

METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO SÍSMICO EN PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO

GUSTAVO CHIO CHO

Profesora Asociado
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander
gchioch@uis.edu.co

ESPERANZA MALDONADO RONDÓN

Profesora Titular
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander
emaldona@uis.edu.co

Fecha Recepción: 28 de septiembre de 2006

Fecha Aceptación: 21 de noviembre de 2006

RESUMEN

Ante la probabilidad de ocurrencia del colapso de los puentes por la acción sísmica, es importante contar con algunas herramientas que permitan predecir su comportamiento, razón por la cual el presente trabajo plantea una metodología para establecer funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño en puentes carreteables de hormigón armado. La metodología empleada incorpora la evaluación de un índice de vulnerabilidad a través de un modelo construido a partir de opinión de expertos y lo relaciona con un índice de daño, mediante la aplicación del modelo propuesto por Park y Ang. Para ello, se hizo el inventario de los puentes existentes en la ciudad de Bucaramanga, y con esta información se elaboró una base de datos que facilitara la aplicación de la metodología. Se plantearon funciones preliminares y con ellas se evaluaron los daños probables ante diferentes eventos sísmicos.

PALABRAS CLAVE: Puentes, funciones de vulnerabilidad, matrices de probabilidad de daño, daño sísmico.

ABSTRACT

In the presence of the event of bridges collapse for seismic action, it is important to take into account some tools which allow predicting their performance. Speaking of which, this work has the purpose to set up a methodology for the construction of vulnerability functions and damage probability matrices for reinforced concrete bridges. The methodology embodies the evaluation of a vulnerability index through a built model in which the opinion of experts was considered, and relates it with a damage index, through the appliance of the model proposed by Park and Ang. For this, the inventory of the bridges in existence in the city of Bucaramanga was done, and with this information a data base was built and this made easier the appliance of this methodology. In this way, preliminary functions were built and with these, the expected damages were evaluated before different seismic events.

KEY WORDS: Bridges, Vulnerability Functions, Damage Probability Matrices, Seismic Damage.

INTRODUCCIÓN

El resultado final en un estudio de vulnerabilidad es el índice de daño que sufriría una tipología estructural específica, sometida a una determinada acción sísmica. Este resultado puede obtenerse mediante dos procedimientos: el primero utilizando las funciones de vulnerabilidad y el segundo a través de las denominadas matrices de probabilidad de daño.

Una función de vulnerabilidad es una relación matemática que expresa en forma continua el daño que puede sufrir un tipo de estructura específico, cuando se somete a una sollicitación sísmica de determinada intensidad. Las funciones de vulnerabilidad se deducen por medio de una regresión estadística de datos en daños observados o generados. Una de sus principales variantes constituyen

las funciones de vulnerabilidad que relacionan un índice de vulnerabilidad con un índice de daño condicionado por un parámetro que describe el movimiento del terreno, este parámetro puede ser la aceleración máxima, o una de las escalas de intensidad sísmica, tales como MSK y MMI.

Las matrices de probabilidad de daño, por su parte, expresan una probabilidad discreta de la distribución de daño para un tipo de estructura y una intensidad sísmica dada. Es decir, expresan la probabilidad condicional de tener un nivel de daño para una determinada tipología dado una acción sísmica.

Los principales métodos utilizados para la generación de las matrices de probabilidad de daño o funciones de vulnerabilidad, difieren básicamente en los datos de entrada y el método de obtención de las probabilidades asociadas a cada estado de daño, por ello se tienen métodos basados en observaciones de campo o en opinión de expertos y métodos experimentales o analíticos.

En el presente estudio, al no contar con datos de daño reales ni con información experimental de daño se procedió a proponer construir funciones de vulnerabilidad relacionando un índice de vulnerabilidad desarrollando en base a opinión de expertos [1] [2] y un índice de daño utilizando el modelo propuesto por Park y Ang [3] [4].

Definida la metodología para construir las funciones de vulnerabilidad, se requería contar con una base de datos para las características de los puentes carreteables, para ello se inventariaron los puentes de Bucaramanga y se seleccionaron algunos de los más representativos que contaban con la suficiente información para poder realizar un estudio de daño sísmico. Los puentes seleccionados se modelaron y se analizaron dinámicamente; posteriormente se les evaluó el índice de vulnerabilidad utilizando el programa INDICE [1] [2] y el índice de daño con IDARC-2D [5] para diferentes acciones sísmicas. Dado que la muestra de puentes reales no fue suficiente para involucrar la gama de índices de vulnerabilidad necesarios para construir las funciones de vulnerabilidad, fue necesario ampliar la muestra simulando más puentes.

Con los índices de vulnerabilidad y de daño, para diferentes valores de la acción sísmica, se construyeron las funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño. Estas funciones fueron utilizadas para evaluar el nivel de daño que pueden lograr los puentes de la ciudad de Bucaramanga ante la ocurrencia de acciones sísmicas.

Por consiguiente, se espera que trabajos de este tipo sirvan de base para la posterior elaboración de programas de prevención tales como obras de reforzamiento, y programas

de emergencia que permitan proponer rutas de evacuación ante un desastre natural sísmico.

METODOLOGÍAS EXISTENTES APLICABLES A PUENTES

Actualmente existen diversas funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico propuestas para puentes, algunas de ellas construidas sobre datos reales de daño, las cuales las hace aplicables solamente a la zona de donde procede la información.

El método de Vaz y Bairaio [6] se basa en el concepto de función de vulnerabilidad como una herramienta fundamental para el cálculo de la probabilidad de falla e involucra la consideración de falla local predefinida y su generalización a toda la estructura. El modelo parte de la definición de las variables que describen los efectos de la acción del sismo, llamadas variables de control, posteriormente las calcula mediante análisis lineales considerando los valores característicos de la acción sísmica; luego diseña la estructura y finalmente, evalúa las funciones de vulnerabilidad. Las funciones de vulnerabilidad se definen como funciones no lineales que relacionan los valores de los parámetros que describen la acción sísmica y el daño. Los cálculos son desarrollados para varios valores de aceleración pico del terreno, mediante un adecuado escalonamiento de los acelerogramas seleccionados.

