

# Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-11-2016

## MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TENORIO RUTA NACIONAL No. 1

Preparado por:  
Unidad de Puentes

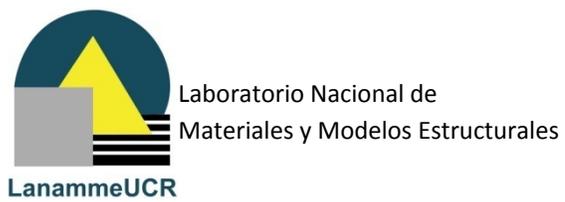


San José, Costa Rica

Diciembre de 2016



Documento generado con base en el Art. 6 de la Ley 8114 y lo señalado  
Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto  
DE-37016-MOPT.





Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

<b>1. Informe:</b> LM-PI-UP-11-2016		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO TENORIO RUTA NACIONAL No. 1		<b>4. Fecha del Informe</b> 9 de Diciembre de 2016
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b> Este informe de monitoreo de la superestructura del puente sobre el río Tenorio, en la Ruta Nacional No.1, es un producto del programa de monitoreo en sitio de estructuras de puentes de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para evaluar la condición estructural de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. Se realizó una prueba de dinámica con cargas operacionales cuyos resultados son un insumo muy valioso en la toma de decisiones con respecto a la estructura evaluada.		
<b>8. Palabras clave</b> Puentes, Ruta Nacional No.1, río Tenorio, Monitoreo, Salud Estructural, Análisis Modal.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 37
<b>11. Inspección e informe por:</b> Ing. Pablo Agüero Barrantes Unidad de Puentes  Fecha: 09/12/2016	<b>12. Inspección y revisión por:</b> Ing. Yi Cheng Liu Kuan Unidad de Puentes  Fecha: 09/12/2016	
<b>13. Revisado por:</b> Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR  Fecha: 09/12/2016	<b>14. Revisado por:</b> Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Puentes  Fecha: 09/12/2016	<b>15. Aprobado por:</b> Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 09/12/2016



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



**PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE**

Página intencionalmente dejada en blanco

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>ALCANCE DEL INFORME .....</b>	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1.</b>	<b><i>PRUEBAS DE CARGA.....</i></b>	<b>10</b>
<b>4.2.</b>	<b><i>ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL .....</i></b>	<b>12</b>
<b>4.3.</b>	<b><i>ENFOQUES Y FRECUENCIA DE MONITOREO .....</i></b>	<b>13</b>
<b>4.4.</b>	<b><i>MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS .....</i></b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....</b>	<b>19</b>
<b>6.</b>	<b>ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE .....</b>	<b>23</b>
<b>7.</b>	<b>MÉTODO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>23</b>
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>28</b>
<b>9.</b>	<b>CALIBRACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO.....</b>	<b>32</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>34</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>35</b>

Página intencionalmente dejada en blanco

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la etapa de operación de una obra de infraestructura civil se requiere de la inspección periódica, trabajos de mantenimiento y hacer las reparaciones necesarias en casos que se detecten deterioro o daños en sus elementos. Dichas actividades garantizan el buen funcionamiento, seguridad e integridad a lo largo de la vida útil de la obra.

Las labores de inspección de puentes inician a un nivel básico de inspección visual. La Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR ha realizado fiscalización de estructuras de puentes incluyendo inspección visual desde el año 2010, con base en el Manual de Inspección de puentes del MOPT. A partir del año 2016 las inspecciones visuales de la Unidad de Puentes se realizan con base en la metodología desarrollada por la Unidad de Puentes y presentada en el informe LM-PI-UP-05-2015 (Muñoz-Barrantes, et. al. 2015).

Si los hallazgos de la inspección visual evidencian posibles daños o deterioro de la estructura se pueden recomendar análisis e inspecciones más detalladas, las cuales pueden comprender pruebas de carga estática y dinámica sobre el puente.

En el caso del puente sobre el río Tenorio se colocó instrumentación y se realizaron mediciones de la respuesta dinámica del puente ante excitaciones ambientales, es decir, movimientos del puente causados por el paso del tránsito, y mediante la metodología de monitoreo basada en vibraciones, la cual puede considerarse como una versión avanzada de pruebas dinámicas tradicionales, permiten detectar daños o anomalías en el comportamiento mediante la identificación de cambios en los parámetros dinámicos de la estructura. El LanammeUCR, por medio de la Unidad de Puentes del PITRA, ha desarrollado e implementado, en nuestro país un sistema de monitoreo híbrido y portátil que permite registrar datos de aceleración inducida por las cargas ambientales a las que está sometida la estructura (Liu-Kuan, et. al, 2015). Estas metodologías surgen de la necesidad de contar con métodos y técnicas para la evaluación, monitoreo y detección de daños en puentes, por las que durante los últimos 20 años un área sumamente activa de investigación denominada

“Monitoreo de Salud Estructural” (Structural Health Monitoring, SHM por las siglas en inglés), ha tomado auge alrededor del mundo, donde se ha desarrollado e implementado novedosas técnicas para dichos propósitos.

Este informe de monitoreo y detección de eventual daño de la superestructura del puente sobre el río Tenorio, en la Ruta Nacional No.1, es un producto del programa de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para evaluar la condición estructural de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. El monitoreo estructural se realizó el día 30 de setiembre del 2015.

## 2. OBJETIVOS

- a) Monitorear el puente con acelerómetros que registren vibraciones ambientales de la estructura inducidas por el tránsito vehicular. Las aceleraciones son registradas de forma sincronizada por un sistema de adquisición para su posterior análisis.
- b) Identificar los parámetros modales operacionales de la estructura utilizando los datos obtenidos en el campo y métodos estocásticos de sub-espacios.
- c) Proporcionar recomendaciones generales para mantenimiento y/o reparación.

## 3. ALCANCE DEL INFORME

Este informe de monitoreo estructural presenta los resultados obtenidos de los análisis modal experimental realizado al puente sobre el río Tenorio en ruta No.1. El puente monitoreado corresponde al nuevo puente construido en el año 2015 el cual se ubica aguas arriba (al norte) del puente existente construido en 1954, el que fue rehabilitado durante la ampliación del tramo Cañas-Liberia.

Informe No. LM-PI-UP-11-2016	Fecha de emisión: 09 de diciembre de 2016	Página 8 de 37
------------------------------	---	----------------

Dichos resultados se pueden utilizar para comparar con los resultados analíticos de un modelo de elementos finitos del puente, y las estimaciones del grado de daño basadas en el ajuste del modelo analítico contra el modelo experimental, las cuales podría servir de base para la toma de decisiones en cuanto al planeamiento y futuro diseño de rehabilitación del puente.

En el caso de las pruebas dinámicas, los registros de aceleración obtenidos corresponden a vibraciones ambientales, es decir, respuestas del puente ante cargas vehiculares operacionales aleatorias. La cantidad de formas modales operacionales que se puede identificar con los datos experimentales está limitada al comportamiento inducido por la carga vehicular en el periodo de tiempo que se realiza el muestreo de los datos.

Para efectos del análisis realizado no se evaluó el efecto de la fatiga en los materiales.

El puente existente, construido en 1954 y rehabilitado en el 2015, no se encuentra dentro del alcance de este informe.

#### 4. MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los principales temas relacionados con el alcance del presente informe.

##### 4.1. Pruebas de carga

Una prueba de carga es la observación y medición de la respuesta de un puente sujeto a carga controlada y predefinida sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Las pruebas de carga pueden ser utilizadas para verificar el desempeño tanto de componentes como del sistema bajo la acción de una carga viva conocida proveyendo una alternativa de metodología para evaluación analítica de la capacidad de carga del puente (AASHTO, 2011).

Las pruebas de carga se clasifican en dos tipos: pruebas de diagnóstico y pruebas de capacidad. Las pruebas de diagnóstico son realizadas para determinar la respuesta del puente ante cargas o para validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos. Son utilizadas para mejorar el conocimiento del ingeniero acerca del comportamiento del puente y reducir incertidumbres relacionadas con las propiedades del material, condiciones de frontera, contribuciones de la sección transversal, efectividad de reparaciones, influencia de daño y deterioro, y otras variables similares. Estas pruebas incluyen la medición de los efectos de la carga en uno o varios miembros críticos del puente y la comparación de éstos efectos con los calculados utilizando un modelo analítico.

Las pruebas de capacidad se utilizan para establecer la máxima carga segura sobre el puente, donde el comportamiento se encuentra en el rango lineal elástico. En este caso el puente es sujeto a cargas específicas y se realizan observaciones para determinar si el puente es capaz de soportar dichas cargas sin daño. Las cargas deben ser aplicadas en incrementos y el puente debe ser monitoreado para identificar de forma temprana cualquier indicio de agrietamiento o comportamiento en el rango no lineal.

