

**CONGRESO ESTRUCTURAS 2015 y XIII SEMINARIO DE INGENIERIA
ESTRUCTURAL Y SISMICA**

SAN JOSE, COSTA RICA 5 al 7, AGOSTO 2015

**ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES EN COSTA
RICA MEDIANTE EL USO DE CURVAS DE FRAGILIDAD**

Ing. Jorge Muñoz Barrantes

Costa Rica

email: jorge.munozbarrantes@ucr.ac.cr

Teléfono: 25114189

Unidad de Puentes, LANAMME-UCR

Ciudad de la investigación Universidad de Costa Rica

RESUMEN

Costa Rica es un país en donde la amenaza por sismo es de importancia. Por esto, es necesario identificar aquellos aspectos de daño y defectos estructurales adversos que incrementen el riesgo de colapso o pérdida de servicio de nuestros puentes en caso de sismo; más aún, cuando los puentes constituyen eslabones críticos para la atención de emergencias. Desde el punto de vista regional, la posibilidad de la evaluación del comportamiento estructural ante cargas por sismo en puentes se ha visto beneficiada por los avances en el desarrollo de las curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad describen la probabilidad de superar un nivel de daño predeterminado en función de la intensidad del evento. El uso de este modelo de confiabilidad condicional en el contexto de la evaluación del riesgo sísmico regional proporciona la posibilidad de detectar puentes sísmicamente vulnerables que deben ser cambiados o readecuados, estimar la magnitud de los daños y las pérdidas económicas, o dar soporte a las actividades de inspección post-sismo. En este artículo se detallan aspectos relativos a condiciones de vulnerabilidad sísmica en puentes y el procedimiento para la obtención de las curvas de fragilidad y vulnerabilidad. Finalmente, se muestra un ejemplo de aplicación del uso de curvas de fragilidad como un insumo para optimizar la inspección post-sísmica de puentes. La obtención de las curvas de fragilidad se realiza basándose en la categorización y metodología propuesta por la Federal Highway Administration de los Estados Unidos FHWA; en donde, para la aplicación de la metodología, una primera etapa consistió en la identificación de las tipologías estructurales de puentes y el mejoramiento del inventario. Se obtienen resultados de inventario mejorado para 582 puentes de la red vial nacional. Seguidamente, se definen los grupos de fragilidad y se pueden encontrar los parámetros para la construcción de curvas de fragilidad y curvas de vulnerabilidad. Se muestran gráficamente los resultados obtenidos para un ejercicio tomando en cuenta las zonas de amenaza sísmica descritas en los Lineamientos para el Diseño Sismorresistentes de Puentes LDSP del 2013 y se dan recomendaciones para el mejoramiento y adaptación de las curvas al entorno nacional.

INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un país sísmicamente activo, en el pasado sismos como el de Limón de 1991 y Samara 2012 han puesto en evidencia deficiencias de los puentes de la Red Vial Nacional. La distribución del daño observado en puentes no solo depende de las intensidades experimentadas, sino también de las características de la estructura y su entorno. Un ejemplo son los colapsos de los puentes sobre el Río Chirripó (en 1991) y el Río Sarapiquí (en 2012), ubicados a 45 km y 200 km respectivamente del epicentro (*figura 1*). Las curvas de fragilidad son herramientas efectivas para caracterizar la respuesta sísmica de puentes, sean grupos estructurales o una estructura particular. Este trabajo discute los aspectos de vulnerabilidad en puentes, se explican y construyen las curvas de fragilidad y se muestra un ejercicio de aplicación de la herramienta en puentes a escala nacional.



Figura 1.- a) Colapso de tramo del puente sobre el Río Chirripó, terremoto de Limón 1991 ([LANAMME-UCR 1991](#)), b) colapso total puente sobre el Río Sarapiquí, terremoto de Samara 2012 ([EP 2012](#))

FACTORES QUE FAVORECEN UN POBRE DESEMPEÑO SÍSMICO

Los factores de daño o defectos que afectan negativamente el desempeño sísmico en puentes son muchos y de origen variado. Entre los defectos, se encuentran aquellos relacionados con puentes con deficiencias debido al uso de procedimientos de diseño previos a la entrada en vigencia de las normativas sismorresistentes. Aquí, posiblemente una de las características más importantes es una insuficiente longitud de apoyo de la superestructura sobre las pilas o bastiones. Otros aspectos relacionados al diseño o la construcción del puente son la ausencia de topes sísmicos (llaves de corte) y para columnas en las pilas (en particular para pilas sin viga cabezal), los códigos de diseño no aportaban el necesario refuerzo por cortante o insuficientes longitudes de traslape.

Tradicionalmente en Costa Rica, se ha utilizado la normativa de la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASTHO, por lo que en la [tabla 1](#) se detalla la evolución de la norma en lo concerniente al diseño sísmico ([ODOT, 2009](#)). La [figura 2](#) presenta la distribución por fecha de la especificación para diseño de los puentes inventariados en este estudio. Allí se evidencia que en nuestro país muchos puentes fueron construidos sin una regulación apropiada para las demandas sísmicas actuales por lo podrían requerir de una readecuación estructural.

