

**CONGRESO ESTRUCTURAS 2019 Y XIIV SEMINARIO DE INGENIERIA  
ESTRUCTURAL Y SISMICA  
SAN JOSE, COSTA RICA 29 y 30, AGOSTO 2019**

**CALIBRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE PUENTES CON  
SUPERESTRUCTURA DE ACERO CON BASE EN RESULTADOS  
EXPERIMENTALES**

***Yi Cheng Liu Kuan***

Costa Rica, yi.liukuan@ucr.ac.cr, (506) 2511-6654, Escuela de Ingeniería Civil, UCR, Investigador.

***Pablo Agüero Barrantes***

Costa Rica, pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr, (506) 2511-2730, Unidad de Puentes, PIE, LanammeUCR, Investigador.

***Hellen de los Ángeles Garita Durán***

Costa Rica, hellen.garita@ucr.ac.cr, (506) 2511-4189, Unidad de Puentes, PIE, LanammeUCR, Investigadora.

***Moisés Felipe Durán Bolaños***

Costa Rica, moises.duran@ucr.ac.cr, Escuela de Ingeniería Civil, UCR, Estudiante de grado.

## **RESUMEN**

El monitoreo de la salud estructural basado en las vibraciones constituye una estrategia novedosa para la gestión de la infraestructura de puentes, el cual además de ser complementaria con las tradicionales inspecciones visuales, permite detectar y ubicar daños a temprana edad y cuantificar el deterioro de la estructura. Esto se concreta realizando el denominado “análisis modal operacional”, cuyo meta es la identificación de las propiedades dinámicas como son la frecuencia, el amortiguamiento y la forma modal de los modos globales de la estructura a partir de las vibraciones experimentales obtenidas en la condición operacional del puente.

Dado que múltiples componentes constituyen la estructura de un puente y en conjunto determinan sus parámetros dinámicos, es importante la calibración de modelos estructurales analíticos a partir de los resultados experimentales, y el estudio de su comportamiento dinámico. Con esto se logra, por un lado, identificar las correlaciones existentes entre los diferentes modos de vibración y los componentes estructurales, obteniéndose así indicadores específicos para la detección y ubicación de daño; por el otro lado, un modelo calibrado que servirá como una base analítica representativa de la realidad del puente para cuantificar el daño y predecir su desempeño ante diferentes sollicitaciones, con lo cual se permite validar hipótesis de reforzamiento o rehabilitación.

Esta investigación enfoca su estudio en puentes de vigas de acero continuas de tres tramos y de sección compuesta, de esta tipología hay cuatro puentes de tamaño similar ubicados en la Red Vial Nacional: dos puentes sobre el río Virilla en la Ruta Nacional No. 3, recién inaugurados, el puente sobre quebrada Salitral y el puente sobre el río Ciruelas ubicados en la Ruta Nacional No. 27, con más de una década de uso. La calibración del modelo analítico de cada uno de estos 4 puentes y la comparación entre los modelos facilitarán tanto la comprensión del comportamiento dinámico para esta tipología de puentes como la obtención de los indicadores de daño.

## INTRODUCCIÓN

La vibración es un fenómeno físico existente en todos los cuerpos sólidos, el cual no es ajeno a nuestras experiencias cotidianas. Por ejemplo, en la selección y compra de vasos o utensilios de vidrio, es de costumbre golpear con nuestro dedo el utensilio, y un sonido claro y nítido indica la integridad o la buena condición del objeto; mientras que un sonido apagado indica la existencia de desperfectos en el mismo. El sonido es producto de una gama de frecuencias debido a la vibración de un cuerpo que se transmite acústicamente. El hecho de que la tonalidad del sonido cambia en caso de existir alguna fisura o desperfecto en el objeto, evidencia que la frecuencia de vibración del cuerpo sólido es un parámetro medible y sensible al daño. Este es el mismo principio físico en que se basa el monitoreo de la salud estructural basado en vibraciones.

En el caso del sonido audible por los seres humanos, el rango de frecuencias es entre 20 Hz y 20 kHz, y en el caso de la vibración en puentes (en términos prácticos, menor a los 100 Hz), es generalmente resultado de oscilaciones globales de la estructura como un todo y éstas pueden ser captadas por medio de sensores como los acelerómetros. En el rango de frecuencias altas (en el orden de los kHz), corresponde a la propagación de ondas acústicas u ondas de esfuerzo. Las formas estacionarias de movimiento global de la estructura (llamadas formas modales) con sus frecuencias asociadas son denominadas como modos normales de vibración. La identificación de los parámetros dinámicos de un sistema a partir de los datos crudos recolectados en campo es una disciplina denominada identificación de sistemas, y en el caso específico del análisis de la variación de las frecuencias modales, incremento del amortiguamiento o cambios en las formas modales de una estructura debido al daño, bajo condiciones operacionales, recibe el nombre de análisis modal operacional.

