gallo Stream       | 62.65 | 26                   | 5 | 3.7 | Low vulnerability      |
| 20 | Av. Mexico                              | 31°50'43.20"N | 116°35'24.3"W  | El Gallo Stream       | 18.00 | 18.5                 | 1 | 3.3 | Low vulnerability      |
| 21 | Access to Villa Bonita                  | 31°50'49.2"N  | 116°34'21.8"W  | Tijuana-Ensenada Road | 32.00 | 10.6                 | 1 | 2.7 | Low vulnerability      |
| 22 | Access to Ensenada by Recinto Portuario | 31°59'29.10"N | 116°38'7.4"W   | Tijuana-Ensenada Road | 30.50 | 36                   | 1 | 3.8 | Low vulnerability      |
| 23 | Marina Coral                            | 31°52'0.2"N   | 116°39'40.4"W  | Tijuana-Ensenada Road | 30.00 | 14                   | 1 | 3.8 | Low vulnerability      |
| 24 | Access to UABC                          | 31°51'59.9"N  | 116°40'1.7"W   | Tijuana-Ensenada Road | 32.00 | 13                   | 2 | 3.7 | Low vulnerability      |
| 25 | Access to Ensenada from Tecate          | 31°53'55.00"N | 116°42'17.7"W  | Tijuana-Ensenada Road | 28.15 | 9                    | 2 | 4.0 | Moderate vulnerability |
| 26 | Access to Cíbulas del mar from Tijuana  | 31°54'13.13"N | 116°43'21.00"W | Tijuana-Ensenada Road | 25.70 | 22.6                 | 3 | 2.8 | Low vulnerability      |
| 27 | Access to                               | 31°54'13.00"N | 116°43'39.8"W  | Tijuana-              | 25.80 | 9                    | 2 | 3.0 | Low                    |

|    |                                        |              |                |                       |       |      |   |     |                        |
|----|----------------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|-------|------|---|-----|------------------------|
|    | Carretera libre from Tiwana            |              |                | Ensenada Road         |       |      |   |     | vulnerability          |
| 28 | San Miguel                             |              |                | Riverbed unidentified | 82.00 | 10   | 4 | 3.9 | Moderate vulnerability |
| 29 | Carretera Transpeninsular (San Carlos) | 31°46'16.5"N | 116°35'17.00"W | Riverbed unidentified | 38.00 | 17.5 | 3 | 3.8 | Moderate vulnerability |

## REFERENCES

AASHTO (1992). Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials. USA.

Cervantes Gutiérrez Augusto Rodrigo. (2007). Cálculo del Índice de Vulnerabilidad de un Puente Urbano en Ensenada, BC, Utilizando Conjuntos Difusos, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, BC, México.

Comisión Federal de Electricidad. CFE (1993). Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE. México.

Espinoza B.F. (1999), Determinación de Características Dinámicas de Estructuras. Tesis doctoral ISBN: 84-699-9543-x Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.  
[http://www.tdx.cesca.es/index\\_tdx3\\_cs.html](http://www.tdx.cesca.es/index_tdx3_cs.html)

Espinoza Barreras, Fortunato; Mena Hernández, Ulises; Maldonado Rondón, Esperanza; Huerta López, Carlos Isidro; Chio Cho, Gustavo; Cervantes Gutiérrez, Augusto Rodrigo y Presichi Gerardo, Donobhan. (2004). Urban Bridge Stability Study In Ensenada, Baja California, Mexico. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canadá. Proceedings 2725.

Maldonado E. (2000). Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en Puentes, PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.

Mena Ulises. (2002). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.

Jesús Raymundo Juárez García, Fortunato Espinoza Barreras, Juan Pablo Torres Herrera, Carlos Isidro Huerta López, Esperanza Maldonado Rondón, Luis Ángel Monge De La Cruz, Felipe de Jesús Ricalde y Lugo. 2007. Sistema de Información Geográfica de Puentes Urbanos de Ensenada, BC. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. México.