Uno de los métodos más simples para estimar el comportamiento de las estructuras es a través de su modelación como sistemas de un grado de libertad, dado que se considera su respuesta equivalente a las de múltiples grados. Bajo esta consideración Miranda [7] [8] estima que la fragilidad de las estructuras se define comparando las demandas estructurales, en desplazamientos laterales máximos y en ductilidad, con sus capacidades correspondientes. Este método propuesto para edificaciones, es aplicado a puentes, especialmente cuando se considere que la respuesta de la estructura real se debe principalmente a su modo fundamental de vibración. En este método, la comparación de la demanda de hace a nivel local y global, calculando la demanda de deformación sísmica global sobre la estructura mediante el cálculo de la respuesta en un sistema equivalente no lineal de un grado de libertad a través de la integración numérica paso a paso. Para la caracterización del daño la acción sísmica se define por la aceleración máxima de los registros sísmicos.

La metodología propuesta por el Applied Technology Council [9] [10] considera la estimación de la vulnerabilidad sísmica de los tipos comunes de líneas vitales en

los Estados Unidos, incluyendo los sistemas de transporte y entre estos, los puentes. El Applied Technology Council propone a partir de datos geométricos de las estructuras determinar, mediante análisis estadísticos de la opinión de expertos, las matrices de probabilidad de daño y funciones de vulnerabilidad. A diferencia de otros métodos el análisis estadístico se realiza sobre opinión de expertos y no sobre los daños registrados en sismos pasados. En el ATC-25 [10] las matrices de probabilidad de daño (MPD) fueron tomadas directamente del ATC-13 [9], las cuales representan la acción sísmica mediante la Intensidad Modificada de Mercalli (IMM) y se basan en el comportamiento de edificaciones en California.

Basados en métodos estadísticos, Xuenshen y Shuming [11] obtuvieron las matrices de vulnerabilidad de diferentes tipos de puentes para datos registrados de daños producidos por el sismo de Tangshan en 1976, lo cual limita su aplicación a la región donde fueron registrados los datos. Cada matriz está expresada en función de la intensidad del sismo y del nivel de daño, siendo el rango de intensidades usado de 7 a 11 grados y el grado de daño de apenas dañado a devastador.

La curvas de fragilidad adoptadas por Mullen y Cakmak [12] se basan en la obtención, mediante experimentos numéricos, de las relaciones entre daño e intensidad sísmica. El daño es definido por medio de los resultados de análisis dinámicos no lineales a lo largo del tiempo, principalmente para los elementos pilas, considerando la naturaleza tridimensional de su respuesta y sus efectos. Mullen y Cakmak [12] representaron el daño a través de un índice el cual es función de la máxima distorsión de los extremos de la pila.

A partir de la información recopilada sobre los daños ocurridos, en puentes, durante los sismos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994) Basöz y Kiremidjian (1995, 1997, 1998) construyeron las matrices de probabilidad de daño y las curvas de vulnerabilidad para las diferentes tipologías de puentes existentes en el inventario recopilado. El parámetro utilizado para la consideración de la acción sísmica fue la aceleración pico.

Como un procedimiento de evaluación preliminar, Shinozuka [13] desarrollo una metodología, para obtener curvas de fragilidad de puentes incluyendo el juicio profesional, análisis quasiestáticos consistentes con los códigos de diseño, estudios estadísticos de datos de daños asociados a sismos pasados y simulaciones numéricas de la respuesta sísmica de puentes a partir de la dinámica estructural; tomando la aceleración máxima del terreno como el parámetro de la acción sísmica.

DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA CONSTRUIR LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD Y MATRICES DE DAÑO SÍSMICO

Basados en los métodos propuestos de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño para puentes y otros aplicados a edificaciones [14] [15] [16] [17] [18], y al no contar con información de daños en puentes debido a acciones sísmicas, fue necesario proponer la construcción de las funciones a partir tanto del juicio de expertos como de métodos analíticos; luego, en este trabajo se decidió relacionar un índice de vulnerabilidad basado en opinión de expertos con un índice de daño analítico. De esta manera la metodología definida para la construcción de las funciones es la siguiente:

- Selección del parámetro de la acción sísmica, en este caso se consideró trabajar con la aceleración máxima del terreno.
- Determinación de los registros de acelerogramas representativos de las acciones sísmicas de la zona de estudio.
- Selección de una muestra de puentes sobre los cuales se tenga suficiente información, para evaluar el daño analíticamente.
- Recopilación de la información de los puentes mediante la realización de la inspección de campo de cada uno de ellos.
- Evaluación del índice de vulnerabilidad para cada puente mediante la utilización del método del índice de vulnerabilidad basado en la opinión de expertos, aplicando el programa INDICE [1] [2].
- Evaluación del índice de daño mediante el modelo de Park y Ang utilizando el programa IDARC, para las acciones sísmicas definidas.
- Verificación del rango de índices de vulnerabilidad y de daño, de manera que sean suficientes para la construcción de las funciones. Si es necesario ampliar el rango se debe aumentar la muestra de puentes.
- Relación de los índices de vulnerabilidad con los de daño para cada una de las acciones sísmicas dadas.
- Generación de una regresión que mejor se ajuste a los datos del índice de vulnerabilidad versus el índice de daño para cada acción

Definidas las funciones de vulnerabilidad se construyen las matrices de probabilidad de la siguiente manera:

- Definición y descripción de los estados de daño, para ello se recomienda utilizar los propuestos por Park y Ang, los cuales han sido utilizados en puentes.

- Cálculo del número de estructuras (m_i) que excede los estados de daño, ED_j .
- Para cada estado de daño, ED_j , estimar la probabilidad de falla, F_j , de la estructura cuando se ve sometida a un sismo con aceleración, a_j , mediante la expresión:

$$F_i = \frac{m_i}{N_k} \quad (1)$$

Siendo N_k el número de estructuras de la muestra.

- Ajuste de una función de distribución para el grupo de datos (a_i , f_i) correspondiente a cada estado de daño ED_j .

Definida la metodología general para la construcción de las funciones de vulnerabilidad, el método para la evaluación del índice de vulnerabilidad y el de daño es el siguiente:

Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes mediante un índice de vulnerabilidad

El método propuesto constituye una descripción completa de la información necesaria para obtener una expresión cuantitativa y cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de puentes llamado "*Índice de vulnerabilidad*". El cálculo del índice de vulnerabilidad se basa en la identificación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá un puente bajo la acción del sismo. La valoración de estas características se realiza mediante la determinación de 19 parámetros: año de diseño y construcción del puente, tipo de superestructura, forma de la superestructura, existencia de articulaciones internas, tipo de pila, tipo de cimentación, tipo de estribo, tipo de aparato de apoyo, material de la superestructura, material de la subestructura, longitud de apoyo en pilas y en estribos, estado de conservación del puente, irregularidad longitudinal en geometría o rigidez del puente, tipo de suelo en la ubicación del puente, transporte de otras líneas vitales, efecto de licuefacción y sistema constructivo de la superestructura y la subestructura.