Los puentes pueden presentar también daños varios relacionados con su condición de servicio, sobrecargas, impactos vehiculares, factores ambientales, etc. Desde el punto de vista sísmico, estos daños son de importancia cuando se reduce la resistencia y rigidez de elementos estructurales importantes del puente aumentando su fragilidad. Un daño común en puentes se da en los apoyos, estos suelen presentar problemas que reducen su efectividad para transmitir las cargas y para cumplir las demandas de desplazamiento/rotaciones de diseño. Otro daño importante se da cuando existe socavación en los cimientos, esta condición modifica la respuesta de la estructura promoviendo por ejemplo la generación de rotulas plásticas en pilotes que por su ubicación son de difícil y costosa reparación. Además, la socavación podría incrementar la magnitud de los desplazamientos laterales aumentando el riesgo a colapso de la superestructura.

Tabla 1. Cambios en aspectos sísmicos de la AASHTO y la estimación de la amenaza sísmica en Costa Rica

Año	Normativa AASHTO (ODOT, 2009)	Estimación amenaza sísmica en Costa Rica
Antes 1958	No son consideradas cargas por sismo	-
1958-1974	Carga de sismo entre el 2-6% del peso propio	-
1971	Terremoto de San Fernando, California USA	
1974		Primer código sísmico de Costa Rica 1974
1975-1990	Cargas de sismo entre el 8-12% del peso propio	
1986		CSCR 1986 (PR de 50, 100, 500 y 1000 años)
1989	Terremoto de Loma Prieta, California USA	
1990	Implementación norma estándar de la AASHTO 1983 para el diseño sismorresistente de puentes	
2002		CSCR 2002 (A_{eff} con PR de 500 años)
2004	Se incluye diseño por licuefacción	
2010		CSCR 2010 (A_{eff} con PR de 500 años)
2013		Lineamientos para el diseño sismo-resistente de puentes 2013 (PR de 500, 1000, 2500 años).

Para el caso específico de deterioro relacionado a sismos anteriores, la magnitud de los daños esperados depende de la intensidad sísmica a la que estuvo sujeto el puente, a las normas sismorresistente de la época en la cual fueron diseñados y la tipología del puente. Un puente que presenta daños importantes relacionados a eventos anteriores es más riesgoso ya que el efecto de un nuevo sismo sobre el puente sería más severo debido a que la estructura ha agotado parte de su capacidad de disipar de energía. Típicamente los efectos luego de un sismo se evidencian comúnmente en agrietamiento, corrimientos y rotaciones en los componentes de la subestructura (columnas, apoyos, llaves de corte y cimientos), y desplazamientos de los componentes de la superestructura (evidentes en las juntas de expansión). Los desplazamientos residuales son evidentes también luego de una inspección de los apoyos del puente.

Los efectos adversos observados luego de sismo en las estructuras de puentes, evidencian los puntos principales donde de existir deterioro o defectos constructivos los puentes verían reducida en mayor cuantía su capacidad original de resistir las cargas por sismo. La fragilidad estructural de los puentes dañados debería modificarse según su estado de deterioro ya que el deterioro inicial podría llevar a una reducción de su capacidad de diseño original inclusive superior al 50% (Banerjee y Chi, 2013); esto por el momento queda fuera del alcance de este estudio y la evaluación se realiza basándose en las deficiencias asociadas a los códigos de diseño y a las características estructurales de cada tipo de puente.