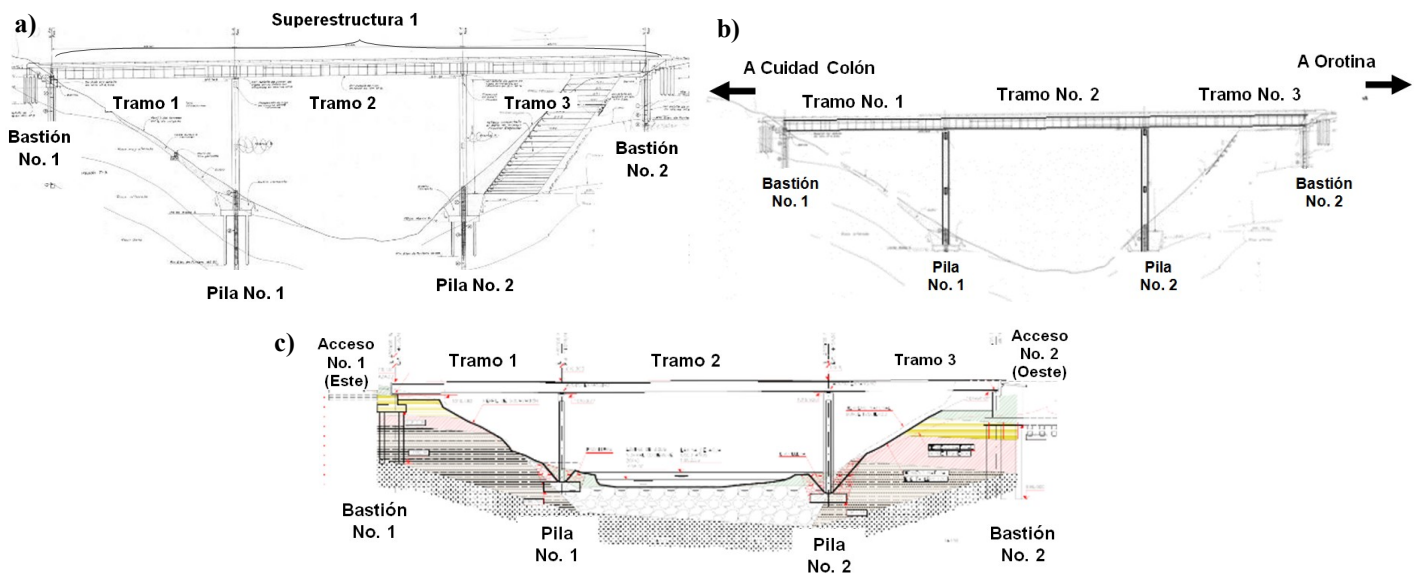
Para la implementación práctica del monitoreo de salud estructural basado en vibraciones se requiere tres frentes de trabajo: el primero es el desarrollo de una plataforma tecnológica que consiste en una red de sensores con sus unidades de adquisición de datos sincronizados en el tiempo, con cualidades como la robustez para ser manipulado en campo y versatilidad para su instalación. Como producto del programa de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural (PIE) del LanammeUCR y bajo el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la Ley 8114, se desarrolló dicha plataforma basada en una red de acelerómetros y 4 unidades de adquisición de datos (Liu-Kuan et al., 2015a) y fue validada en diferentes puentes siendo uno de ellos el puente sobre el río Virilla de la Ruta Nacional 32 (Liu-Kuan et al., 2015b). El segundo es la creación de programas de cómputo que automatiza y agiliza el procesamiento y análisis de datos, y el tercero es la generación de criterios e indicadores para la detección, localización y cuantificación de daño para diferentes tipologías de puentes a partir del estudio del comportamiento dinámico y calibración de modelos estructurales. Este último sería el enfoque de este presente trabajo de investigación.

## DESCRIPCIÓN DE LOS PUENTES EN ESTUDIO

En la Tabla 1 se resumen las principales características de los 4 puentes en estudio. En general, estos 4 puentes comparten las mismas características como son de 3 tramos y de alineación recta, de 2 carriles (1 en cada sentido), la superestructura posee vigas principales de acero tipo "I" con tablero de losa de concreto reforzado; cuentan con 2 bastiones y 2 pilas intermedias. En la figura 1 se presenta una elevación con la identificación de los elementos del puente.

**Tabla 1.- Características básicas del puente**

Puente	Sobre quebrada Salitral	Sobre río Ciruelas	Sobre río Virilla, puente Norte y puente Sur
Ruta Nacional No.	27	27	3
Longitud total (m)	160	133	124
Ancho Total (m)	12,6	12,2	9,96
Tipo de pilas	Ambas de tipo marco	Ambas de tipo marco	Columna de concreto reforzado
Tipo de apoyo en bastiones	Expansivo	Expansivo	Expansivo (elastomérico)
Tipo de apoyo en pilas	Fijo	Fijo	Expansivo (elastomérico)
Especificación de diseño	AASHTO 15ª Ed. 1992 e Interim Specification 1993	AASHTO 15ª Ed. 1992 e Interim Specification 1993	AASHTO LRFD (2012)
Carga viva	HS 20-44	HS 20-44	HL - 93
Edad en el momento de la toma de datos	13 años	13 años	22 días