A cada parámetro se le asignó un grado de vulnerabilidad y un valor de importancia en base a la opinión de expertos. Como el modelo está basado en opiniones de expertos, la cual cuenta con información subjetiva e imprecisa, se utilizaron técnicas de conjuntos difusos. La aritmética difusa se utiliza para relacionar las calificaciones de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia. El método tradicional de combinación de varias piezas de información difusas con desigual peso o importancia es el

llamado "peso promedio" y, se utiliza en esta investigación para calcular el "*índice de vulnerabilidad sísmica de puentes*" [1] [2].

$$I.V._j = \frac{\sum_{i=1}^{19} W_i K_i}{\sum_{i=1}^{19} W_i} \quad (2)$$

El desarrollar el modelo basado en opiniones de expertos procesadas por técnicas de conjuntos difusos, obliga a la construcción de las funciones de pertenencia de los grados de vulnerabilidad de cada parámetro y de sus valores de importancia. Además, el evaluar el índice de vulnerabilidad mediante un peso promedio difuso implica la utilización de operaciones aritméticas difusas; por ello, para realizar esta labor de forma más sistematizada se utiliza el programa **INDICE** [1] [2].

FORMA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO

El modelo requiere que, para su ejecución, previamente se realice el inventario de los puentes a analizar. El inventario consiste en dar respuesta a un formulario de levantamiento de los puentes en cuestión, dicho formulario contiene los 19 parámetros claramente definidos por cuatro condiciones de calidad impuestas (**A**, **B**, **C** ó **D**). El inspector debe responder a dicho formulario ubicando al puente en cada parámetro en la calificación **A**, **B**, **C** ó **D** que más se acomode. Por ejemplo, para el parámetro referente al año de construcción se describe cada una de las cuatro condiciones de calidad de dicho parámetro, el inspector ha de responder alguna de las cuatro divisiones entre **A** (después de 1994) y **D** (antes de 1950) de acuerdo al año de diseño y construcción del puente. Realizado el inventario de los puentes, la información se procesa mediante el programa **INDICE**.

De esta forma, con el modelo propuesto se obtiene un calificativo lingüístico y numérico del índice de vulnerabilidad de un puente además de poderse contar con la función que represente la ambigüedad de la respuesta. El modelo califica al puente entre nada, poco, medianamente, muy y absolutamente vulnerable. A su vez, le asigna un valor de 0 a 9 de índice de vulnerabilidad.

Metodología para la evaluación del daño sísmico en puentes

Para la evaluación del daño se utilizó el modelo de daño propuesto por Park y Ang [3] [4] [19] [20], el cual ha sido

ampliamente utilizado en edificios de hormigón, y en estudios de puentes ha mostrado buenos resultados [21]. Este modelo expresa el daño como una función de la deformación máxima y la energía histerética absorbida, luego el daño estructural sísmico se expresa como una combinación lineal del daño causado por la deformación excesiva y por la contribución del efecto de la repetición de la carga cíclica, de la siguiente manera:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (3)$$

Donde δ_m es la deformación máxima alcanzada; δ_u es la deformación última del elemento; Q_y es la resistencia de fluencia calculada; la integral de $\int dE$ es la energía histerética normalizada, y β es un parámetro del modelo.

Bajo respuesta elástica, el valor de **D** sería cero teóricamente. Sin embargo, la Ecuación (3) no da cero, pero si valores de **D** pequeños los cuales son despreciables en el rango elástico.

Valores del índice de daño **D**, tal que $D \geq 1.0$ significan colapso completo o daño total. Para valores menores a 1.0 Park y Ang han propuesto diferentes niveles de daño, de simple donde ocurren algunas grietas esporádicas a severas donde el agrietamiento deja incluso al descubierto la presencia del acero.

ACCIÓN SÍSMICA

En la construcción de las matrices de probabilidad de daño o de las curvas de vulnerabilidad es fundamental la selección del parámetro que exprese el tamaño de la excitación sísmica. Generalmente es común caracterizar el movimiento del suelo por medio de la escala de intensidad macrosísmica, principalmente debido a la falta de disponibilidad de otro tipo de datos. Sin embargo, el uso de la intensidad sísmica como medida de la peligrosidad, en algunas ocasiones, tiene un carácter subjetivo por ello se recomienda el uso de medidas instrumentales, como la aceleración o velocidad máxima del suelo Miranda [7] [8], Vaz y Bairrao [6], Mullen y Cakmak [12].

Luego, dado que la metodología propuesta en esta investigación requiere el registro de acción a lo largo del tiempo para evaluar el daño sísmico, se seleccionó la aceleración para representar el efecto del sismo. Por consiguiente, fue necesario contar con los registros de acelerogramas representativos de la amenaza en la ciudad. Para ello, primero se pensó en construir acelerogramas sintéticos que fueran compatibles con los espectros de

respuesta de diseño; esta opción fue descartada. Posteriormente, se tomó la opción de buscar acelerogramas más realistas, y para esto se seleccionaron registros apropiados de una base de datos real de movimientos fuertes correspondiente a escenarios sísmicos, compatibles con la amenaza como función de las magnitudes de las fuentes y sus distancias al sitio bajo estudio.

Para el caso se tomaron los acelerogramas utilizados en el estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga (Ingeominas, [22]), que representan de manera muy simplificada los registros de aceleración deben ser tenidos en cuenta en posteriores análisis estructurales y de respuesta sísmica local del suelo. Los acelerogramas seleccionados corresponden a las dos fuentes posibles de la ciudad, la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla Frontal. Para la evaluación de daño los acelerogramas se escalaron a diferentes valores de aceleración, 0.15g, 0.2g, 0.25g, 0.30g, 0.35g y 0.40g.

Definida la acción sísmica a nivel de la roca, se pasó a estudiar la respuesta dinámica de los suelos donde se encuentran ubicados los puentes de la muestra de estudio. Para ello fue necesario conocer, según las características geológicas, geofísicas y geotécnicas, las zonas representativas de la ciudad para el cálculo de la respuesta dinámica. Nuevamente, del estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga (Ingeominas, [22]), se tomaron las siete zonas (Roca, Abanico de Bucaramanga, Bad Lands, Flujo de escombros, Terrazas Bajas y Medias, Llenos y Cañaverl), con sus correspondientes características mecánicas y dinámicas.