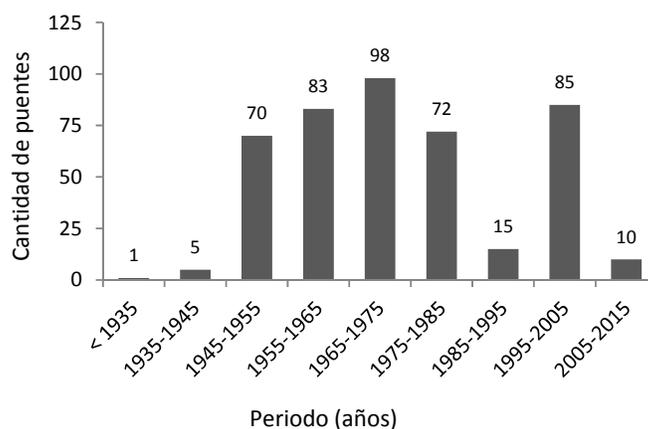


Figura 2.- Año de normativa AASHTO de diseño para puentes en Costa Rica

FRAGILIDAD SISMICA DE PUENTES

La evaluación del comportamiento estructural de puentes se ha visto beneficiada por los avances en el desarrollo de las curvas de fragilidad, en particular para un enfoque regional donde es necesario evaluar decenas o cientos de estructuras (Ghosh y Padgett, 2010, Basoz y Mander, 1999, Shinozuka, 2000). Un análisis de fragilidad sísmica representa la probabilidad de superar un límite de daño bajo un determinado movimiento sísmico (Shinozuka et al, 2000). Estos, toman en cuenta la incertidumbre asociada a la capacidad estructural, los límites de daño y la intensidad sísmica. El uso de este modelo de confiabilidad condicional en el contexto de la evaluación del riesgo sísmico proporciona la posibilidad de detectar puentes vulnerables para ser cambiados o readecuados, estimar daños y pérdidas económicas, o dar soporte a las actividades de inspección post-sismo (Ghosh y Padgett, 2010). Para la priorización de atención de estructuras de puentes, la Federal Highway Administration de los Estados Unidos FHWA, presenta el uso de curvas de fragilidad como una opción para evaluar y priorizar labores de rehabilitación de puentes. En Costa Rica, se han seguido las pautas estadounidenses para el diseño de puentes por lo que el uso de los criterios de la FHWA es apropiado para nuestro entorno como lo señala los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica LDSP (CFIA, 2013).

Curva de fragilidad estructural y grados de daño

Una curva de fragilidad describe la probabilidad condicional de excedencia de un límite de performance requerido ($P_f/Daño$) en función de algún parámetro que describa la intensidad sísmica, típicamente la aceleración pico efectiva PGA o la aceleración espectral S_{pa} (Pinto et al, 2004). Una de las ventajas del uso de curvas de fragilidad es que estas no están limitadas a describir el posible comportamiento de la estructura para un escenario sísmico determinado, sino que captura el comportamiento en un rango de intensidades, pudiendo describir el comportamiento estructural ante intensidades incrementales (Padgett, 2008). Las curvas se pueden obtener mediante un análisis estadístico de daño, de forma empírica, basándose en pruebas de laboratorio o más comúnmente de forma analítica. Las curvas de fragilidad analíticas se elaboran a partir de las funciones de demanda sísmica y capacidad estructural observa en la figura 3a; donde la curva de capacidad, obtenida comúnmente mediante el método del *pushover*, es superpuesta en un espectro de aceleración-desplazamiento. En un análisis determinístico, la intersección entre las dos curvas corresponde al llamado punto de desempeño. Si se asignan distribuciones probabilísticas a ambas curvas, lo que describe la incertidumbre relacionada al problema, es evidente que existe un amplio rango de salidas de respuesta, en otras palabras no hay un solo punto de performance sino una probabilidad asociada a un desempeño. Si la capacidad estructural y la demanda sísmica son variables aleatorias que corresponden aproximadamente a distribuciones normales o log-normales, se puede utilizar el *teorema del límite central* para demostrar que el performance conjunto muestra un comportamiento con distribución log-normal. En las curvas de fragilidad, esta distribución probabilista se muestra mediante el uso de funciones de distribución log-normal acumulada (ver figura 3b). Esta función de densidad acumulativa se puede aproximar mediante la ecuación 1 (FHWA, 2006).

$$P[D > DS_i | S_a] = \frac{1}{1 + \left(\frac{S_a}{A_i}\right)^{\frac{-1,7}{\beta_c}}} \quad \text{Ecuación 1. -}$$

en donde $P[D > DS_i | S_a]$ es la probabilidad de sufrir un daño D que es igual o mayor que DS_i para una aceleración espectral S_a para un periodo $T = 1,0$ segundos y DS_i corresponde a un estado de daño específico. Tanto A_i como β_c son los dos parámetros que definen la forma de la curva, en donde A_i corresponde a la media del daño (50% de daño) y β_c la desviación logarítmica normalizada que incorpora aspectos de incertidumbre y aleatoriedad tanto de la capacidad estructural como la demanda sísmica. A_i corresponde al punto de performance en la figura 3. Un valor de $\beta_c = 0,6$ es recomendado para describir la dispersión en puentes por varios autores (Basoz y Mander, 1999).

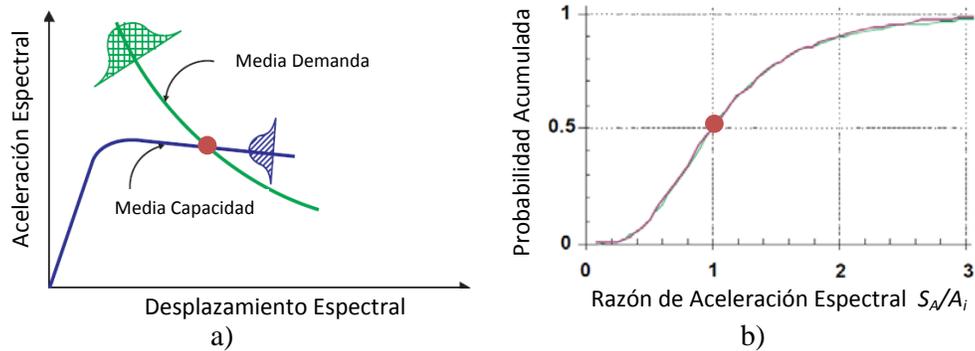


Figura 3.- Espectro de capacidad-demanda aceleración-desplazamiento y curva de fragilidad normalizada (distribución lognormal con $\beta_c = 0,6$) (FHWA, 2006)