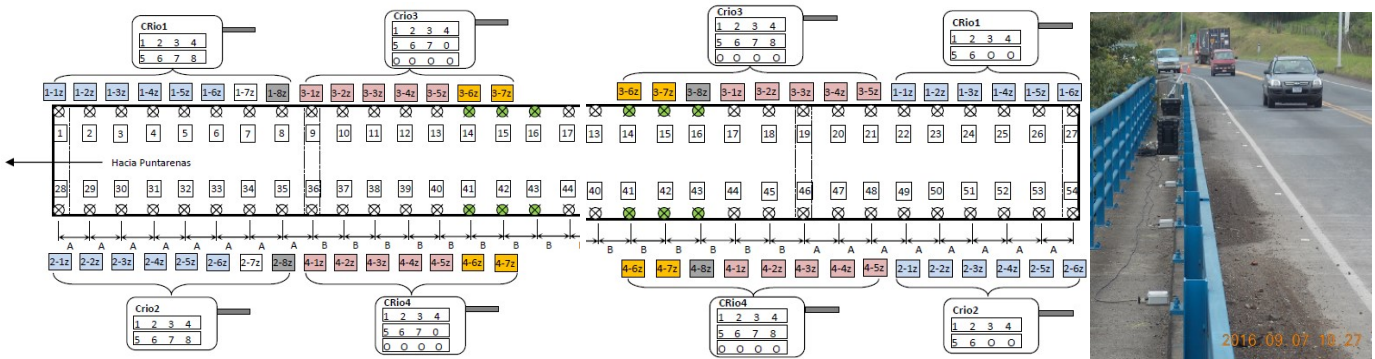


**Figura 1.** Elevación e identificación de elementos de los puentes estudiados: **a)** Puente sobre quebrada Salitral R.N. 27, **b)** Puente sobre río Ciruelas R.N. 27, y **c)** los 2 puentes sobre río Virilla, R.N. 3.

## DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO EXPERIMENTAL

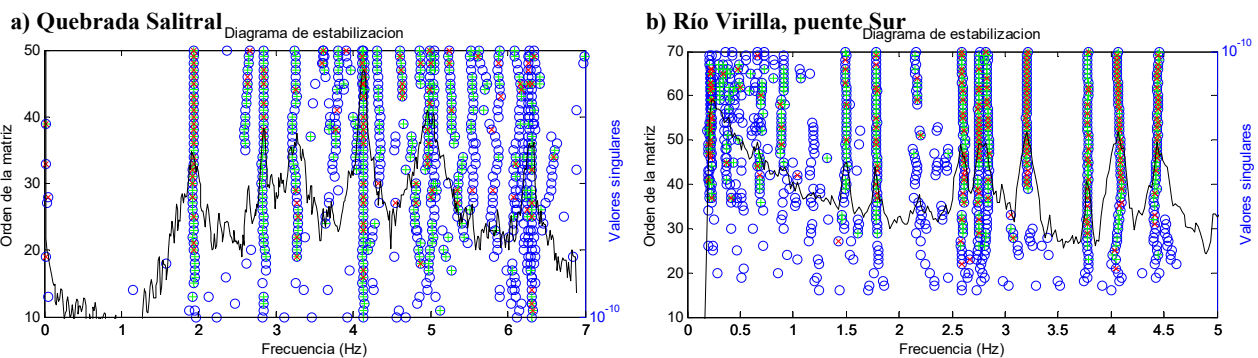
Para la identificación de los modos verticales de los puentes, se colocó una malla de acelerómetros a lo largo de las aceras sobre ambos costados del puente. Dada la longitud de los cables, el sistema puede abarcar como máximo 100 metros de longitud, al ser estos puentes superiores debido a su longitud, se debe realizar el registro de datos de aceleración en varias configuraciones. En la figura 2 se presenta a modo de ejemplo, la distribución y numeración de nodos y ubicación de sensores colocados sobre las superestructuras de cada uno de estos puentes; se muestran dos configuraciones conformadas por: 30 nodos en la primera y 28 en la segunda. Los 54 nodos de medición para los 4 puentes obtienen datos de forma sincronizada, siendo 4 de estos, nodos de empate. Asimismo, en una configuración aparte se colocaron en total 8 acelerómetros en el sentido horizontal (4 nodos en forma biaxial) sobre las aceras, específicamente en los puntos que coinciden con la ubicación de las pilas, para tomar aceleraciones en el sentido transversal y longitudinal de los puentes. Se registran en promedio unos 8 bloques por cada configuración de 5 minutos de duración cada uno, para luego ser analizados en la oficina.

El método de Identificación Estocástica de Subespacios basado en Covarianzas (SSI-COV) es el método aplicado para la identificación de los parámetros modales de los puentes. Es un método numérico basado en una serie de descomposiciones matriciales, el cual se implementa a través de la construcción del denominado diagrama de estabilización para discriminación de modos físicos de modos espurios. (Liu, et al., 2012; Loh et. al., 2012).