Las pruebas estáticas se realizan con cargas estacionarias para evitar inducir vibraciones en la estructura, a diferencia de las pruebas dinámicas donde se utilizan cargas que inducen vibraciones en el puente. Las pruebas de diagnóstico pueden ser estáticas o dinámicas. Las pruebas de capacidad son realizadas en su mayoría de forma estática.

Algunas ventajas de las pruebas de carga son:

- Proveen suficiente información para establecer un nivel de carga viva seguro para puentes existentes. En los casos de puentes donde no se dispone de información del proceso constructivo (planos “as-built”).
- En algunos casos los cálculos teóricos de capacidad de carga resultan en bajas cargas vivas permisibles y las pruebas no destructivas de carga pueden proveer una carga viva máxima permisible más realista.
- Puentes que han sido rehabilitados o reforzados a través de los años no pueden ser evaluados teóricamente de forma precisa debido a la interacción de varios elementos.
- Las pruebas de carga permiten confirmar la naturaleza de la distribución de carga. Los factores de distribución utilizados en diseño o en evaluación teórica de la capacidad de carga generalmente son aproximaciones conservadoras de la distribución real.
- El análisis de miembros estructurales con deterioro es complicado, en especial en miembros con deterioro avanzado. En este caso las pruebas de carga son una valiosa herramienta para identificar el comportamiento existente.
- Las pruebas de carga pueden ofrecer información del rango de esfuerzos y de los ciclos de carga actuando en el miembro.

#### 4.2. Análisis modal operacional

El área de Monitoreo de Salud Estructural comprende la implementación e instalación, en forma temporal o permanente, de una amplia gama de tecnologías y sensores novedosos en puentes y la utilización de diferentes técnicas de procesamiento de señales, identificación de sistemas y modelos numéricos para determinar el estado de “salud” de las estructuras a partir de los datos recolectados in situ.

La metodología utilizada por la Unidad de Puentes del LanammeUCR se denomina “Monitoreo de Salud Estructural Basado en Vibraciones”, y el análisis modal operacional que se implementa aquí es uno de los análisis más importantes dentro de esta rama de monitoreo. Ésta consiste en la extracción e identificación de los parámetros dinámicos del puente, los cuales comprenden: las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento y las formas modales operacionales del puente, a partir de las señales vibratorias recolectadas simultáneamente por múltiples sensores de vibración. En nuestro caso particular se utiliza acelerómetros colocados a lo largo del puente.

Cualquier variación en las propiedades mecánicas de la estructura induce cambios en los parámetros dinámicos mencionados. Dichos cambios, como aumento de la masa por sobrecapas de asfalto o variaciones en la rigidez de los elementos estructurales debido a deformaciones en el rango inelástico, afectan el comportamiento dinámico de la estructura y se reflejarían mediante cambios en los parámetros dinámicos.

Si existe una buena resolución espacial en cuanto a la distribución de sensores, y si el método de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos es lo suficientemente robusto como para extraer todos estos cambios a partir de las señales de vibración captadas, el monitoreo de la salud estructural y la identificación de daños sería factible midiendo únicamente las vibraciones de la estructura (Liu-Kuan, 2013).

Se define las formas modales operacionales de una estructura como las obtenidas a partir de las vibraciones inducidas por cargas ambientales. En el caso de estructuras de puentes vehiculares, las vibraciones ambientales más frecuentes son las inducidas por la carga vehicular y la carga de viento.

#### 4.3. Enfoques y frecuencia de monitoreo

En el caso de puentes nuevos, lo ideal es realizar un monitoreo y análisis modal una vez concluida la construcción de la obra, para obtener un marco de referencia. Posteriormente, realizar monitoreo periódico dependiendo de la importancia de la obra (por ejemplo, cada 2 años). Cambios importantes entre los parámetros modales obtenidos en el monitoreo del estado inicial y cualquier monitoreo posterior son indicativo de daño probable.

Lo anterior también es recomendable para puentes que han sido reforzados o rehabilitados, para generar un registro histórico de la estructura reforzada. También se podría realizar un monitoreo antes del inicio de las obras de rehabilitación para evaluar el efecto de los trabajos de reforzamiento.

En el caso de puentes existentes que no se cuenta con el monitoreo inicial después de finalizar la construcción, la única forma para poder evaluar el estado de puente y estimar su grado de deterioro es comparar con un modelo estructural analítico. La modelación con elementos finitos es generada con base en la información disponible del puente como planos y especificaciones, y el modelo resultante es considerado como la condición ideal y “sana” del puente.

Sin embargo, el método de los elementos finitos es un método numérico y acarrea por sí mismo errores de modelación. Por esta razón, deben ser examinados diferentes niveles de refinamiento del modelo analítico, y realizarse un estudio de sensibilidad y convergencia en cuanto a los parámetros modales analíticos para tomar en cuenta el nivel de incertidumbre incurrido en este método.

En todos los casos anteriores (puente nuevo, reforzado o existente) se recomienda realizar un monitoreo cada vez que la estructura se vea sometida a un evento extremo significativo como un sismo o una crecida del río.

#### 4.4. Método de Identificación de Sistemas

Para la correcta identificación de los parámetros dinámicos del puente, es necesaria la utilización de una técnica de identificación. Como los parámetros dinámicos son obtenidos a partir de múltiples registros de señales de vibración, recolectados por un sistema de adquisición de datos que sincroniza los registros simultáneos de aceleración, la técnica de identificación debe ser robusta y capaz de discriminar las señales de ruido e interferencias presentes en los registros.

El método de Identificación Estocástica del Subespacio (Stochastic Subspace Identification, SSI por sus siglas en inglés) es un método de identificación de sistemas lineales en el dominio del tiempo que ha ganado territorio en el ámbito de ingeniería civil por su robustez y eficacia. El método cuenta con una base matemática rigurosa y experiencias exitosas de su aplicación a diferentes tipos de obras de infraestructura civil que se puede encontrar en numerosas publicaciones técnicas internacionales (Liu-Kuan, et. al., 2012; Weng, et.al., 2008; Loh, et. al., 2012; Wei-Xin, et. al., 2004; Peeters, 2000; Pridman & Wilson, 2002; Basseville, et. al., 2001; Giraldo, et. al., 2009; van Overschee & de Moor, 1996).

El Método Estocástico Subespacial parte desde la ecuación de movimiento de un sistema dinámico invariante en el tiempo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}_2\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t) = \mathbf{L}\mathbf{u}(t) \quad (2.1)$$

donde  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}_2$  and  $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez respectivamente. Además

$\mathbf{q}(t) \in \mathfrak{R}^n$  es el vector de desplazamiento en tiempo continuo.

$\dot{\mathbf{q}}(t)$  es el vector de velocidad.

$\ddot{\mathbf{q}}(t)$  es el vector de aceleración con la misma dimensión que el vector de desplazamiento.

$\mathbf{F}(t) \in \mathfrak{R}^n$  es el vector de la excitación externa.

$\mathbf{L} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$  es la matriz de ubicación de entradas de excitación externa al sistema.

$\mathbf{u}(t) \in \mathfrak{R}^m$  es el vector que describe  $m$  entradas como función del tiempo  $t$ .

$n$  es el número de los grados de libertad y  $m$  es el número de entradas.

La ecuación (2.1) puede ser discretizada en el tiempo y luego de una serie de manipulaciones matemáticas con la hipótesis de que al sistema no se le puede conocer las excitaciones de entrada pero que estas pueden ser asumidas como ruido blanco, se puede llegar al modelo conocido como “el Modelo Estocástico de Espacio de Estados en Tiempos Discretos”:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k\end{aligned}$$

Donde  $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t) = [\mathbf{q}_k^T \quad \dot{\mathbf{q}}_k^T]^T$  es el vector del estado discreto que contiene los desplazamientos y velocidades muestreados (discretos) en el punto  $k$ , y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en el muestreo.  $\mathbf{y}_k \in \mathfrak{R}^l$  representa las  $l$  mediciones discretas (es decir,  $l$  sensores) de salida del sistema.  $\mathbf{A}$  es la matriz del sistema,  $\mathbf{C}$  es la matriz de observación en tiempos discretos, y  $\mathbf{w}_k \in \mathfrak{R}^{2n \times 1}$  y  $\mathbf{v}_k \in \mathfrak{R}^{l \times 1}$  son asumidos como un ruido espacialmente blanco de media cero. La relación que hay entre la matriz  $\mathbf{A}$  en tiempos discretos y las matrices de masa, amortiguamiento  $\mathbf{K}$  y rigidez de la ecuación del movimiento en tiempo continuo es la siguiente:

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c \Delta t}, \quad \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2n \times 2n}$$

donde  $\mathbf{I}$  es la matriz de identidad.