Una vez explicado el procedimiento para construir una curva de fragilidad, es necesario ahora describir los estados de daños para los cuales estas curvas se podrían construir. Es de señalar que los estados de daño no solo detallan el grado de daño estructural sino que también las consecuencias de llegar a determinado nivel de daño. Tomando en cuenta esto, se debe conceptualizar una matriz de desempeño para conocer cuál es el daño estructural aceptable que podría darse en el puente para diversa exigencias por sismo. Las curvas de fragilidad describen también los límites entre los distintos estados de daño, esto quiere decir que el valor promedio del estado constituye un disparador de un grado de deterioro y se asume que este nivel se mantiene hasta que se dé el siguiente estado de daño (FEMA, 2003). Gráficamente, lo descrito anteriormente se resume en la figura 4b. En la figura se observa que las curvas de fragilidad funcionan como límites entre los daños: ligero, moderado, severo y completo. En la figura 4a, los grados de daño se muestran esquemáticamente mediante los efectos de la aplicación incremental de una carga lateral, esta técnica es comúnmente llamada de *pushover*. Para puentes, la generación de las curvas de fragilidad analíticas se puede realizar siguiendo los pasos descritos por Choi et al. (2004).

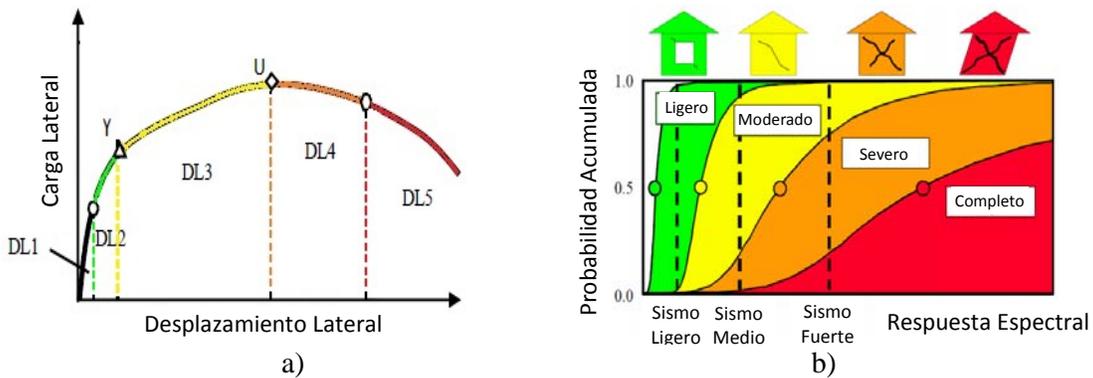


Figura 4.- Curva de capacidad del puente y niveles de daños según su desplazamiento lateral curvas de fragilidad para distintos grados de daño (FEMA, 2003)

Curva de vulnerabilidad

La fragilidad estructural es utilizada comúnmente para determinar la vulnerabilidad sísmica. La vulnerabilidad en estructuras de puentes no es un término cuyo alcance este claramente definido y varía según el autor y la aplicación. En muchos casos, el termino vulnerabilidad se describe mediante el grado de pérdida del elemento asociado a una escala del 0 al 100 % (Varnes, 1984). Dentro de un enfoque más amplio, la vulnerabilidad también toma en cuenta factores de exposición como los tipos de suelo, topografía, etc. Una curva de vulnerabilidad se puede construir a partir de rangos de las posibles pérdidas estimadas (tabla 2) para cada tipo de daño mediante el cálculo del factor de daño medio *FDM* y la intensidad sísmica asociada (figura 5).

Tabla 2.- Niveles de daño y sus consecuencias de desempeño (Mander, 1999)

Grado de Daño	Estado Post-sismo	Reparación requerida	Tiempo de restauración	% Pérdidas (FHWA, 2006)
1	Ninguno	Normal	Ninguna	0
2	Ligero	Inspección, ajustes, parcheo	< 3 días	1 al 3
3	Moderado	Reparar componentes dañados	< 3 semanas	2 al 15
4	Severo	Cambiar o reconstruir componentes dañados	< 3 meses	10 al 40
5	Completo/Colapso	Reconstruir la estructura	> 3 meses	10 al 100

Las curvas de vulnerabilidad son útiles para estimar pérdidas económicas directas, comparar vulnerabilidades en diversos tipos de puentes y la estimación del riesgo sísmico. La utilización de las curvas de fragilidad de forma directa mediante un estado de daño, y no un porcentaje de pérdidas, es más adecuada para visualizar las consecuencias desde un punto de vista operacional, haciendo una mejor estimación por ejemplo de las reparaciones requeridas y de cuando tardan las mismas en realizarse (tabla 2). Este enfoque es apropiado para el cálculo de pérdidas indirectas, la toma de decisiones según la importancia del puente y para un análisis detallado del riesgo sísmico.