**Figura 2.-** Distribución de sensores y unidades de adquisición de datos en las 2 configuraciones.

Ejemplos del diagrama de estabilización para el puente sobre quebrada Salitral (medición en sentido vertical) y río Virilla (medición en sentido horizontal) se muestran en la figura 3, en los cuales está, además, superpuesto el espectro generado por el método de Descomposición en el Dominio de Frecuencias (“Frequency Domain Decomposition”, FDD por sus siglas en inglés), el cual consiste en aplicar Descomposición de Valores Singulares a la matriz de densidad espectral cruzada.



**Figura 3.-** Ejemplos del diagrama de estabilización con el método SSI-COV superpuesto al espectro de FDD.

## RESUMEN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

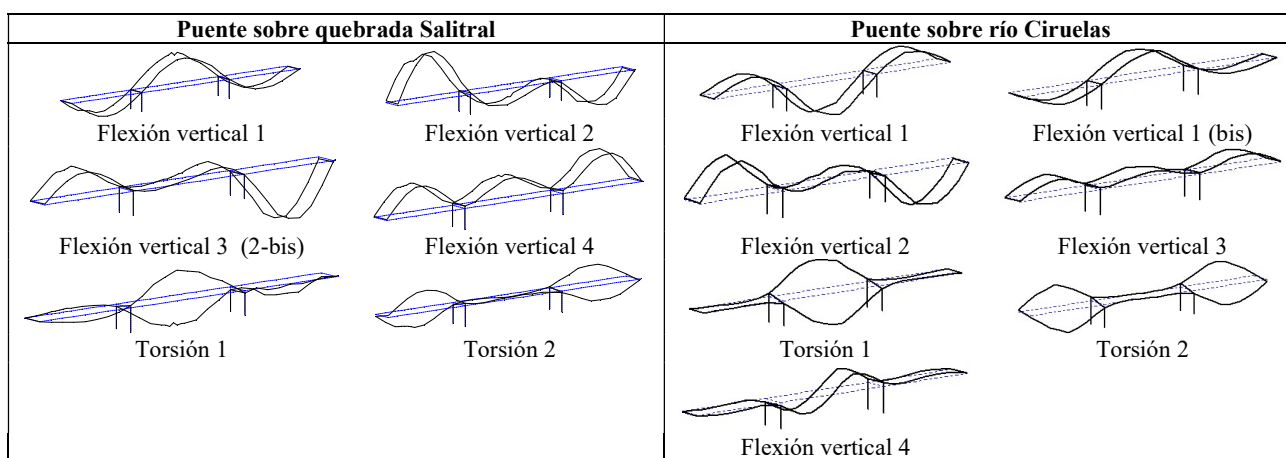
Después de un análisis exhaustivo de todos los bloques de datos tomados de las configuraciones, se identificaron las frecuencias naturales correspondientes a cada modo de oscilación, así como el rango de variación de cada una de las frecuencias. Estos resultados se muestran en la Tabla 2 para los puentes sobre quebrada Salitral y río Ciruelas, y en la Tabla 3 para los puentes norte y sur sobre río Virilla, y en las figuras 4 y 5 se muestran las formas modales correspondientes.

De estos resultados obtenidos se puede resaltar que, en forma cualitativa, los 4 puentes comparten la misma forma modal para el modo fundamental vertical de flexión y torsión, no obstante, para los puentes Salitral y Ciruelas se repite la forma modal, pero con leves diferencias para el modo vertical de flexión 2 (hay un 2-bis) y el modo vertical de flexión1 (1-bis) respectivamente, fenómeno que no

se observa en los puentes norte y sur de río Virilla. Dado que el modo que se repite posee una frecuencia totalmente diferente a su antecesor, este aspecto que se investigó con el modelo analítico. Por otro lado, el modo de flexión vertical 4 de Salitral y 3 de Ciruelas corresponden a una deformada particular ya que el “primer modo de flexión está igualmente repartido en los 3 tramos” donde los apoyos son los mínimos de la curva. Este aspecto no se aprecia en los puentes sobre río Virilla, donde los mínimos de las curvas (zonas de máximo cambio de curvatura) del correspondiente modo de flexión vertical 3 están un poco desfasados hacia el tramo central y no están sobre los apoyos.