La matriz de observación  $\mathbf{C}$  en el caso de que sólo hay mediciones de aceleración y después de la conversión a tiempos discretos se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -\mathbf{C}_a \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{C}_a \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_2 \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^{l \times 2n}$$

donde  $\mathbf{C}_a \in \mathfrak{R}^{l \times n}$  es la matriz de ubicación de los sensores de aceleración sobre los grados de libertad de la estructura en vibración.

Del análisis de valores propios (eigenvalores) de la matriz  $\mathbf{A}$  se puede extraer la información de las frecuencias naturales de vibración así como los amortiguamientos de los modos excitados durante las mediciones; mientras que de la matriz de observación  $\mathbf{C}$  multiplicada por los vectores propios (eigenvectores) de la matriz  $\mathbf{A}$  se obtendrá la forma modal operacional observada en los puntos de medición. Por esta razón, mientras mayor sea la cantidad de puntos de medición, más resolución espacial se dispone de la forma modal operacional experimental.

El método de Identificación de Subespacios Estocásticos que se llamará SSI de ahora en adelante, consiste en un algoritmo numérico de varios pasos que permite extraer de las múltiples mediciones simultáneas las matrices  $\mathbf{A}$  y  $\mathbf{C}$ , y luego de ellos, los parámetros modales de interés. El método SSI conducido por covarianzas (SSI-COV) es el método aplicado para el análisis de este puente y se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 1.

Como SSI-COV es un método numérico basado en descomposición matricial, en el proceso se podría generar polos numéricos complejos y se podría encontrar también modos debido a señales de ruido en los registros, así como, aquellos correspondientes a modos no bien excitados o modos transitorios. La herramienta usada comúnmente para discriminar los polos físicos de los polos espurios se denomina el diagrama de estabilización. Se puede encontrar un estudio a fondo del uso de esta herramienta en Loh et. al (2012).

El método SSI-COV junto con la implementación de diagrama de estabilización es programado en MATLAB y ha sido utilizado en diversos trabajos de investigación, tal como en el análisis modal operacional de la torre de televisión de Cantón (China) de 600 m de altura (Liu-Kuan, et.al., 2012; Loh, et. al. 2013), como en un puente de arco (Loh, et. al. 2012).

Tanto las frecuencias naturales y las formas modales experimentales obtenidas con SSI-COV podrían servir de indicadores para cuantificar el daño, el primero indica la severidad del daño y el segundo su ubicación, cuando pueden ser comparados con una referencia. Además, cualquier anomalía en las formas modales experimentales puede señalar directamente zonas de daño sin necesidad de una referencia. Para la comparación de formas modales, se utiliza el “criterio de aseguramiento modal” (Modal Assurance Criterion, MAC por sus siglas en inglés), que en palabras sencillas mide el grado de correlación que hay entre dos vectores de formas modales:

$$MAC(u, v) = \frac{|u^T \cdot v|^2}{(u^T \cdot u)(v^T \cdot v)} \quad (2.2)$$

donde  $u$  es el vector de forma modal experimental y  $v$  es el analítico.

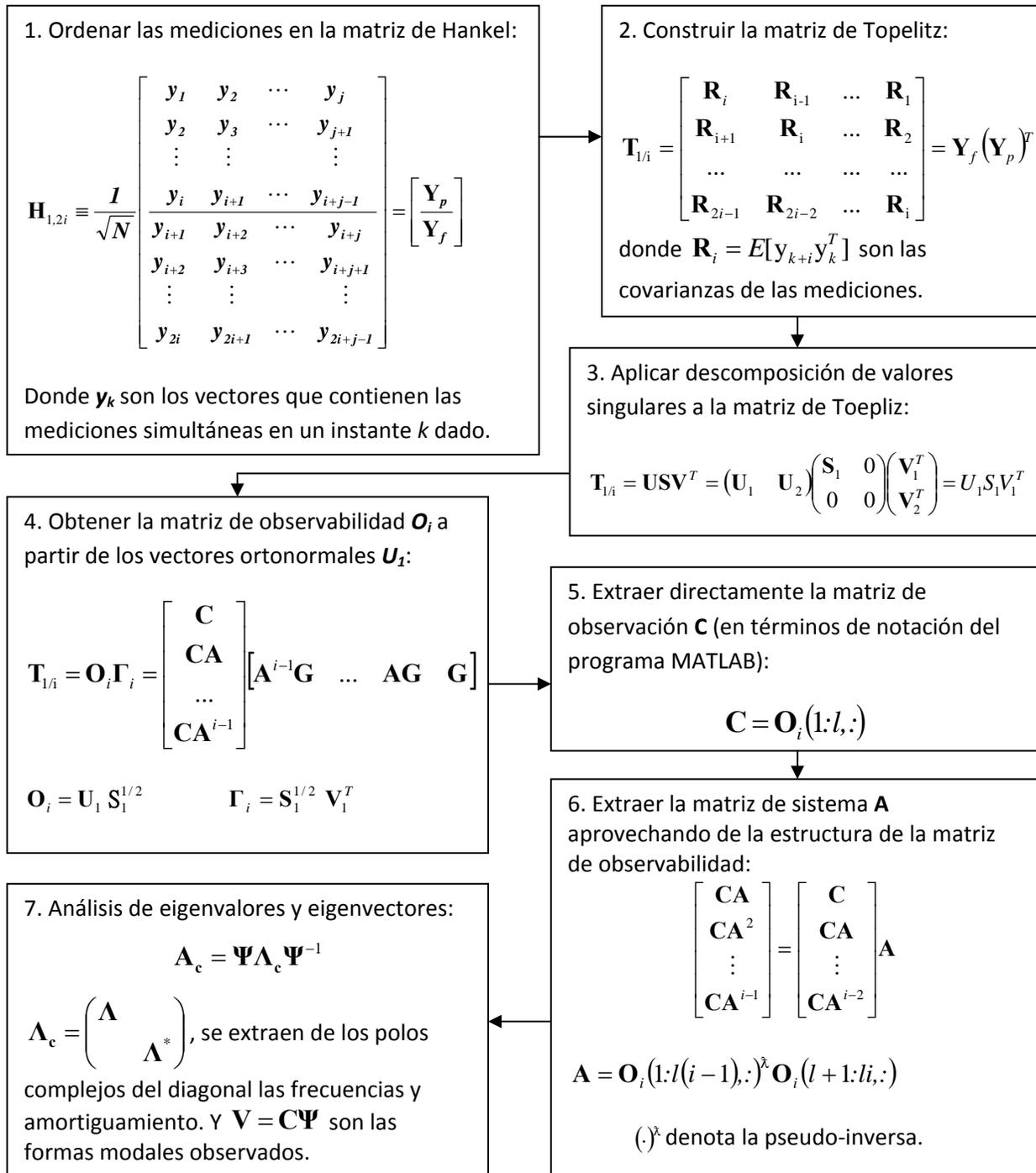
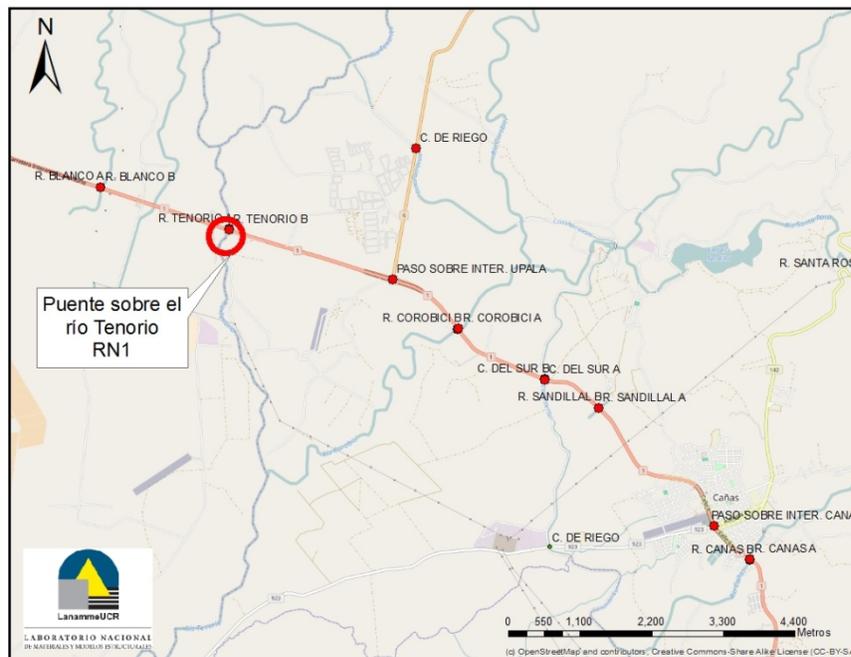


Figura 1. Diagrama de flujo del método SSI-COV

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El puente monitoreado se ubica en la Ruta Nacional No.1, en la sección de control 50020 y cruza el río Tenorio. Desde el punto de vista administrativo, se ubica en el límite de los distritos de Cañas y Bagaces, de los cantones de Cañas y Bagaces, en la provincia de Guanacaste. Sus coordenadas, en el sistema geográfico de ubicación, corresponden con: 10°28'00,37"N de latitud y 85°09'43,67" O de longitud. La figura 2 muestra la ubicación geográfica del puente.