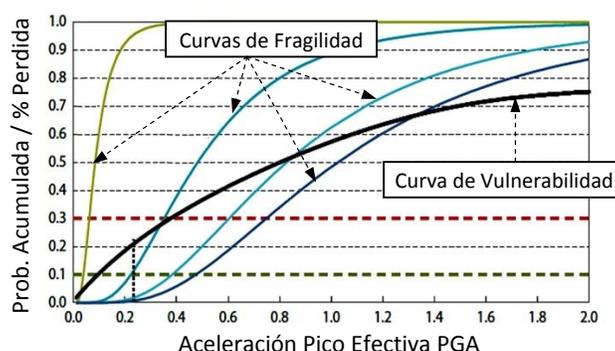


Figura 5.- Ejemplo de curva de vulnerabilidad calculada basada en las curvas de fragilidad

APLICACIÓN: INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS DE PUENTES POST-SISMO

Una de las formas más eficaces para priorizar la inspección de puentes luego de un sismo es realizándola primero en aquellos puentes considerados riesgosos y cuyas consecuencias de fallo sean mayores, estos puentes pueden ser detectados mediante el uso de curvas de fragilidad. En la práctica usual, las inspecciones post-sismo se realizan en función de la proximidad de los puentes al epicentro, la magnitud y los reportes de daño observados en campo (Malone et al, 2005). Este proceso lleva a largos periodos de tiempo para ubicar los puentes dañados ya que se ha comprobado por múltiples estudios que el daño en puentes correlaciona de forma limitada tanto con la distancia epicentral como con la magnitud del evento (Ranf et al, 2007).

En años recientes, la densificación de la red de acelerógrafos en Costa Rica permite estimar los valores de intensidad sísmica a los que fueron sujetos los puentes en caso de sismo. Si la intensidad sísmica se obtiene adecuadamente en la ubicación del puente, el éxito del uso de las curvas de fragilidad depende principalmente de que tan bien describan estas el comportamiento estructural del puente y su entorno. La utilización de estas curvas puede llevar a identificar de una forma rápida los puentes dañados mejorando los tiempo de respuesta a la emergencia (Ranf et al, 2007). En particular para puentes donde los daños no sean tan evidentes, como daño moderado, el uso de las curvas para priorizar las labores de inspección reduce de forma significativa la cantidad de puentes a inspeccionar, produciendo un ahorro significativo de recursos a la administración, garantiza la seguridad de los usuarios y provee información para una intervención oportuna antes que los daños se profundicen por acciones ambientales, de uso u otro evento periódico.

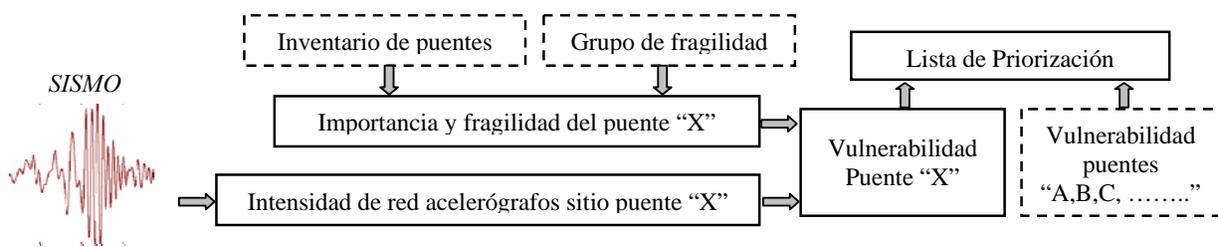


Figura 6.- Diagrama propuesto para la generación del listado de priorización de inspección post-sismo

La inspección de puentes luego de un sismo se puede optimizar siguiendo el esquema de la [figura 6](#). Dentro del esquema, la intensidad sísmica se obtiene de las redes sismológicas nacionales a pocos minutos del evento. La importancia y fragilidad del puente deben ser estimadas previamente al evento basándose en los criterios de clasificación por importancia del LDSP y las fragilidades calculadas en el siguiente apartado. Con base a estos insumos, se calcula la curva de vulnerabilidad del puente o se estima el posible estado de daño para el puente; este proceso se repite para todos los puentes en la región. En Costa Rica para la implementación de un protocolo de inspección efectivo, el análisis de fragilidad debe realizarse a escala país dado que un sismo fuerte afecta todo el territorio y las fuentes sísmicas son muchas. Finalmente, se realiza una lista de inspección según la importancia/urgencia de evaluar el puente por parte de la administración o la comisión nacional de emergencias CNE y se despachan los equipos de inspección a las zonas afectadas.