**Tabla 2.-** Frecuencias naturales identificadas para puentes sobre quebrada Salitral y río Ciruelas

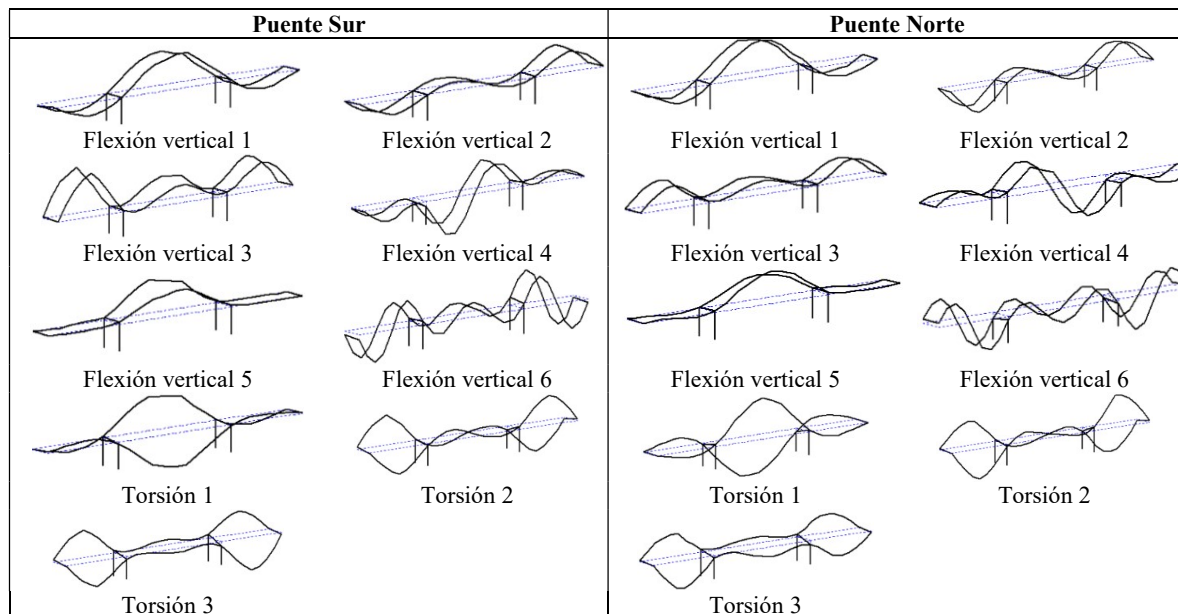
Puente sobre quebrada Salitral				Puente sobre río Ciruelas			
Modo	Frecuencia (Hz)			Modo	Frecuencia (Hz)		
	Mín.	Prom.	Máx.		Mín.	Prom.	Máx.
Flexión vertical 1	1,90	<b>1,92</b>	1,94	Flexión vertical 1	2,31	<b>2,36</b>	2,39
Flexión vertical 2	2,63	<b>2,74</b>	2,80	Flexión vertical 1 (1-bis)	2,41	<b>2,64</b>	2,88
Flexión vertical 3 (2-bis)	2,84	<b>2,86</b>	2,88	Flexión vertical 2	3,13	<b>3,25</b>	3,37
Flexión vertical 4	3,37	<b>3,37</b>	3,37	Flexión vertical 3	3,84	<b>4,04</b>	4,19
Torsión 1	4,12	<b>4,14</b>	4,16	Torsión 1	4,69	<b>4,76</b>	4,79
Torsión 2	5,01	<b>5,04</b>	5,10	Torsión 2	5,88	<b>5,98</b>	6,06
Flexión vertical 4				Flexión vertical 4	6,47	<b>6,50</b>	6,54
Longitudinal 1	No identificado claramente			Longitudinal 1	No identificado claramente		
Transversal 1 (pilas en fase)	0,97	0,98	0,98	Transversal 1 (pilas en fase)	1,21	<b>1,23</b>	1,24
Transversal 2 (fuera de fase)	2,44	2,46	2,47	Transversal 2 (fuera de fase)	2,87	<b>2,90</b>	2,92



**Figura 4.-** Formas modales asociadas a cada modo de oscilación, puentes sobre quebrada Salitral y Ciruelas.

**Tabla 3.-** Frecuencias naturales identificadas para puentes norte y sur sobre río Virilla

Modo	Puente Sur			Puente Norte		
	Frecuencia (Hz)			Frecuencia (Hz)		
	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.
Flexión vertical 1	1,73	<b>1,75</b>	1,77	1,76	<b>1,79</b>	1,80
Torsión 1	2,73	<b>2,76</b>	2,84	2,70	<b>2,76</b>	2,79
Flexión vertical 2	3,19	<b>3,25</b>	3,36	3,17	<b>3,19</b>	3,22
Flexión vertical 3	3,68	<b>3,83</b>	3,96	3,61	<b>3,71</b>	3,85
Torsión 2	4,35	<b>4,45</b>	4,52	4,34	<b>4,38</b>	4,42
Torsión 3	4,64	<b>4,71</b>	4,81	4,46	<b>4,60</b>	4,66
Flexión vertical 4	5,93	<b>6,02</b>	6,08	5,88	<b>5,93</b>	5,99
Flexión vertical 5 (modo tramo central)	7,56	<b>7,57</b>	7,60	8,07	<b>8,14</b>	8,28
Flexión vertical 6	10,21	<b>10,38</b>	10,66	10,04	<b>10,11</b>	10,20
Longitudinal 1	2,16	<b>2,21</b>	2,25	2,09	<b>2,12</b>	2,14
Transversal 1 (pilas en fase)	1,48	<b>1,50</b>	1,52	1,47	<b>1,49</b>	1,50
Transversal 2 (torsión en planta)	2,76	<b>2,79</b>	2,82	2,78	<b>2,78</b>	2,79