Finalmente, inicio y concluyo, el estudio de la respuesta dinámica de los suelos mediante análisis unidimensional utilizando la herramienta computacional SHAKE 91[23].

INVENTARIO DE LOS PUENTES DE BUCARAMANGA

Para la aplicación de la metodología se seleccionaron 63 puentes carretables del Área Metropolitana de Bucaramanga, que la conforman las poblaciones de Floridablanca, Piedecuesta, Girón y Bucaramanga. La gran mayoría de estos puentes han sido construidos en hormigón entre reforzado y preresforzado [24]. Muchos de ellos corresponden a estructuras viales de un solo vano, con superestructura conformada por vigas y losa. En su mayoría son rectos, existiendo algunos con superestructura curva o sesgada. En cuanto al sistema de pilas, los hay de múltiples columnas y columna simple. En la Figura 1 se ilustra la ubicación de estos puentes.



Figura 1. Localización de los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Para hacer posible la realización del proceso de inventario de los puentes vehiculares, fue necesario construir el formulario de Inventario, el cual se estableció a partir de metodologías existentes para la evaluación de la vulnera-

bilidad estructural y de los utilizados en el Instituto Nacional de Vías [24]. En la Figura 2 se presenta parte del formulario utilizado para el levantamiento del viaducto García Cadena, uno de los puentes de mayor importancia en la ciudad.

**FORMULARIO DE INVENTARIO
DE
PUENTES DEL AMB**

DATOS GENERALES

1. LOCALIZACION

Nombre: Viaducto Garcia Cadena.

Carretera Soportada: Autopista a Floridablanca.

Coordenadas: X: 1.276.705,67 Y: 1.106.764,04

Aceleración Pico: 0,25

Departamento: Santander.

Municipio: Bucaramanga.

Sentido Inspección: Bucaramanga - Dimante II.

Referencia Anterior: Puente de Conucos sobre Autopista.

Referencia Posterior: Barrio Diamante II.

Propietario: Municipio de Bucaramanga.

2. SINGULARIDAD QUE SALVA EL PUENTE

Paso Sobre:		Paso Bajo:	
Cauce(río, barranco, arroyo)	(X)	Canal	()
canal	()	Autopista, Carretera o Camino	()
embalse	()	Observaciones:	
autopista, carretera o camino	()	Pasa sobre el cauce de la Quebrada la Iglesia.	

3. CARACTERISTICAS

Longitud del Puente (mts): 261,65 Ancho Promedio del Puente (mts) 25

Número de Vanos: 8 Longitud por Vanos (mts) 31,825-33-33-33-33-33-31,825

Importancia del Puente: Esencial (X) No Esencial ()

Clasificación: Regular (X) Irregular ()

Tipología Predominante: Viga y Losa.

4. REFERENCIAS

Año Proyecto de Construcción: 1969

Año Proyecto de Reparación: 1993

Año Proyecto de Acondicionamiento Sísmico: 1993

Tipo de Acondicionamiento Sísmico: Se reforzaron las pilas, debido a la ampliacion del puente

Documentación Existente. Si

Memorias (X) U54 I-00260 memorias de la ampliación AMB

Planos (X) P-00824 - P-00834 AMB

Registro Fotográfico () _____

Figura 2. Datos Generales del formulario del Viaducto García Cadena.

Con la información recopilada de los 63 puentes del área metropolitana de Bucaramanga se construyó una base de datos georeferenciada y alfanumérica mediante la aplicación de sistemas de información geográfica [24]. La base de datos permite consultar la ubicación de los puentes,

sus características estructurales (están incluidos planos esquemáticos de cada puente) y demás características. En la Figura 3 se presenta una ventana donde se muestra parte de la información de los puentes de la base de datos.

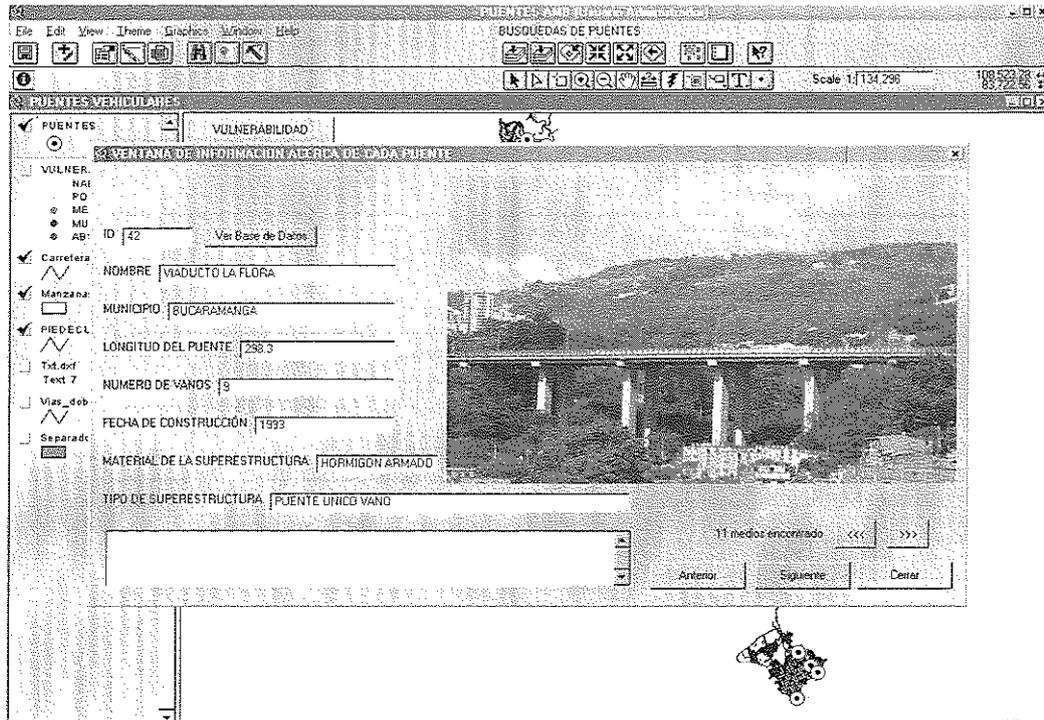


Figura 3. Ventana en la que se muestra la información del puente.

Tabla 1. Muestra de puentes.