## REFERENCIAS

Maldonado E., 2000. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Cervantes A. R., 2007. Cálculo Del Índice De Vulnerabilidad De Un Puente Urbano En Ensenada, BC, Utilizando Conjuntos Difusos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, México.

Soares L.J., 2003. Aplicación de la microzonación sísmica a la seguridad de estructuras críticas en la ciudad de Ensenada. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.

Ibarra T.G., 2004. Microzonación de periodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.

Consejo estatal de población (CONEPO), Reporte sobre población en áreas urbanas, Baja California, 2003.

Bazan, Enrique, Roberto Meli. Diseño sísmico de edificios. México, Limusa, 2004, 320 p. il; 21 cm ISBN 968-18-5349-0

Espinoza B.F. (1999), “Determinación de características dinámicas de estructuras”, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

CFE (Comisión Federal de Electricidad), Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1993. Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño Sísmico. Editado por CFE, México.

Espinoza B.F., Cervantes A. R., Maldonado E., Chio G., 2003. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad de un Puente Urbano en Ensenada, BC, Utilizando Conjuntos Difusos. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guanajuato, México.

Gomez S.C., Barbat A.H., Oller, S. Vulnerabilidad de puentes de autopista. Un estado del arte. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-41 2000, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 167 páginas. ISBN 84-89925-64-X.

Espinoza F., Mena U., Maldonado M., Huerta C. I., Chio G., Cervantes A. R. y Presichi D., 2004. Urban Bridge Stability Study In Ensenada, Baja California, México. 13th World Conference On Earthquake Engineering. Vancouver, Canadá.

Espinoza F., Mena U., Canas J. A., Pujades L. G. Y Caselles O., 2004. Estimación de Algunas Propiedades Dinámicas de los Edificios de Barcelona, España, Utilizando SIG. Revista Internacional de Estructuras. Vol. 9, No 1, pp 19-30.

Gómez Soberón C., 2000. Vulnerabilidad De Puentes De Autopistas. Un Estado Del Arte. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-41 2000, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 168 páginas. ISBN 84-89925-64-X.

Maldonado E., Canas J. A., Casas J. R. y Pujades L. G., 1998. Respuesta De Puentes Frente a Acciones Sísmicas. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-27 1998, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 107 páginas. ISBN 84-89925-23-2.

Maldonado E., Canas J. A. y Casas J. R., 1998. Estudio De Parámetros En La Vulnerabilidad Sísmica De Puentes. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-28 1998, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 97 páginas. ISBN 84-89925-16-X. Maldonado E., Canas J. A. y Casas J. R., 2000. Modelo De Vulnerabilidad Sísmica De Puentes Basado en “Conjuntos Difusos”. Monografía de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-40 2000, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, España. 110 páginas. ISBN 84-89925-62-3.

Memorias del First International Conference on Bridge, Maintenance, Safety and Management. 2002. Barcelona, España.

Memorias de múltiples congresos nacionales e internacionales de ingeniería sísmica.

Mena Ulises, 2002. Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Reglamento de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, 1992. Periódico Oficial del estado de Baja California, Tomo XCIX, No 21, 30 de Junio de 1992. Mexicali, BC.

Yépez F., 1996. Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Estructuras Aplicando Técnicas de Simulación. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Referencias electrónicas

SISMOS OCURRIDOS EN LA CIUDAD DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

<http://www.ssn.unam.mx/>

FASCICULO SISMOS. Cenapred

<http://www.proteccioncivil.gob.mx/upLoad/Publicaciones/tecnicas/fsismo.pdf>

Introducción

<http://sismologia.cicese.mx/resnom/principal/informacion.php>

<http://www.ensenadahoy.com/ciudad/locali.php>

<http://sismologia.cicese.mx/resnom/estaciones/ubicacion.php>