**Figura 2.** Ubicación del puente sobre el río Tenorio.

La ruta clasifica como primaria y tiene un tránsito promedio diario (año 2012) de 7674 vehículos por día en la sección de control donde se ubica el puente, según el Anuario de tránsito 2015, publicado por la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT.

La Tabla No. 1 resume las características básicas del puente y las figuras 3 y 4 presentan dos de las vistas principales del puente, la vista a lo largo de la línea de centro y una vista

Informe No. LM-PI-UP-11-2016	Fecha de emisión: 09 de diciembre de 2016	Página 19 de 37
------------------------------	---	-----------------

lateral respectivamente. La figura 5 muestra la identificación utilizada en este informe cuando se hace referencia a ciertos elementos del puente.

**Tabla No 1.** Características básicas del puente sobre el río Tenorio.

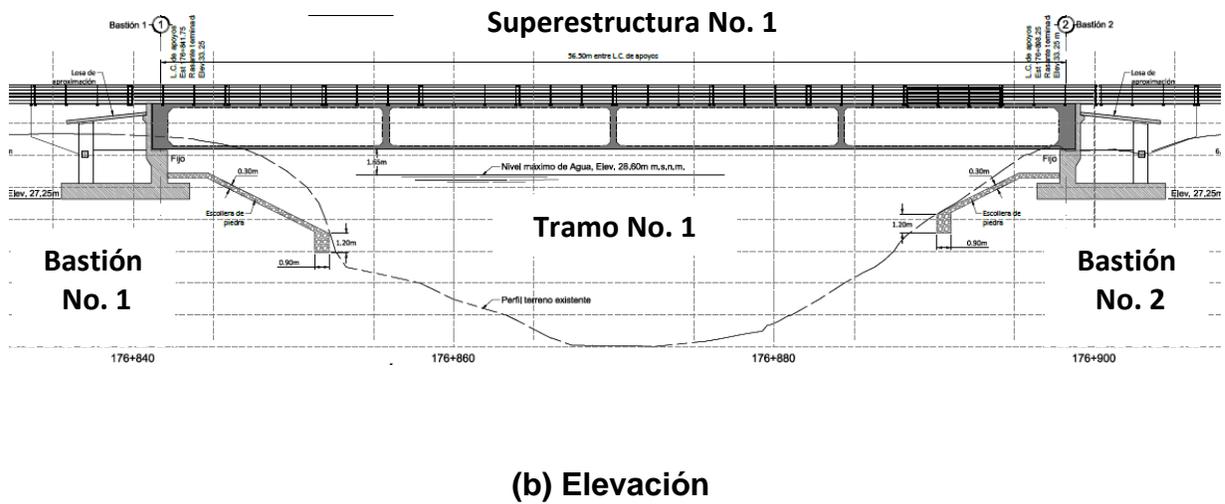
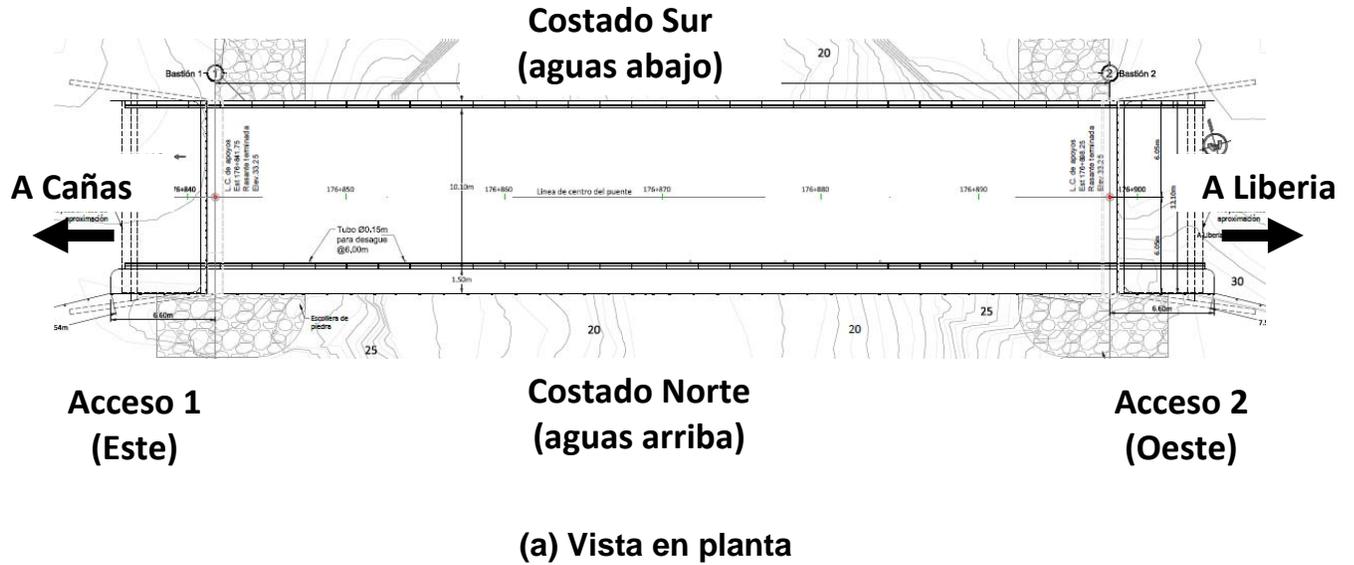
<b>Geometría</b>	Tipo de estructura	Puente
	Longitud total (m)	56.5
	Ancho total (m)	12,1
	Ancho de calzada (m)	9,6
	Número de tramos	1
	Alineación del puente	Recto
	Número de carriles	2 (1 en cada sentido)
<b>Superestructura</b>	Número de superestructuras	1
	Tipo de superestructura (elementos principales)	Tipo cajón con vigas principales de concreto preesforzado
	Tipo de tablero	Losa de concreto reforzado
<b>Subestructura</b>	Número de elementos	Bastiones: 2 Pilas: 0
	Tipo de bastiones	Ambos bastiones son tipo muro
	Tipo de pilas	NA
	Tipo de cimentación	Tipo placa
<b>Apoyos</b>	Tipo de apoyo en bastiones	Almohadillas elastoméricas reforzadas con placas de acero
	Tipo de apoyo en pilas	NA
<b>Diseño y construcción</b>	Año de construcción	2015
	Especificación de diseño original	AASHTO 2002
	Carga viva de diseño original	HS 20-44+25%
	Especificación utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación	NA
	Carga viva de diseño utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación	NA



**Figura 3:** Vista a lo largo de la línea de centro del puente sobre el río Tenorio.



**Figura 4:** Vista lateral del puente sobre el río Tenorio.



**Figura 5:** Esquema de la vista en elevación norte del puente.

## 6. ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Al tratarse de un puente de reciente construcción no se cuenta con informes de estado de la condición.

Se cuenta con los planos del diseño original del puente con fecha de marzo del 2014.

## 7. MÉTODO EXPERIMENTAL

A continuación se describirá de manera general el método experimental utilizado para realizar la prueba dinámica.