Puente	# Vanos	L_{\max} vano (m)	Tipo Superestructura	Tipo Pila
1	4	12	Viga Losa	Pórtico – 3 columnas
2	3	21.3	Viga Losa	Pórtico – 3 columnas
3	6	23.5	Viga Losa	Martillo
4	6	30	Sección Cajón	Aislada
5	3	30	Sección Cajón	Aislada
6	3	23.8	Viga Losa	Pórtico – 3 columnas
7	2	20.6	Viga Losa	Pórtico – 2 columnas
8	9	39	Vigas Preforzadas	Pórtico – 2 columnas
9	8	34.2	Vigas Preforzadas	Pórtico – 2 columnas
10	4	30	Sección Cajón	Aislada

SELECIÓN DE LA MUESTRA DE PUENTES

De los sesenta y tres, se seleccionaron diez como los más representativos de los puentes de varios vanos (Ver Tabla 1). Los puentes seleccionados corresponden a estructuras de hormigón tanto reforzado como preesforzado, con

diferente número de luces que van desde 2 hasta incluso 9; con longitud de vano desde 12 hasta 39 metros de longitud, con superestructura en vigas losa y vigas cajón. En cuanto a la forma de la superestructura predomina la recta, pero existen dentro de la muestra puentes curvos

como el número 5 y el 10, uno sesgado, el puente numero 6. En lo referente al tipo de pila, las hay de todas clases, desde la formada por varias columnas configurando un pórtico hasta la pila consistente en una única columna. Con secciones transversales de pila desde circulares, hasta de sección tipo cajón. Las alturas de las pilas también varían significativamente, incluso dentro del mismo puente como en el caso de las estructuras número 8 y 9.

CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO

Cálculo del índice de vulnerabilidad de la muestra de puentes

El índice de vulnerabilidad sísmica fue calculado para cada uno de los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga, siguiendo los lineamientos del modelo propuesto. A su vez, para poder construir las funciones de vulnerabilidad fue necesario que la muestra se ampliara para cubrir más rangos del índice de vulnerabilidad, para lo cual se simularon dos grupos de puentes hipotéticos, cada uno de 10 puentes, en los cuales un grupo contaba con mejores condiciones sismorresistentes que los reales y el otro simulaba puentes de mayor vulnerabilidad.

A la muestra de puentes reales y simulados se les calculó el índice de vulnerabilidad utilizando el programa INDICE, la cual se presenta en la Tabla 2.

Cálculo del índice de daño en la muestra de puentes

Definida la muestra de puentes como la aceleración que representa la acción sísmica para cada uno de los escenarios sísmicos seleccionados, el siguiente paso fue evaluar el daño mediante el modelo de Park y Ang por medio de la herramienta computacional IDARC-2D [5].

Para la evaluación del daño mediante esta herramienta se modeló solamente la infraestructura, asumiendo a su vez, que esta era la parte más resistente a la acción del sismo [25].

Varios autores trabajan con este concepto; por ejemplo Ciampoli [26] dentro de sus estudios para evaluar las diferentes técnicas de refuerzo de puentes de hormigón considera que las pilas son los elementos más susceptibles de sufrir daño.

Los resultados obtenidos de los índices de daño alcanzados por los puentes cuando son sometidos al sismo de Helena, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Índices de vulnerabilidad sísmica para la muestra de puentes del Área Metropolitana de Bucaramang

	Nombre	Índice de Vulnerabilidad IV
HIPOTÉTICO #1	1	6,6
	2	5,9
	3	5,9
	4	6,3
	5	6,3
	6	6,4
	7	6,3
	8	6,1
	9	5,9
	10	5,9
REALES	1	5,6
	2	4,1
	3	4,1
	4	4,4
	5	4,4
	6	4,4
	7	3,8
	8	3,5
	9	4,6
	10	4,8
HIPOTÉTICO #2	1	3,3
	2	2,7
	3	2,7
	4	3,2
	5	3,2
	6	3,7
	7	2,7
	8	2,3
	9	2,7
	10	2,8

Este mismo procedimiento fue realizado para todos los acelerogramas escalados de 0.15g a 0.4g.

Funciones de vulnerabilidad obtenidas

A partir de la relación entre el nivel de daño de cada puente de la muestra y su índice de vulnerabilidad se pudieron obtener las siguientes regresiones:

Las regresiones obtenidas para cada uno de los valores de aceleración pico efectiva, se muestran en la figura 4 y se detallan en la tabla 4.

Determinación de las matrices de probabilidad de daño

Para la determinación de las matrices de probabilidad de daño se utilizaron los estados de daño definidos para el índice de Park y Ang. Las matrices pueden leerse de la

Tabla 3. Índices de daño de la muestra de Puentes (Sismo de Helena).

	PUENTE	LV	0.15g	0.20g	0.25g	0.30g	0.35g	0.4g
HIPOTETICO #1	1	6.60	0.00	0.16	0.18	0.21	0.23	0.24
	2	5.90	0.00	0.09	0.16	0.17	0.24	1.00
	3	5.90	0.21	0.45	0.63	1.00	1.02	1.07
	4	6.30	0.17	0.20	0.23	0.27	0.29	0.31
	5	6.30	0.17	0.20	0.23	0.27	0.29	0.31
	6	6.40	0.16	0.18	0.27	0.99	1.03	1.05
	7	6.30	0.03	0.04	0.18	0.22	0.26	0.29
	8	6.10	0.16	0.17	0.17	0.21	0.23	0.29
	9	5.90	0.06	0.07	0.08	0.10	0.13	1.00
	10	5.90	0.02	0.02	0.03	0.03	0.08	0.14
REALES	1	5.60	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
	2	3.80	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
	3	4.00	0.19	0.41	0.43	0.61	1.00	1.05
	4	4.40	0.15	0.21	0.26	0.32	0.38	0.43
	5	4.40	0.15	0.21	0.26	0.32	0.38	0.43
	6	4.40	0.14	0.16	0.25	0.97	1.00	1.04
	7	4.10	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
	8	4.40	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
	9	4.40	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06
	10	4.80	0.00	0.02	0.02	0.02	0.04	0.06
HIPOTETICO #2	1	3.30	0.00	0.01	0.02	0.27	0.31	0.34
	2	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
	3	2.70	0.10	0.23	0.51	0.82	0.92	
	4	3.20	0.18	0.23	0.32	0.34	0.36	0.40
	5	3.20	0.18	0.23	0.32	0.34	0.36	0.40
	6	3.70	0.14	0.15	0.21	0.26	0.31	0.36
	7	2.70	0.00	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05
	8	2.30	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06
	9	2.70	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04
	10	2.80	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05