**Figura 5.-** Formas modales asociadas a cada modo de oscilación, puentes norte y sur sobre río Virilla.

Otro aspecto a tomar en cuenta es que el puente que presenta los mayores valores de frecuencia (menor periodo) para cada modo es el puente sobre el río Ciruelas (133 metros de longitud) a pesar de ser el puente de longitud intermedia de los cuatro analizados. El puente sobre la quebrada Salitral presenta frecuencias modales intermedias (mayores a los puentes sobre el río Virilla y menores a las del puente sobre el río Ciruelas) a pesar de ser la estructura de mayor longitud. Los puentes sobre el río Virilla que son de menor longitud y diseñados con la norma AASHTO más actualizada, presentan las menores frecuencias de flexión y torsión, lo cual implica que son puentes más flexibles que los otros dos. Se concluye entonces, que no se puede generalizar sobre la rigidez de un puente sólo basado en criterios del año de diseño y la longitud total de las superestructuras; el diseño de cada puente es único y cada caso es particular.

## CALIBRACIÓN DEL MODELO ANALÍTICO Y ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Se utilizó como herramienta de modelado el programa de análisis estructural CSI Bridge. La confección de los modelos se basa en los planos constructivos que cuenta la Unidad de Puentes del LanammeUCR, donde se tomó en cuenta la geometría de las estructuras, las propiedades de los materiales, la conformación de las vigas principales, el sistema de arriostramiento y los diafragmas, así como las condiciones consideradas para cada apoyo, con la limitación de que estos no son los planos “as-built”. Se adoptó el método de calibración manual y no empleando un algoritmo automático con el objetivo de estudiar la sensibilidad de cada modo hacia los diferentes componentes estructurales, para así, hallar criterios e indicadores de daño. El proceso de calibración es iterativo por lo que se resumen aquí los principales hallazgos y para mayores detalles se puede referir al informe de investigación correspondiente (Liu-Kuan et. al., 2019).

### 1) Influencia de la rigidez horizontal de los apoyos en el comportamiento de una viga

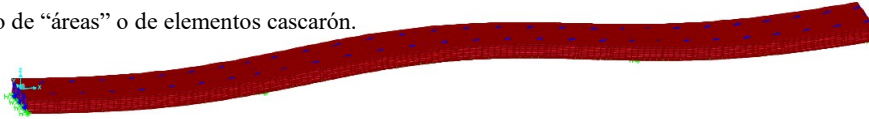
Existen tres tipos de modelos de elementos finitos comúnmente usados en los programas de análisis estructural para puentes: a) modelo espinal o tipo viga, b) modelo de cascarones (“Shell” en inglés)



a) Modelo de “líneas” o de elementos viga considerando la excentricidad del centro geométrico respecto a los apoyos.

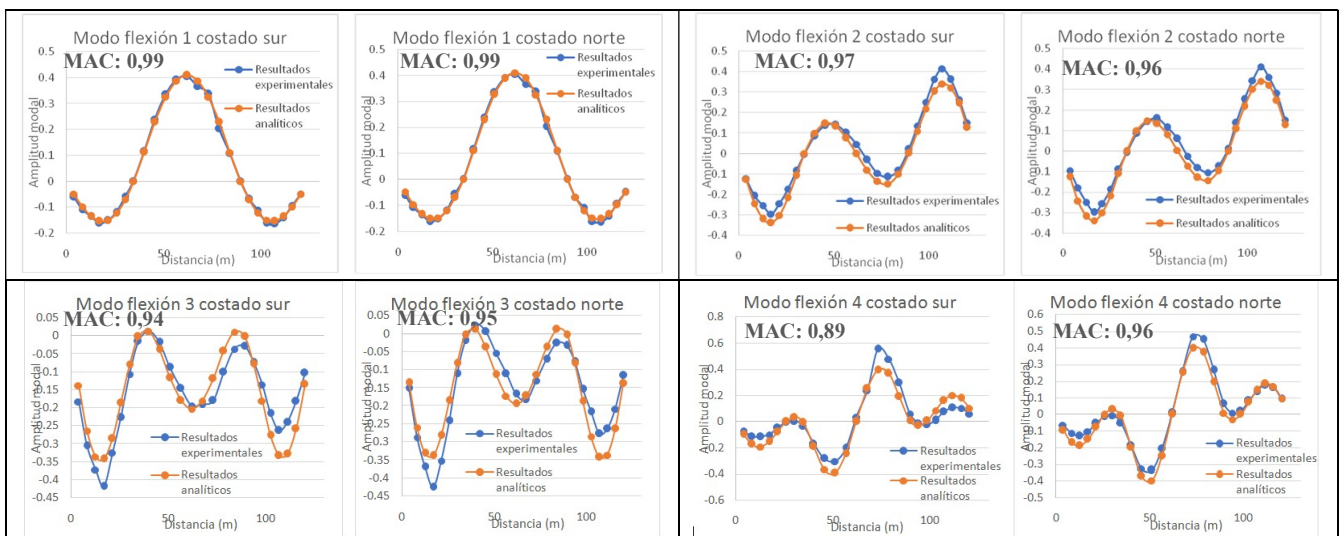


b) Modelo de “áreas” o de elementos cascarón.



**Figura 6.-** Modelos estructurales **a)** tipo línea (elementos viga) y **b)** tipo área (elementos cascarón).

De los resultados mostrados en la Tabla 4, se observa que es posible reflejar el comportamiento dinámico del puente sobre río Virilla para sus modos verticales tomando en cuenta únicamente la superestructura y modelándola con elementos tipo viga, con resortes horizontales en sus apoyos que cuentan con una rigidez horizontal indicada en los planos (0,23 tonf/mm), y siempre que se considere la excentricidad de los apoyos respecto al centro geométrico de la superestructura, con un error menor a 2% respecto a las frecuencias experimentales para todos los modos, nivel de precisión que también alcanzó el modelo basado en elementos cascarón. Se destaca que es un buen modelo el dejar libre el movimiento horizontal para los apoyos modelándolos si fueran rodillos, ya que prácticamente no hay cambio en las frecuencias con o sin los resortes horizontales. Asimismo, se observa que, si los apoyos fuesen modelados como articulaciones, afectarían significativamente las frecuencias los 3 primeros modos de flexión mientras tanto los modos 4 y 5 (considerados como modos superiores) se muestran insensibles a este cambio, indicando que podrían servir de indicadores de daño exclusivamente de la superestructura. En la figura 7 se muestran ejemplos de comparación de las formas modales analíticas y experimentales obtenidas para el puente del costado Sur sobre río Virilla así como sus MAC (“Modal Assurance Criterion” en inglés, el cual es una medida de correlación entre las formas modales tratadas como si fueran vectores). Un valor de MAC superior a 0,95 indica una muy buena correlación modal, en este caso exceptuando los modos superiores (modos de flexión vertical 4 y 6, con frecuencias de 6,02 Hz y 10,38 Hz), se obtuvieron un valor de MAC superior a 0,94 para todos los modos.



**Figura 7.-** Comparación de algunos ejemplos de las formas modales experimentales y analíticas.

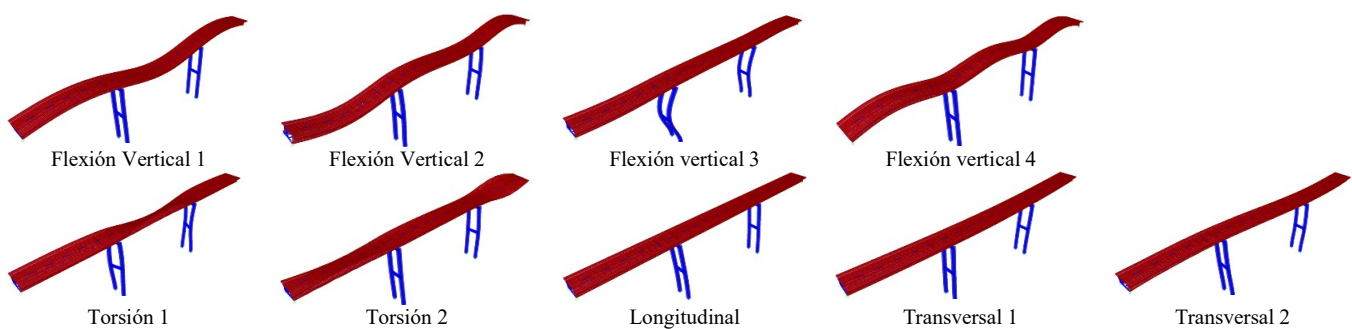


## 2) Efectos de la interacción subestructura-superestructura

Los resultados del modelo con pilas se presentan en la Tabla 5, y en la figura 8 muestran algunos ejemplos de las formas modales analíticas obtenidas para el caso del puente sobre quebrada Salitral. Al incluir las pilas en los modelos estructurales del río Salitral y Ciruelas, aparecieron los modos que no fueron encontrados tomando en cuenta solo la superestructura, los cuales serían modos resultantes de la interacción subestructura-superestructura, y también a su vez, se logró un mejor ajuste en todos los modos con un máximo porcentaje de diferencia de 5,34%, exceptuando el modo de flexión vertical 3 para el puente sobre quebrada Salitral y flexión vertical 4 para Ciruelas que se llegó a un 8,81% y 12,04% de diferencia, respectivamente. Asimismo, se lograron valores de MAC superiores a 0,94 para todos los modos del puente sobre río Ciruelas, y superior a 0,89 para el puente sobre la quebrada Salitral. Se observa también que las frecuencias de los modos transversales identificadas concordaron con el modelo analítico para ambos puentes.

**Tabla 5.-** Comparación de frecuencias y formas modales del modelo calibrado con los experimentales

Puente sobre la quebrada Salitral						Puente sobre río Ciruelas					
Modos verticales	Frecuencias naturales			Correlación Modal (MAC)		Modos verticales	Frecuencias naturales			Correlación Modal (MAC)	
	Exp.	modelo	% Dif.	Costado Sur	Costado Norte		Exp.	modelo	% Dif.	Costado Sur	Costado Norte
Flexión vertical 1	1,97	1,97	0,00	0,99	0,99	Flexión vertical 1	2,36	2,36	0,32	0,99	0,99
Flexión vertical 2	2,72	2,87	5,34	0,90	0,89	Flexión vertical 1-bis	2,64	2,61	-1,28	0,99	0,98
Flexión vertical 3	2,95	3,21	8,81	0,92	0,92	Flexión vertical 2	3,25	3,42	5,13	0,98	0,99
Flexión vertical 4	3,45	3,39	-1,64	0,98	0,98	Flexión vertical 3	4,04	3,93	-2,85	0,98	0,99
Torsión 1	4,25	4,24	-0,27	0,92	0,97	Torsión 1	4,76	4,71	-1,10	0,99	0,99
Torsión 2	5,16	5,11	-1,04	0,92	0,95	Torsión 2	5,98	5,67	-5,14	0,96	0,94
Longitudinal	-	0,27	-	-	-	Flexión vertical 4	6,50	7,28	12,04	0,99	0,99
Transversal 1	0,98	0,97	-1,02	-	-	Longitudinal	-	0,23	-	-	-
Transversal 2	2,46	2,42	-1,63	-	-	Transversal 1	1,23	1,21	-1,63	-	-
(torsión en planta)						Transversal 2	2,90	2,94	1,38	-	-
						(torsión en planta)					



**Figura 8.-** Ejemplos de los modos de vibración del modelo analítico para el puente sobre quebrada Salitral.

## 3) Composición de las masas de la superestructura según componentes

Se observó durante el análisis de resultados que los elementos secundarios como la carpeta asfáltica y las barreras vehiculares influyen significativamente las frecuencias naturales de los puentes Norte y Sur sobre el río Virilla. Dado que la masa junto a la rigidez son las propiedades mecánicas que determinan las frecuencias naturales de los puentes, se considera importante realizar un estudio del porcentaje de masa que aportan los diferentes componentes de los puentes a través de los modelos analíticos calibrados, resultado que se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6.-** Comparación de porcentaje de masa que aportan los diferentes componentes de los puentes, obtenidos de los modelos analíticos

	Puentes								
	Virilla norte o sur			Ciruelas			Salitral		
Longitud total (m)	124 (34,5+55+34,5)			130 (40+50+40)			156 (48+60+48)		
Pesos y sus porcentajes de la superestructura	Peso (ton)	Peso por metro lineal (ton/m)	%	Peso (ton)	Peso por metro lineal (ton/m)	%	Peso (ton)	Peso por metro lineal (ton/m)	%
Vigas longitudinales	179,2	1,4	14,5	211,5	1,6	18,6	344,3	2,2	24,0
Arriostres y vigas diafragma	45,1	0,4	3,7	58,8	0,5	5,2	56,0	0,4	3,9
Losa de concreto	719,3	5,8	58,3	772,5	5,9	68,1	924,5	5,9	64,6
Carpeta asfáltica y aceras	154,4	1,2	12,5	-	-	-	-	-	-
Barrera vehicular	128,1	1,0	10,4	84,2	0,6	7,4	101,1	0,6	7,0
Barandas de acero	7,4	0,1	0,6	7,8	0,1	0,7	9,4	0,1	0,7
Total de superestructura	<b>1233,5</b>	<b>9,9</b>		<b>1134,8</b>	<b>8,7</b>		<b>1435,3</b>	<b>9,2</b>	
Total de las pilas	514,5 ton			795,6 ton			892,4 ton		

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De este trabajo de investigación se concluye sobre la alta sensibilidad de las frecuencias de los modos fundamentales (de frecuencias bajas) a la condición de los apoyos (condiciones de frontera de la estructura) mientras su influencia en los modos superiores es relativamente bajo; luego, la aparición de modos con formas modales repetidas pero con frecuencias distintas se deben a la interacción superestructura-subestructura; además, el aporte a la masa de la superestructura de los elementos secundarios como son la baranda vehicular y la capa asfáltica son determinantes en las frecuencias naturales de la tipología de puentes en consideración.

## RECONOCIMIENTOS

El financiamiento de la presente investigación está dentro del marco de las competencias asignadas al LanammeUCR mediante el artículo 6 de la ley No. 8114.

## REFERENCIAS

- Durán-Bolaños, Moisés F. (2018). “Calibración de modelos estructurales y estudio del comportamiento dinámico para puentes de vigas de acero compuestas y continuas de 3 tramos”. Trabajo Final de Graduación de Licenciatura. San José, Costa Rica: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. (2012). “Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 42:477-498. Wiley Online Library. June, 2012.
- Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015a). “Desarrollo y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015”. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015b). “Monitoreo estructural de la superestructura No.2 del puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 32 LM-PI-UP-PN12-2015”. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Liu-Kuan, Y.C., Agüero-Barrantes, P., Garita-Durán, H. (2019). “Comportamiento dinámico de puentes con superestructura tipo viga continua con vigas de acero ubicados en la Red Vial Nacional de Costa Rica LM-PIE-UP-I01-2019”. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural (PIE), LanammeUCR.