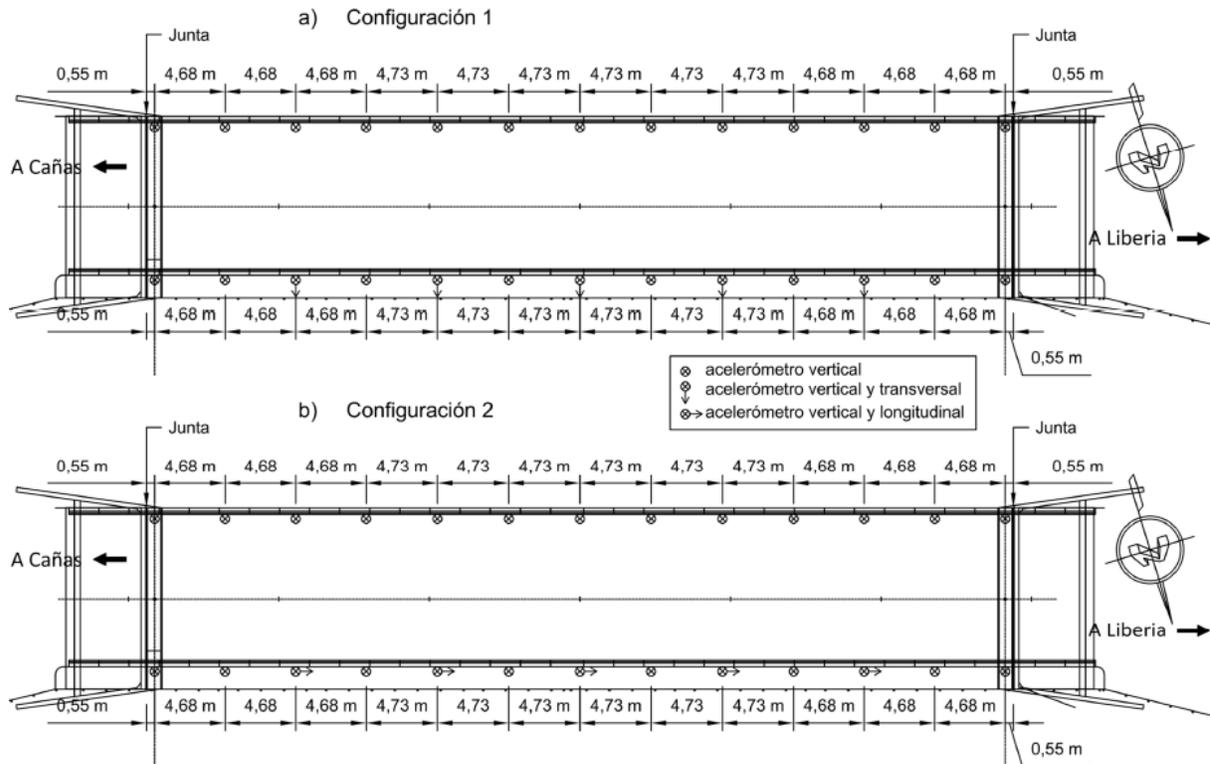
Se obtienen registros de aceleración inducida por las cargas operacionales sobre el puente en la dirección vertical. En la figura 10 se presenta la ubicación de sensores y unidades de adquisición de datos sobre las aceras del puente, sin interrupción del tránsito vehicular. En la figura 11 se presenta la distribución de sensores colocados sobre la estructura del puente, para las dos configuraciones utilizadas para monitorear toda la longitud del puente.

El sistema de adquisición de datos utilizado es un sistema portátil diseñado para monitoreo y evaluación de puentes sometidos a vibraciones, que consiste en 4 maletas que contienen en cada una de ellas una unidad de adquisición de datos con procesador en tiempo real, con sus módulos de GPS y de vibración, fuente de poder, y un nodo de señal inalámbrica para la comunicación entre el nodo de usuario y cada maleta.



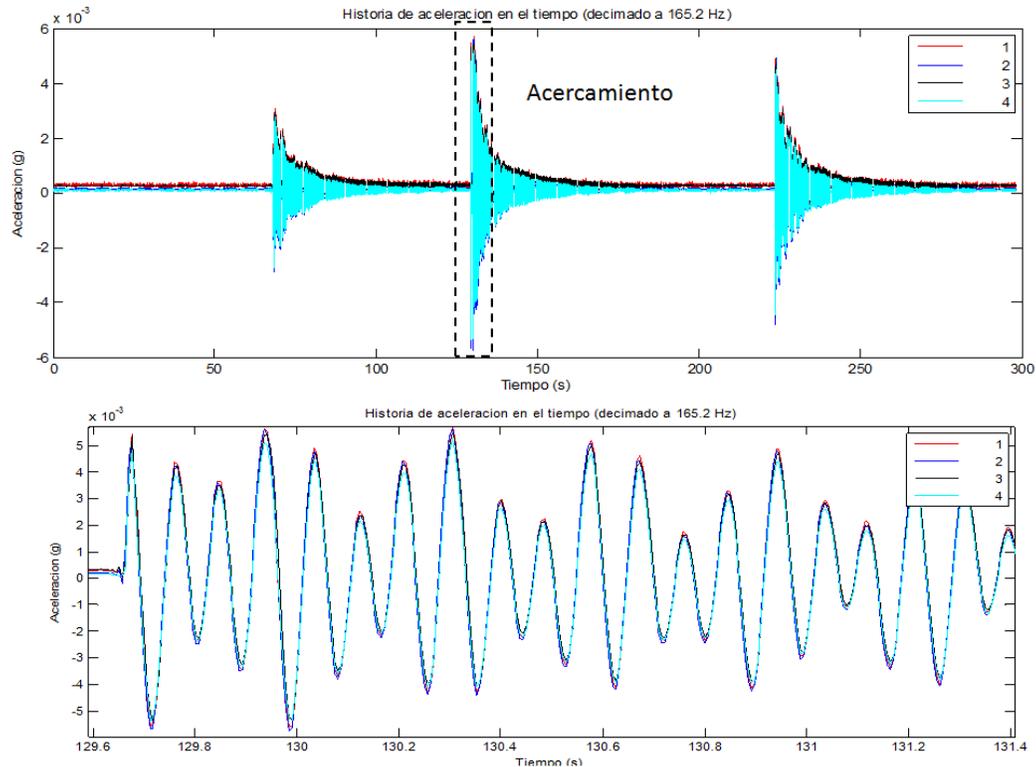
**Figura 10.** Colocación de sensores sobre las aceras del puente. El monitoreo no interrumpe el tránsito de vehículos.

Las unidades de adquisición de datos se comunican de forma inalámbrica con el nodo de usuario, mientras que los sensores lo hacen de forma cableada, siendo el sistema híbrido, o sea, que se comunica cableado e inalámbricamente. Los datos capturados por las unidades de adquisición de datos son sincronizados por GPS, y el algoritmo de adquisición de datos y sincronización fue implementado y verificado previamente por el equipo investigador. La sincronización de los datos es esencial para poder implementar correctamente el método SSI, en la figura 12 se presenta un ejemplo de sincronización de datos de cuatro sensores de aceleración, conectados a las 4 unidades de adquisición independientemente e instalados en una estructura sencilla en oscilación libre en laboratorio para propósitos de validación del sistema (Liu-Kuan, et. al, 2015).



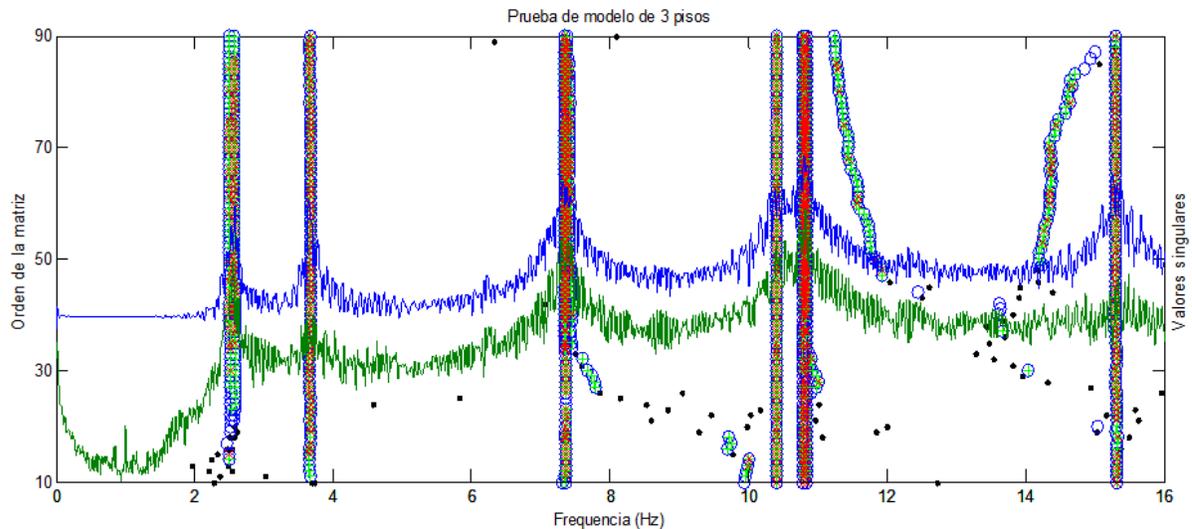
**Figura 11.** Distribución de sensores sobre el puente (Montalto-Bolaños, 2016).