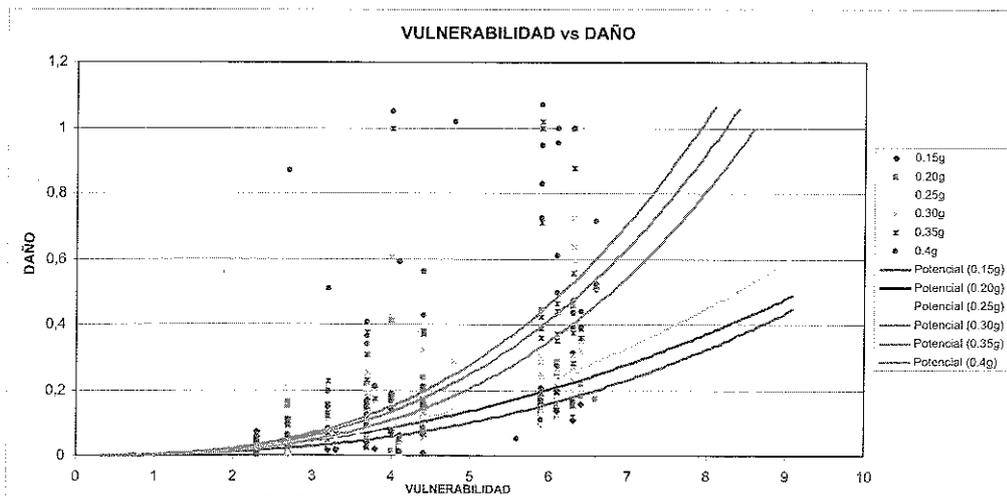


Figura 4. Funciones de vulnerabilidad para distintos valores aceleración pico efectiva.

Tabla 4. Funciones de vulnerabilidad calculadas

Aceleración pico efectiva	Función de vulnerabilidad
0.15g	$ID = 0.00181 * IV^{2.49397}$
0.20g	$ID = 0.00438 * IV^{2.13610}$
0.25g	$ID = 0.00369 * IV^{2.30960}$
0.3g	$ID = 0.00188 * IV^{2.91667}$
0.35g	$ID = 0.00280 * IV^{2.78842}$
0.4g	$ID = 0.0315 * IV^{2.78446}$

siguiente forma: el valor consignado en cada celda intersectando un valor de aceleración pico efectiva con un estado de daño determinado corresponde a la probabilidad de que un puente alcance ese nivel de daño dado que ocurra el sismo. Así por ejemplo, la probabilidad que un puente de la ciudad alcance un estado de daño moderado si ocurre un sismo de 0.4g es de 0.063 (Ver Tabla 5). Las matrices de daño son mostradas a continuación.

DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE DAÑO SÍSMICO

La construcción de los escenarios sísmicos se realizaron con base en las funciones de vulnerabilidad anteriormente construidas, para los valores de aclaración de 0.15g a 0.4g, para ello fue necesario calcular el IV (Índice de Vulnerabilidad) a toda la muestra de los 63 puentes, ver Figura 5. Los resultados de daño obtenidos anteriormente son mostrados en forma de escenarios de daño, los cuales presentan la distribución y nivel de daño que sufren los puentes de la ciudad bajo un nivel de aceleración pico efectiva (A_g) dado. Estos escenarios fueron construidos para valores que van desde 0.15g a 0.4g cada 0.05g. En la Figura 6 se muestran el escenario de daño para una aceleración de 0.25 g.

CONCLUSIONES

1. La metodología propuesta para la construcción de las funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico es una herramienta que permite prever el comportamiento de los puentes carreterables de hormigón armado ante la ocurrencia de un sismo. Esta se basa en la utilización de un índice de vulnerabilidad propuesto por Maldonado [1] [2] y de un índice de daño planteado por Park y Ang [3] [4]. De esta manera, el modelo propuesto se basa tanto en opinión de expertos como en datos analíticos.

2. La posibilidad de utilizar datos reales o experimentales fue descartada para la construcción de las funciones de vulnerabilidad y las matrices de probabilidad de daño, dada la ausencia de datos reales de daños sobre puentes en el país y debida a la insuficiente información experimental que se puede obtener de estas estructuras viales en el medio nacional.
3. En la evaluación del daño de los puentes se propone utilizar el modelo propuesto por Park y Ang asumiendo que la pila será el elemento que mayormente soporta la acción sísmica. Esta consideración es planteada igualmente por Mullen y Cakmak [12] y con Ciampoli [26] en sus estudios de daño y de refuerzo estructural de los puentes respectivamente. Sin embargo, se recomienda incorporar los elementos estructurales del puente en el modelo de análisis de daño y para ello se sugiere utilizar la versión de IDARC-BRIDGE [27].
4. Para la construcción de la funciones de vulnerabilidad se propone representar la acción sísmica mediante la aceleración pico del terreno, para ello se requiere acelerogramas que permitan evaluar el daño mediante el modelo de Park y Ang [3] [4]. Algunos modelos como los propuestos por Vaz y Bairrao [6], Miranda [7] [8], Basöz y Kiremidjian [28] [29] [30] y Shinozuka [13] hacen la misma consideración.
5. En la determinación del índice de vulnerabilidad se propone utilizar el programa INDICE, el cual requiere información correspondiente al año de diseño y construcción del puente, tipo de superestructura, forma de la superestructura, existencia de articulaciones internas, tipo de pila, tipo de cimentación, tipo de estribo, tipo de aparato de apoyo, material de la superestructura, material de la subestructura, longitud de apoyo en pilas y en estribos, estado de conservación del puente, irregularidad longitudinal en geometría o rigidez del puente, tipo de suelo en la ubicación del puente, transporte de otras líneas vitales, efecto de licuefacción y, sistema constructivo de la superestructura y la subestructura. Gran parte de esta información se obtiene de un levantamiento en campo y se complementa con la obtenida de informes técnicos de puente. Para el caso de aplicación de la metodología se inventariaron los 63 puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga y con ellos de elaboro una base de datos, la cual fue incorporada a un Sistema de Información Geográfica, para facilitar su consulta. Se espera que esta base sea actualizada en la medida que las estructuras existentes sean modificadas o se construyan nuevas.