Inventario y grupos de fragilidad

En Costa Rica, se han manejado tradicionalmente los códigos de diseño estadounidenses para la construcción y diseño de puentes. Por ello, se utiliza en este estudio los grupos y parámetros de fragilidad estructural recomendados por entidades como la FEMA (2003), la FHWA (2006) y la MCEER (2007). Para una caracterización de la fragilidad sísmica de los puentes, es necesario obtener información sobre atributos básicos del puente. Los atributos de mayor importancia son señalados en la [tabla 3](#), en donde la clasificación por importancia se realiza siguiendo los criterios de los Lineamientos de Diseño Sismorresistentes de Puentes LDSP (CFIA, 2013).

Con el objetivo de aplicar efectivamente el procedimiento descrito en la [figura 6](#), es necesario obtener información de los puentes a escala nacional. En nuestro país, la información sobre puentes existentes en la red nacional y cantonal es muy limitada. Mucha de esta información no incluye características relevantes como el estado de conservación del puente. El énfasis para la construcción de un inventario en este trabajo se centra en las características necesarias para el aseguramiento de la integridad estructural del puente ante sismo según los atributos de la [tabla 3](#). La información incluida se obtuvo de la base de datos de planos digitalizados de puentes, los informes del LANAMME-UCR, los datos aprobados hasta Junio del 2015 en el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes SAEP y el listado de puentes de la oficina de planificación del MOPT (recopilada entre Octubre-2007 y Junio-2014) de donde se obtiene que la red vial nacional consta de aproximadamente 1440 puentes. Algunos de los datos de puentes del listado del MOPT fueron filtrados ya que son alcantarillas, puentes proyectados o pasos a desnivel. Además, en este estudio se hace énfasis inicialmente solo en puentes sobre cuerpos de agua.

Tabla 3.- Atributos relacionados aspectos relacionados a la amenaza sísmica e fragilidad

Atributo (Amenaza)	Atributo (Vulnerabilidad Estructural)
1) Coordinadas geográficas	1) Normativa de diseño
2) Tipo de suelo (S1, S2, S3, S4)	2) Importancia (TPD y criterios LDSP)
3) Zona Sísmica (Z-II, Z-III y Z-IV)	3) Sesgo, largo total y ancho total del puente
4) Aceleraciones espectrales (S_{pa} para $T=0,2$ y $T=1,0$) y pico (PGA) (son obtenidas de red de acelerógrafos luego de un sismo)	4) Tipología estructural
	5) Número de tramos
	6) Longitud del claro máximo

En este trabajo se caracterizan los puentes según los parámetros que establece la National Bridge Inventory NBI de Estados Unidos. Para la información recopilada y siguiendo la terminología utilizada por la NBI, se encontraron en Costa Rica 13 tipologías distintas según sus características estructurales. Estos tipos se detallan en la [tabla 4](#) para los 582 puentes inventariados. En esta tabla también se incluye la condición de los apoyos, aspecto de importancia para determinar la vulnerabilidad sísmica de los puentes. En la tabla, se hace distinción además entre puentes de concreto pre-esforzado o postensado (PC), acero (A) y concreto reforzado (RC). Los aspectos particulares de cada estructura importantes para una caracterización sísmica por curvas de fragilidad de acuerdo con lo descrito por la FHWA se resumen en la [tabla 5](#), para cada grupo y grado de daño la FHWA sugiere valores de a_i . En la [tabla 5](#), los códigos de las clases NBI se elaboran a partir del material (primer dígito) y la tipología (segundo y tercer dígito ([tabla 4](#))).

Tabla 4.- Puentes inventariados según su tipo estructural, material y la condición de apoyos

Tipología estructural según la NBI		Simplemente apoyados						Múltiples claros (incluida junta tipo Gerber)			Total de puentes
		Claro simple			Múltiples claros						
		1 RC	3 A	5 PC	1 RC	3 A	5 PC	2 RC	4 A	6 PC	
01	Losa	6	-	-	7	-	-	5	-	-	18
02	Viga múltiple	17	62	90	10	29	76	12	19	6	323
03	Pony/Bailey	-	78	-	-	16	-	-	-	-	94
04	Viga Te	8	-	11	2	-	-	1	-	5	28
05	Cajón múltiple	-	-	3	-	-	-	-	-	-	3
06	Cajón sencillo	-	-	2	-	-	-	-	-	6	8
07	Marco/ pórtico	11	-	-	-	-	-	18	-	2	31
09	Cercha inferior	-	9	-	-	11	-	-	-	-	20
10	Cercha superior	-	17	-	-	17	-	-	-	-	34
11	Arco inferior	-	-	-	2	-	-	-	-	1	3
13	Colgantes	-	8	-	-	2	-	-	-	-	10
14	Atirantados	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
22	Viga canal	1	-	5	-	-	-	1	-	2	9
Suma		45	174	111	22	75	76	37	20	22	582

Tabla 5.- Puentes según sus características de fragilidad sísmica (FHWA, 2006 Y MCEER, 2007)