La captura de datos se realiza por periodos definidos y divididos en bloques de 5 minutos para las dos configuraciones definidas y con el tránsito en operación (ver figura 10). La tasa de muestreo en campo es de 1652 Hz (datos por segundo), y los datos obtenidos en campo son llevados a la oficina para su análisis, donde se obtienen las frecuencias y formas modales operacionales de la estructura. Los datos adquiridos deben ser revisados en forma exhaustiva canal por canal y pasar por filtros para estar en el rango de frecuencias que favorecen la identificación de los modos de vibración del puente. En caso de puentes con daños severos donde el comportamiento no-lineal inelástico es dominante, técnicas más avanzadas de pre-procesamiento puede ser requeridas para “linealizar” señales debido a la no-linealidad de la estructura y tratar de identificar un modelo “linealmente equivalente”.



**Figura 12.** Registros de aceleración sincronizados de cuatro sensores de aceleración instalados sobre una estructura sencilla (Liu-Kuan, et. al, 2015).

Las frecuencias naturales de la estructura son determinadas a partir del diagrama de estabilización como el mostrado en la figura 13, a manera de ejemplo, el cual corresponde a la estructura sencilla utilizada en laboratorio (modelo de 3 pisos) para la validación de sistema de adquisición de datos. Únicamente aquellos modos (parámetros modales) que se estabilizan conforme aumenta el orden de la matriz de Toeplitz se tomarán en cuenta, caso contrario podría tratarse de modos transitorios o modos no bien excitados de los que no se obtendrá buena calidad y certeza en su identificación.

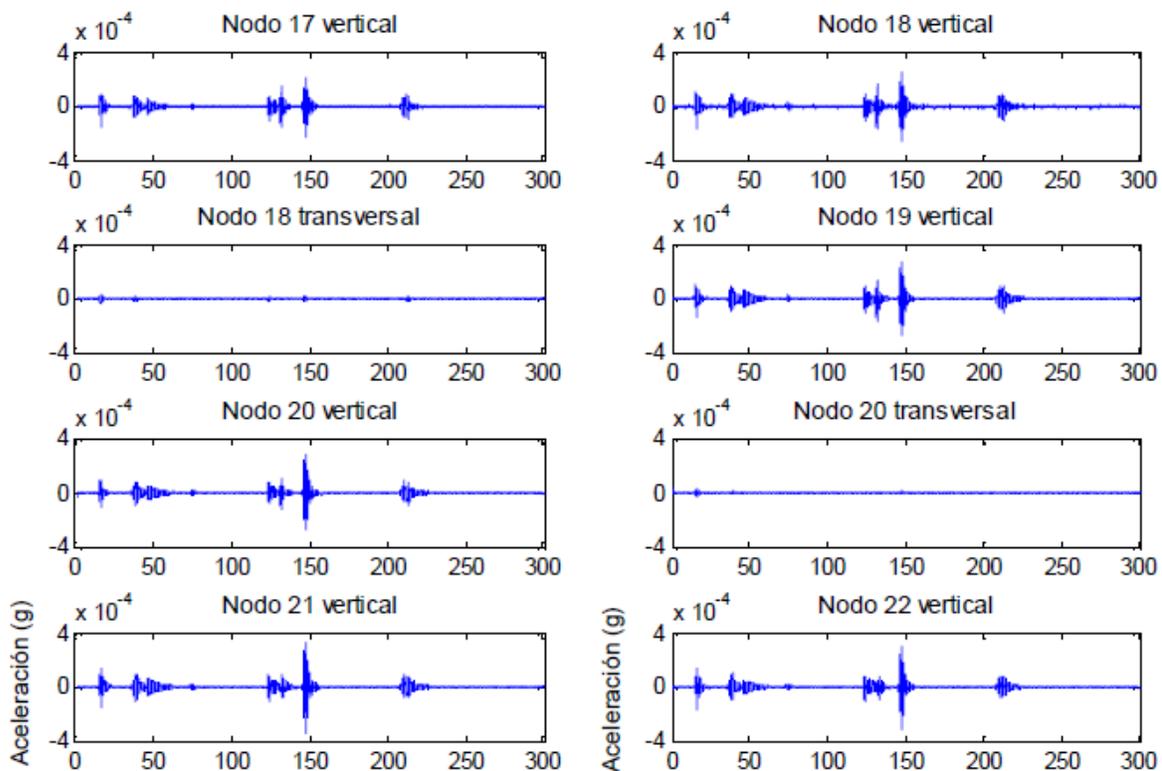


**Figura 13.** Diagrama de estabilización de frecuencias de una estructura sencilla (Liu-Kuan, et. al, 2015).

Además, en el fondo y superpuesto al diagrama de estabilización de la figura 13 se encuentra el resultado del método de “Descomposición en el Dominio de Frecuencias” (Frequency Domain Decomposition, FDD por sus siglas en inglés), el cual similarmente es un método de subespacios en el dominio de frecuencias que consiste en aplicar Descomposición de Valores Singulares de la matriz de densidad espectral cruzada. Los dos primeros valores singulares de la matriz descompuesta (representados con líneas azul y verde) son graficados en conjunto con el diagrama de estabilización permitiendo así visualizar todavía mejor las señales adquiridas y sus componentes armónicos.

## 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

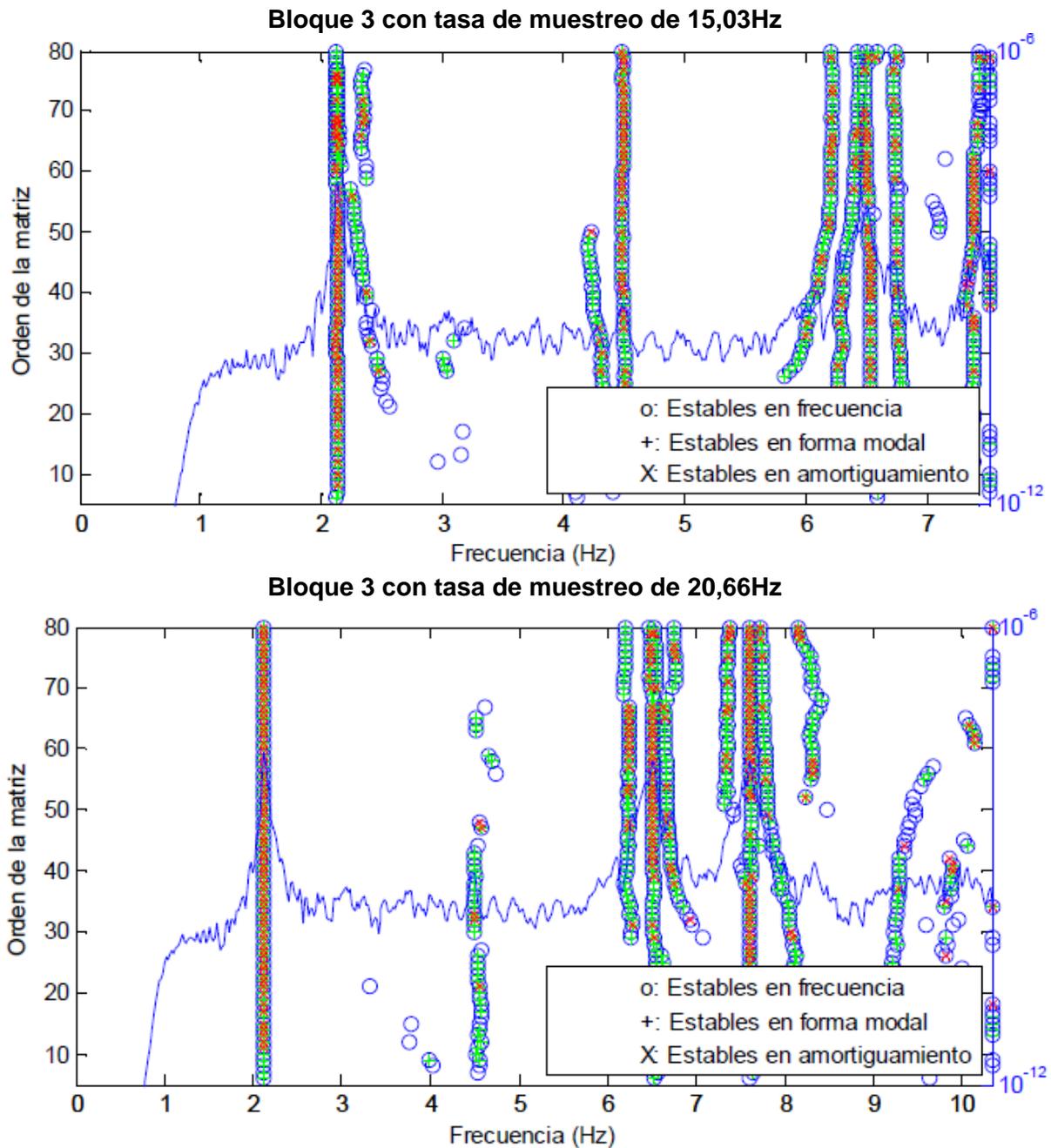
En la figura 14 se presentan, a modo de ejemplo, los registros de aceleración vertical de 6 nodos del costado aguas arriba del puente en un periodo de 5 minutos, todos con la misma escala de aceleración, donde en el eje horizontal muestra el tiempo y en el eje vertical se grafica la aceleración vertical en unidades de fracciones de la aceleración gravitacional “g”.



**Figura 14.** Registros de aceleración vertical del primer bloque de datos (Montalto-Bolaños, 2016).

Cada bloque de 5 minutos de medición es utilizado como datos de entrada para el método SSI-COV. En la figura 15 se presenta el diagrama de estabilización resultado del análisis de distintos bloques de datos correspondientes a las dos configuraciones (ver configuraciones 1 y 2 en la figuras 11 y 12), con una decimación de la frecuencia de muestreo hasta 13.77 Hz

para facilitar la identificación de frecuencias bajas, y el orden del sistema a identificar se definió como 20 en el caso de los gráficos de la figura 15.



**Figura 15.** Diagramas de estabilización (Montalto-Bolaños, 2016).

Informe No. LM-PI-UP-11-2016	Fecha de emisión: 09 de diciembre de 2016	Página 29 de 37
------------------------------	---	-----------------

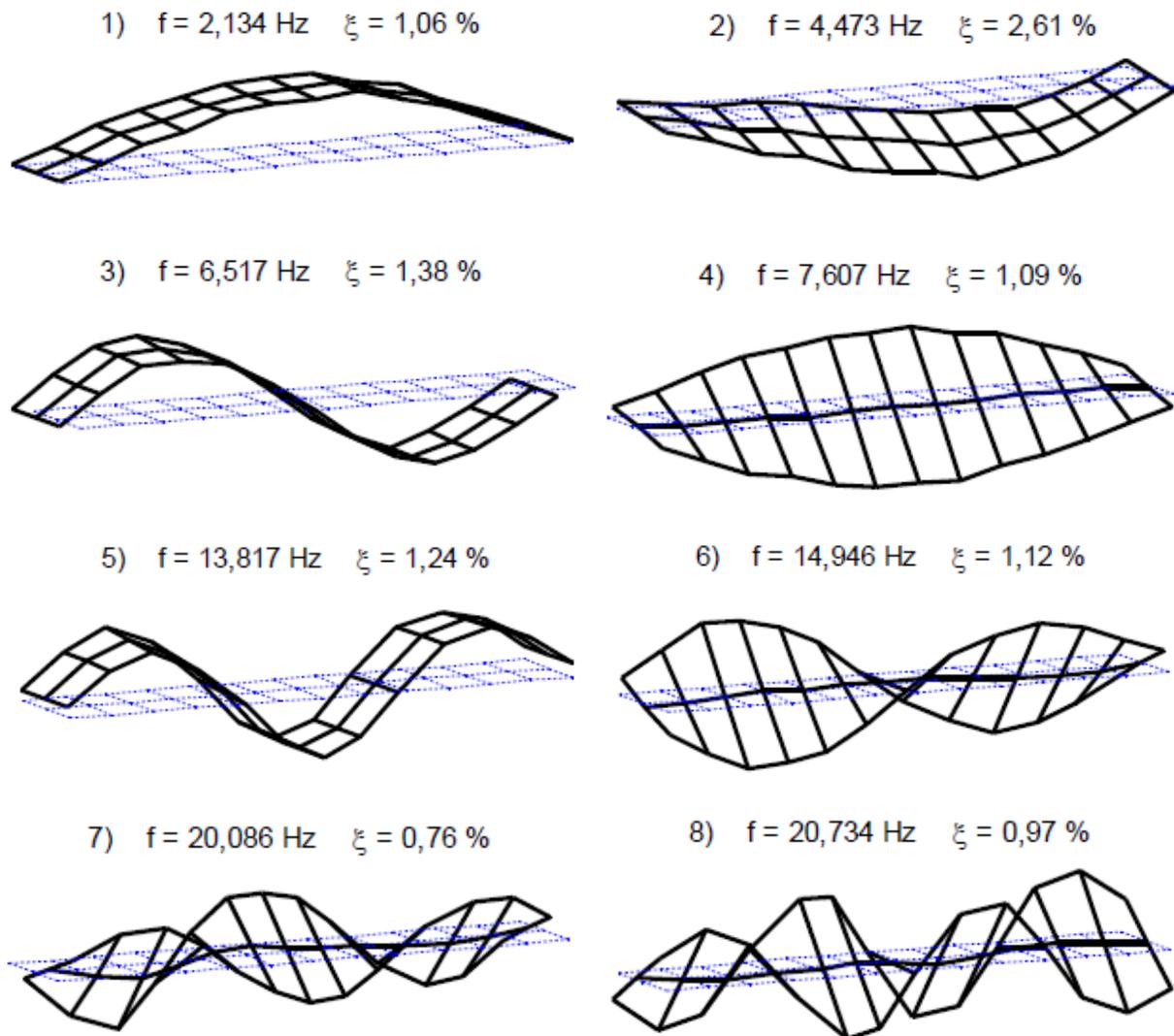
El criterio de estabilización utilizado para el análisis del puente sobre el río Tenorio (Ruta No. 1) es considerar que las frecuencias son estables si existe menos de 1% de diferencia entre las calculadas por el orden de matriz  $n-1$  y por el orden  $n$ , en cuanto a formas modales 3%, y con respecto a amortiguamiento 5%. Un círculo azul en el diagrama de estabilización indica modos con frecuencia estable; el círculo azul con una equis (x) roja indica que tanto la frecuencia como forma modal son estables; y si se tuviera, además de las anteriores, una cruz verde (+), indica que el amortiguamiento también es estable.

Debido a que no todos los modos son excitados en un lapso de tiempo dado, se debe revisar todos los bloques de datos obtenidos en campo y discriminar los modos de acuerdo con su frecuencia y forma modal, de forma que se puede obtener un rango de valores de frecuencias naturales a partir de cada bloque de datos. En la Tabla No. 3 se resume las frecuencias naturales identificadas, en la segunda columna se presenta el promedio de las frecuencias identificadas correspondientes al modo descrito en la primera columna. Lo anterior se debe a la aleatoriedad de las cargas que circulan sobre el puente en el momento de la toma de registros de datos de aceleración vertical.

**Tabla No. 3.** Resumen de las formas modales operacionales identificadas.

Descripción de la forma modal	Frecuencia Promedio (Hz)	Cantidad de veces identificada
Flexión vertical 1	<b>2,134</b>	8
Flexión transversal 1	<b>4,473</b>	1
Flexión vertical 2	<b>6,517</b>	8
Torsión 1	<b>7,607</b>	9
Flexión vertical 3	<b>13,817</b>	8
Torsión 2	<b>14,946</b>	9
Torsión 3	<b>20,086</b>	7
Torsión 4	<b>20,734</b>	5
Flexión vertical 4	<b>21,276</b>	8

En la figura 16 se presenta ocho de las formas modales experimentales correspondientes a los diferentes modos de vibración identificados en las dos configuraciones en las que se muestreó datos de aceleración. Cabe mencionar que las coordenadas de las formas modales experimentales de los nodos son extraídas directamente de los registros de aceleración por el método SSI-COV, no se basa en un análisis con modelos analíticos, por lo tanto son uno de los resultados más importantes para la detección de daño.



**Figura 16.** Formas modales experimentales identificadas (Montalto-Bolaños, 2016).

## 9. CALIBRACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO

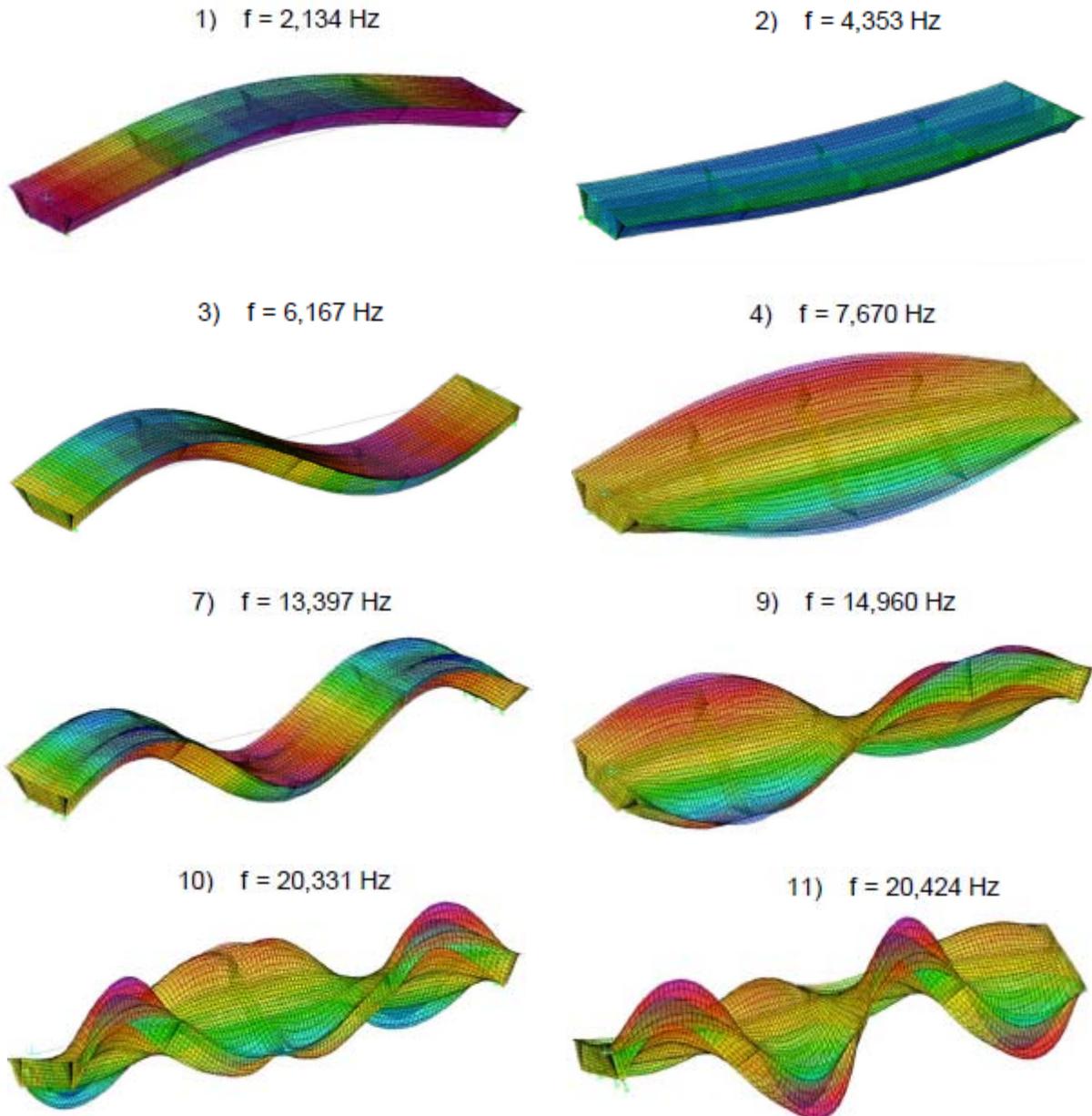
Con el fin de contar con una base que permita dar seguimiento al estado de conservación del puente y relacionarlo con su comportamiento dinámico se procedió a construir un modelo analítico de elementos finitos.

Dicho modelo es calibrado con base en los resultados experimentales del puente en su estado inicial el cual se supone que es sin daño. Los detalles de la calibración del modelo analítico se encuentran en el trabajo de investigación de Montalto-Bolaños (2016).

En la figura 17 se presenta las formas modales y frecuencias obtenidas del modelo analítico calibrado, correspondientes a los 8 modos de oscilación presentados en la figura 16. Se debe mencionar que la cantidad de modos identificados analíticamente es superior a la cantidad de modos experimentales.

Al reflejar las condiciones del puente en su estado sano, o sea sin daño, este modelo servirá para estimar la pérdida de la rigidez del puente ante eventuales deterioros provocados por carga vehicular o eventos extraordinarios.

Realizando monitoreos periódicos que permitan determinar las características dinámicas de la estructura en diferentes etapas de su vida útil, se pueden recalibrar el modelo inicial para estimar la pérdida de rigidez de la estructura con base en los cambios en las frecuencias de los modos de oscilación.



**Figura 17.** Formas modales analíticas extraídas del modelo de elementos finitos calibrado (Montalto-Bolaños, 2016).

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este informe se presentan los resultados del monitoreo de la superestructura del puente sobre el río Tenorio ubicado en la Ruta Nacional No. 1. Los resultados experimentales corresponden a una prueba de carga dinámica, con carga operacional.

Con base en el análisis realizado y la información disponible se concluye lo siguiente:

- a. Se logró obtener los modos y frecuencias de oscilación de la estructura en su estado sano, como es de esperar no se identificaron anomalías en el comportamiento modal.
- b. Con base en los resultados experimentales se realizó la calibración de un modelo analítico de elementos finitos, el cual puede ser utilizado para estimar la pérdida de rigidez de la estructura en etapas futuras de su operación o después de eventos extraordinarios.

Por lo tanto, con el propósito de mejorar el estado de conservación de la estructura se recomienda a la Administración realizar las siguientes acciones:

1. Realizar inspecciones visuales periódicas a la estructura para detectar eventuales daños.
2. Realizar monitoreo periódico del puente con pruebas de carga dinámica.
3. Establecer un programa de mantenimiento que incluya entre otras labores: mantenimiento de la demarcación vertical y horizontal, limpieza de bordillos, aplicación de un sistema de protección contra la corrosión, mantenimiento de juntas de expansión, mantenimiento de los apoyos, sellado de grietas no estructurales, etc.
4. Cuando el puente presente deficiencias que no puedan resolverse con labores de mantenimiento periódico, realizar inspecciones detalladas para determinar las medidas correctivas a implementar para extender la vida útil del puente.

## 11. REFERENCIAS

1. Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., Shevitz, D. W. "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review". LA-13070-MS Los Alamos National Laboratory (LANL).
2. Lui-Kuan, Y.C., Castillo-Barahona, R., Loria-Salazar, L.G. "Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico". LM-PI-UP-02-2013. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Febrero, 2013.
3. Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. "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.
4. Weng et al. "Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems". Engineering Structures 30 (2008) 1820–1830.
5. Chin-Hsiung Loh, Ming-Che Chen and Shu-Hsien Chao. "Stochastic subspace identification for operational modal analysis of an arch bridge". Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834504 (April 26, 2012); doi:10.1117/12.912514.
6. Wei-Xin Ren and Zhou-Hong Zong. "Output-only modal parameter identification of civil engineering structures". Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4 (2004).
7. Peeters, Bart. "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.
8. Brad A. Pridham & John C. Wilson. "Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge". IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics, 2002
9. Basseville M., Benveniste A., Goursat M. "Output-Only Subspace-Based Structural Identification: From Theory to Industrial Testing Practice". Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, December, 2001.

10. Giraldo, Diego F.; Song, Wei; Dyke, Shirley J.; and Caicedo, Juan M.. "Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study". J. Engrg. Mech. 135, 759 (2009).
11. Van Overschee, P. and De Moor, B. "Subspace Identification for Linear Systems: Theory - Implementation - Applications". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.
12. Chin-Hsiung Loh, Yi-Cheng Liu, Yi-Qing Ni. SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements. Smart Structures and Systems, Vol. 10, No. 4-5 (2012) 331-351.
13. Chin-Hsiung Loh, Yi-Cheng Liu, Tzung-Han Wu, Yi-Qing Ni. Variation of Modal Parameters of Canton Tower Under Different Earthquake excitations. Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong, 9-11 December 2013
14. Collins, M.P., Mitchell, D. "Prestressed Concrete Structures". Response Publications, Ontario, Canada, 1997.
15. Sauvageot, G. "Segmental Concrete Bridges". Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. CRC Press, Boca Raton, 2000.
16. Takács, P.F. "Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling". Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, The Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway, March, 2002.
17. AASHTO. "The Manual of Bridge Evaluation". Second Edition. Washington, DC. 2011.
18. Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
19. Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *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.

20. Liu-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *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.

21. Agüero-Barrantes, P., Liu-Kuan, Y.C, Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Monitoreo estructural del puente sobre el río Seco Ruta Nacional No.1 LM-PI-UP-PN20-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

22. Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., et al. (2015). *Actualización de los criterios para la evaluación visual de puentes LM-PI-UP-05-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

23. Montalto-Bolaños (2016). *Calibración del modelo de elemento finito del puente sobre el río Tenorio en la Ruta Nacional 1 con base en análisis modal operacional*. Trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitario Rodrigo Facio. San Pedro, Montes de Oca.