Tabla 5. Matriz de probabilidad de daño para los puentes de Área Metropolitana de Bucaramanga.

Estado de daño	Aceleración Pico Efectiva					
	0,15g	0,20g	0,25g	0,30g	0,35g	0,40g
Simple	0,968	0,810	0,746	0,619	0,413	0,333
Ligero	0,032	0,190	0,254	0,365	0,556	0,603
Moderado	0,000	0,000	0,000	0,016	0,032	0,063
Severo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Colapso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

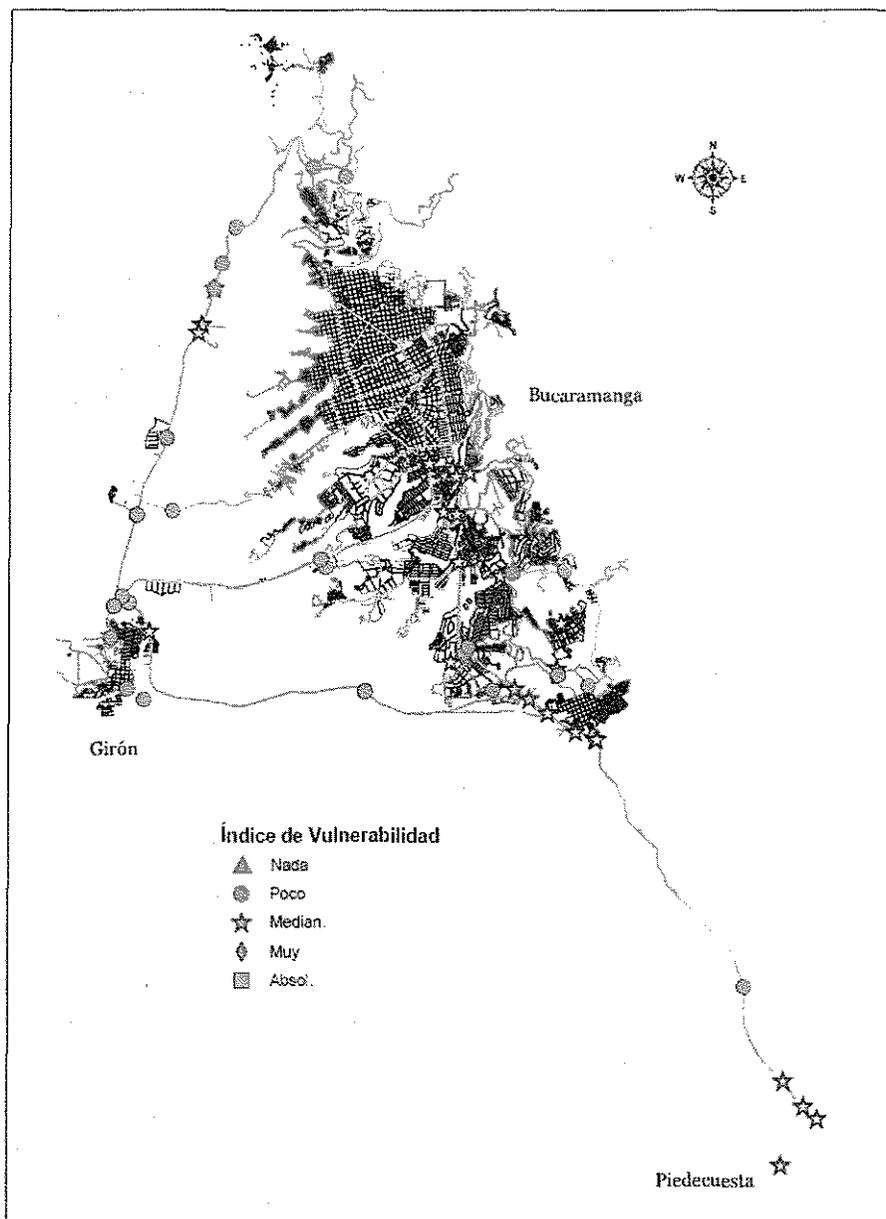


Figura 5. Índices de vulnerabilidad sísmica para los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga.