Grupo	Clasificación	Clase NBI	Diseño	" a_3 " Daño Moderado	
Múltiples claros	MS1	Multi-columna simplemente apoyada	101-106, 301-306, 501-506 309 y 310 (MCEER, 2007)	Previo 1975	0,35
	MS2	Multi-columna simplemente apoyada	101-106, 301-306, 501-506 309 y 310 (MCEER, 2007)	Sísmico	0,76
	MVC1	Columna única con viga cajón	205,206, 605,606	Previo 1975	0,42
	MVC2	Columna única con viga cajón	205,206, 605,606	Sísmico	0,88
	MCC1	Continua de Concreto	201-206 601-607	Previo 1975	0,79
	MCC2	Continua de Concreto	201-206 601-607	Sísmico	0,91
	MCA1	Continua de Acero	402-410	Previo 1975	0,76
	MCA2	Continua de Acero	402-410	Sísmico	0,91
CUSA	Claro único, apoyo simple	Todos		0,9	
OP	Otros puentes comunes	207, 313*, 622		0,9	
PM1	Puentes mayores $L_{max}^t > 150$ m	Todos	Previo 1975	0,5	
PM2	Puentes mayores $L_{max} > 150$ m	Todos	Sísmico	0,8	

Tabla 6.- Fragilidad en puentes calculados según las zonas de amenaza definidas por LDSP (582 puentes)

Puentes por importancia	Zona de Fragilidad Sísmica (50% de probabilidad)					% de Perdida (vulnerabilidad)		
	Sin Daño	Ligero	Moderado	Severo	Completo	< 8	8 < % < 25	> 25
Críticos	162	32	44	59	36	152	81	100
Esenciales	79	8	9	17	4	47	49	21
Convencionales	90	8	11	18	5	61	49	22

Según este procedimiento de la FHWA, una vez agrupados los puentes en grupos o familias de fragilidad estructural y asignados los valores de a_i para cada grado de daño (en la tabla 5 solo se muestra el valor para el nivel de daño moderado a_3), se aplican factores de corrección que se utilizan para captar las características particulares de cada puente relacionadas con el efecto del sesgo K_{skew} , el número total de tramos y longitud del puente K_{3D} , y el tipo de suelo y zona de amenaza sísmica F_v (FHWA, 2006) que fue obtenido a partir de los valores de C_a y C_v descritos en los LDSP; además, la clasificación de tipo de suelos se realizó según los datos provistos por la tesis de Sotela (2011). Luego de calcular estos parámetros, se obtienen los valores de A_i para elaborar las curvas para cada estado de daño en cada puente específico según lo dicta la ecuación 1.

En la figura 7 y la tabla 6 se resumen los resultados de un ejemplo de análisis de fragilidad sísmica y vulnerabilidad de los 582 puentes inventariados. Los puentes fueron evaluados para la amenaza sísmica de diseño para puentes nuevos y la importancia descrita en los capítulos 2 y 3 de los LDSP. Si bien estos resultados no se obtienen para un sismo específico como correspondería al caso de un protocolo de inspección post-sismo, estos son interesantes para identificar cuales puentes son más vulnerables y la distribución geográfica de los mismos. Esto es útil no solo para fines a inspección sino también como base para programas de rehabilitación de puentes. Actualmente, se labora en la aplicación del método para las intensidades registradas para el sismo de Samara del 2012.