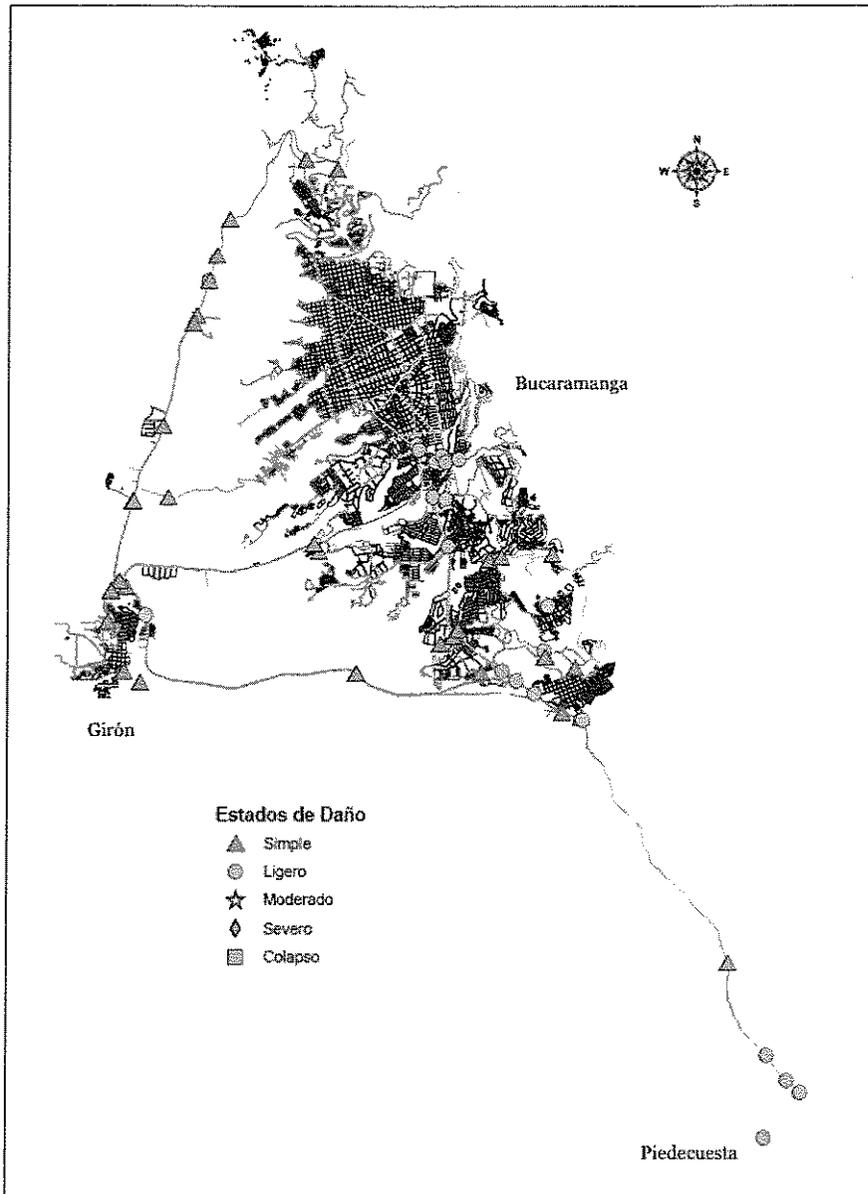


Figura 6. Escenario de daño para la aceleración pico efectiva máxima a ocurrir en Bucaramanga ($A_m=0.25g$).

6. Las funciones de vulnerabilidad sísmica y las matrices de probabilidad de daño fueron construidas para Bucaramanga con una muestra de 30 puentes, 10 correspondientes a estructuras reales y las restantes simuladas. Sin embargo, analizando los resultados, se recomienda la utilización de una muestra mayor.
7. El objetivo de la investigación es proponer una metodología para la construcción de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño,

luego las construidas para Bucaramanga, deben ser replanteadas, dado que ellas deben ser tomadas como un ejemplo de la metodología propuesta para su construcción.

8. De igual manera los escenarios de daño elaborados para el Área Metropolitana de Bucaramanga, son indicativos y con ellos se pretende mostrar la aplicación de las funciones de vulnerabilidad y de las matrices de probabilidad de daño.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maldonado E. (2000). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [2] Maldonado E. (2002). "Aplicación de los conjuntos difusos en la evolución de los parámetros de la vulnerabilidad sísmica de puentes", Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 18, No. 2, pp. 209-226.
- [3] Park, Y. J., y Ang, A. H-S., (1985) (a). "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp 722-739.
- [4] Park, Y. J., Ang, A. H-S., y Wen, Y. K., (1985) (b). "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp 740-757.
- [5] Park, A. Reinhorn, S. Kunnath, N. (1988). "Modeling of R/C building structures with flexible floor diaphragms (IDARC-2D)", Technical Report NCEER-88-0035, Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [6] Vaz, C.T y Bairao, R. (1996). "Quantification of Behavior Coefficients for Curved RC Bridge". Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 11 WCEE, México, 1557.
- [7] Miranda, E. (1993) "Evaluation of seismic design criteria for highway bridges". Earthquake Spectral, Vol. 9, No. 2, pp. 233-250.
- [8] Miranda, E. (1996). "Assessment of the Seismic Vulnerability of Existing Buildings". Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 11 WCEE, México, 513.
- [9] ATC-13 (1985). Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, California.
- [10] ATC-25 (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Applied Technology Council, California.
- [11] Xueshen, J. y Shuming, F. (1995). "The Definition of Vulnerability Matrixes for Transportation Systems", Proceeding on the Fifth International Conference on Seismic Zonation, pp. 101-108, Nice, Francia.
- [12] Mullen, C. L. y A. S. Cakmak (1997). "Seismic fragility of existing conventional reinforced concrete highway bridges". National Center for Earthquake Engineering Research. Technical Report NCEER-97-0017.
- [13] Shinozuka, M. (1998) "Development of bridge fragility curves". Proceedings of the U.S. -Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit. Multidisciplinary Center of Earthquake Engineering Research. Technical Report MCEER-98-0015, State University of New York at Buffalo.
- [14] Yépez, M.F. (1996). Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Estructuras Aplicando Técnicas de Simulación. Memoria de Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [15] Jiménez, J. (2002). Vulnerabilidad Sísmica de las Edificaciones de la Ciudad de Cuenca Mediante Técnicas de Simulación. Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [16] Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [17] Bonnet, R. (2003). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos En Zonas de Amenaza Alta y Moderada. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [18] Castillo, A. (2005). Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [19] Park, Y. A., Ang, Y. Wen, (1984). "Seismic Damage Analysis and Damage Limiting Design of R. C. buildings", Civil Engineering studies structural research series No. 516, University of Illinois at urbana - Champaign, Illinois, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp 740-757.
- [20] Park, Y. J., Ang, A. H-S., y Wen, Y. K., (1987). "Damage-Limiting Aseismic Design of Buldings", Earthquake spectra, Vol. 3 No. 1, pp 1-25.
- [21] Bahrenberg, M.E. y Rutch, D.A. (1988). "Evaluation of seismic design procedures for highway bridges", Journal of Structural Divisions, ASCE, 114, No. 7, 1588-1605.
- [22] Subdirección de Amenazas Geoambientales, INGEOMINAS (2001). Zonificación Sismogeotécnica

Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Bogota, Colombia.

[23] Idriss I. y Joseph I. Sun, (1992). SHAKE 91, Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California.

[24] Ortiz P y Rúguel M, (2001). Inventario de los Puentes Carretables del Área Metropolitana de Bucaramanga, Trabajo Final de Carrera, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

[25] Amado L y Martínez C, (2002). Estimación del Índice de Daño de los Puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga, Trabajo Final de Carrera, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

[26] Ciampoli, M. (1994). "Upgrading R/C bridges for seismic risk reduction", Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 2009-2214, Vienna, Austria.

[27] Reinhorn, A. M., Simeonov, V. K, Reichman Y, (1997). IDARC-BRIDGE. A Program for Three-Dimensional Nonlinear Inelastic Analysis of Bridge. State University of New York at Buffalo.

[28] Basöz, N. y A. Kiremidjian (1995). "Use of Geographic Information Systems for bridge prioritization", Proceeding of the 10th European Conference on Seismic Zonation, Vol. I, pp. 17-24, Nice, Francia.

[29] Basöz, N. y A. Kiremidjian, (1997). "Evaluation of bridge damage data from recent earthquakes", Bulletin NCEER, Vol. 11, No 2, pp. 1-7.

[30] Basöz, N. y A. Kiremidjian (1998). "Evaluation of bridge damage data from the Loma Prieta and Northridge, California Earthquakes", Multidisciplinary Centre of Earthquake Engineering Research. Technical Report MCEER-98-0004.