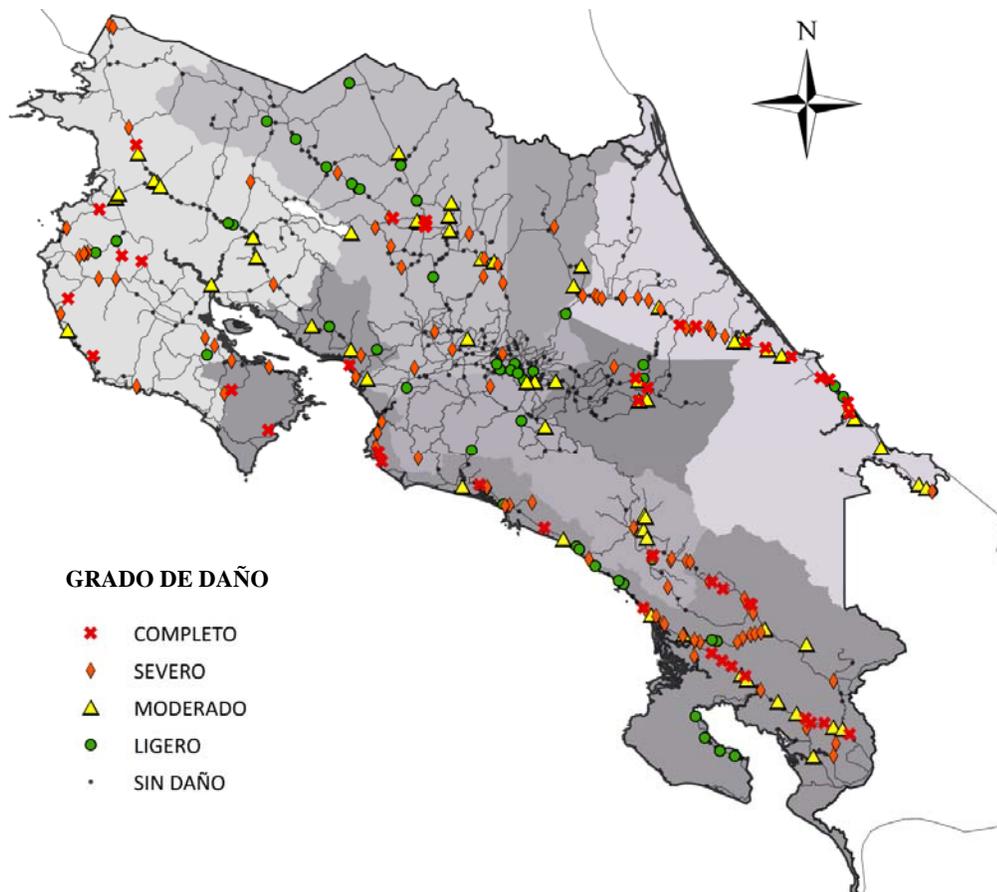


Figura 7.- Grado de daño posible para los puentes inventariados según las zonas de amenaza sísmica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se introdujo a escala nacional la utilización de las curvas de fragilidad como una herramienta útil para la caracterización de la vulnerabilidad sísmica en puentes. Éste, es solo un primer paso basado en las recomendaciones de la FHWA y si bien los resultados muestran buena coherencia con los daños observados en sismos anteriores, la validación completa aún está en proceso de trabajo. Es importante señalar también que se toma el año 1975 como límite para los puentes con o sin consideraciones de diseño por sismo. Esta fecha fué utilizada en estudios anteriores para puentes en la provincia de Guanacaste; sin embargo, cabe una discusión profunda sobre a partir de qué año debe de hacerse esta división para nuestro país.

Para algunos tipos de puentes, la obtención de fragilidades estructurales analíticas tomando en cuenta las características especiales de los puentes costarricenses podría constituir una segunda etapa de este trabajo para el mejoramiento de los resultados. Además, es recomendable obtener información más precisa de los tipos de suelo en cada puente para obtener curvas más realistas.

Finalmente, la aplicabilidad del método para los 1440 puentes de la red vial nacional es factible debido a que analizando estadísticamente los 582 puentes con información, se observó que puentes con longitudes menores a 25 metros son de claro único o de superestructura continua con lo que se les puede asignar una vulnerabilidad. Solo en unos 80 puentes es necesaria mayor información.

REFERENCIAS

- Banerjee S. and Chi, C.** (2013) “State-dependent fragility curves of bridges based on vibration measurements” *Probabilistic Engineering Mechanics*, July 2013.
- CFIA** (2013). *Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. Colegio Federado de Ingenieros de Costa Rica, San José, Marzo 2013.
- Choi, E., DesRoches, R. and Nielson, B.** (2004). “Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones”. *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 187–199, 2004.
- EP** (2012). Web: EQ.Report: <http://es.earthquake-report.com/2012/09/05/massive-quake-hits-costa-rica/>
- FEMA.** (2003). *HAZUS MR4: Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. 2003.
- FHWA** (2006). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 Bridges*. U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration. Virginia, January 2006.
- Ghosh, J. and Padgett, J.** (2010) “Aging Considerations in the Development of Time-Dependent Seismic Fragility Curves”. *Journal of Structural Engineering*, December 2010.
- LANAMME-UCR** (1991). Archivo fotográfico daños del Terremoto de Limón 1991.
- Malone, S., Eberhard, M. O., La Belle, J. and Ranf, R. T.** (2005). *Information Tools to Improve Post-Earthquake Prioritization of WSDOT Bridge Inspections*. Washington State Department of Transportation, Report No. WA-RD 602.1, Washington 2005.
- MCEER** (2006). *REDARS2 Methodology and Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Reserach, New York, 2007.
- ODOT** (2009). *Seismic Vulnerability of Oregon State Highway Bridges, Mitigation Strategies to Reduce Major Mobility Risks*. Oregon Department of Transport, November 2009.
- Padgett, J. and DesRoches, R.** (2008) “Methodology for the development of analytical fragility curves for retrofitted bridges”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008.
- Pinto, P.E., Giannini, R. and Franchin, P.** (2004). *Methods for seismic reliability analysis of structures*. IUSS Press, Pavia, 2004.
- Ranf, R.T., Eberhard, M.O. and Malone, S.** (2007). “Post-earthquake prioritization of bridge inspections”. *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 1, pp. 131–146, February 2007.
- Shinozuka, M., Feng, M. and Uzava, T.** (2000). *Statistical Analysis of Fragility Curves*, Technical Report for MCEER. New York, 2000.
- Sotela, C** (2011). *Zonificación de sitios para valoración de la aceleración pico efectiva según criterios del Código Sísmico de Costa Rica*, Tesis de Licenciatura. San Jose, Octubre 2011
- Varnes, D.J.** (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO.