

# Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes

## Requirements Analysis for a National Bridge Monitoring System

César Garita<sup>1</sup>, Giannina Ortiz<sup>2</sup>, Juliana Mora-Mora<sup>3</sup>

---

*Fecha de recepción: 26 de febrero de 2018*  
*Fecha de aprobación: 13 de mayo de 2018*

Garita, C; Ortiz, G; Mora-Mora, J. Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-4. Octubre-Diciembre 2018. Pág 63-72.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3965>



- 1 Dr. en Ciencias de la Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Computación, Costa Rica. Correo electrónico: cesar@itcr.ac.cr.
- 2 Ing. en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción, Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@itcr.ac.cr.
- 3 Estudiante de Administración de Tecnologías de Información, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Computación, Costa Rica. Correo electrónico: julianamora93@gmail.com

## Palabras clave

Monitoreo de salud de estructuras; puentes; análisis; requerimientos; sistema.

## Resumen

Los puentes representan un componente fundamental de la infraestructura vial de cualquier país. Daños y deficiencias en puentes pueden tener un impacto directo en la ejecución de actividades socio-económicas de la población en general. En Costa Rica, aún no se cuenta con un inventario completo de puentes en rutas nacionales por lo que resulta muy difícil conocer su condición real para poder diseñar y desarrollar un adecuado plan de mantenimiento e intervención a largo plazo, así como priorizar mejor la inversión de recursos estatales. Para abordar este problema, el proyecto de investigación e-Bridge 3.0 planteado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, tiene como objetivo principal diseñar un prototipo de un sistema de monitoreo de puentes que permita integrar información de las estructuras existentes con el fin de apoyar la toma de decisiones por parte de diversos actores e instituciones en el área de gestión vial. Como base para el diseño del prototipo, se realizó una fase de análisis de requerimientos, incluyendo una revisión de trabajos relacionados y una comparación detallada de sistemas existentes que condujeron a la identificación de los actores, la información y los procesos principales que deben ser tomados en cuenta por un sistema de este tipo. También se llevó a cabo un taller de consulta con un grupo de potenciales usuarios del sistema para validar los requerimientos. Este artículo resume los resultados obtenidos del análisis de los requerimientos funcionales más importantes que debe considerar un sistema nacional de monitoreo de puentes.

## Keywords

Structure health monitoring; bridges; analysis; requirements; system.

## Abstract

Bridges represent a fundamental component of the road infrastructure of any country. Damages and deficiencies in bridges can have a direct impact on the execution of socio-economic activities of the general population. In Costa Rica, a complete inventory of bridges on national routes is not yet available, so it is very difficult to know their real condition to design and develop an adequate long-term maintenance and intervention plan, as well as to prioritize the investment of governmental resources. To address this problem, the e-Bridge 3.0 research project at the Technological Institute of Costa Rica, has as its main objective to design a prototype of a bridge monitoring system that allows the integration of information from existing bridge structures in order to support the decision making by various actors and institutions in the area of road management. As a basis for the design of the prototype, a phase of requirements analysis was carried out, including a review of related works and a detailed comparison of existing systems that led to the identification of the actors, information and main processes that should be taken into account for a system of this type. A workshop was also held with a group of potential users of the system to validate the requirements. This article summarizes the results obtained from the analysis of the most important functional requirements for a national bridge monitoring system.

## Introducción

En Costa Rica, la condición de las rutas vehiculares representa una fuerte debilidad en términos de competitividad y desarrollo económico [1]. Los puentes son quizás el componente más importante de la infraestructura vial, debido a que se convierten en el principal cuello de botella en cuanto a capacidad de carga y funcionalidad de tráfico, y en caso de colapso, la ruta completa queda fuera de operación. Además, típicamente representan el componente más caro por metro lineal en la construcción de carreteras.

A pesar de su clara importancia, actualmente no se cuenta con un inventario nacional que permita determinar la cantidad exacta de puentes existentes y su condición específica. La mayoría de estas estructuras fueron construidas hace más de 30 años y la inversión en mantenimiento y actualización ha sido mínima. Esto ha conducido a que muchos puentes presenten daños o deficiencias detectables visualmente en diferentes elementos de la estructura tales como seguridad vial, losas, juntas de expansión y drenajes. Según evaluaciones realizadas por el Programa de Evaluación de Puentes del TEC, gran cantidad de estos problemas son producto de la falta de un plan de monitoreo y mantenimiento continuo de las estructuras, de tal manera que las intervenciones requeridas se realicen a tiempo.

En este contexto, el proyecto de investigación e-Bridge 3.0 planteado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, busca diseñar un prototipo de un sistema de monitoreo de estructuras de puentes que permita integrar información de las estructuras existentes y su caracterización para una mejor toma de decisiones [2], [3]. Los datos generados por dicho sistema servirían de referencia para la generación de planes adecuados de mantenimiento con base en la condición real de los puentes nacionales. De esta forma, el sistema propuesto contribuiría a mejorar la competitividad del país en el área crítica de infraestructura vial.

Como un primer paso hacia este objetivo, este artículo presenta los resultados obtenidos del análisis de requerimientos llevado a cabo con el fin de identificar los procesos, los actores y la información más importantes que debe considerar un sistema de monitoreo de puentes como el descrito anteriormente. El análisis incluyó una revisión de trabajos relacionados, una evaluación comparativa de sistemas similares desarrollados internacionalmente, y una identificación de los principales procesos que debe incorporar el diseño del sistema propuesto. Para validar los resultados del análisis, se organizó un taller con usuarios potenciales del sistema que retroalimentaron el trabajo con su criterio experto. Estas tareas se describen en las siguientes secciones de este artículo.

## Trabajos relacionados

En esta sección se provee una revisión del estado del arte de trabajos relacionados con la caracterización de sistemas de monitoreo de puentes.

El reporte [4], se hace una descripción de sistemas de monitoreo de la salud de puentes, abarcando aspectos generales como características, ventajas y desventajas de estos sistemas. Por otro lado, en [5] se detalla el diseño de un sistema de gestión de puentes con base en un estudio de diferentes sistemas de monitoreo de puentes a nivel mundial. El enfoque del trabajo consiste en seleccionar los criterios de priorización de la inversión y ordenarlos jerárquicamente según las necesidades de mantenimiento de las diferentes estructuras.

El estudio descrito en [6], revisa diferentes sistemas actuales de gestión de puentes utilizados en diferentes partes del mundo para comprender las prácticas aplicadas para determinar las condiciones de puentes y ayudar en el proceso de toma de decisiones acerca de su gestión. Este estudio también abarca aspectos como el desarrollo de modelos para predecir la condición

de puente con el tiempo, el análisis de los distintos costos de usuario y el uso de diferentes técnicas de optimización para asignar mejor las finanzas y optimizar el rendimiento del puente.

En [7], se presenta una revisión de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con monitoreo de salud estructural con énfasis en estructuras de puentes incluyendo sistemas de monitoreo existentes.

En cuanto a sistemas nacionales, en el boletín informático [8], se realiza una comparación general entre el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP) utilizado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) de Costa Rica y el sistema Pontis, utilizado en Estados Unidos. Además, la iniciativa e-Bridge del TEC, orientada al desarrollo de diferentes soluciones para la gestión de puentes, ha sido descrita en detalle en [9], [2], [10], [11].

## Análisis de sistemas existentes

En esta sección se presenta un análisis comparativo de los procesos o funcionalidades principales que ofrecen diferentes sistemas de monitoreo de puentes a nivel mundial. Para realizar el análisis se siguieron los siguientes pasos: definición de un conjunto de criterios de evaluación; selección de los sistemas a comparar; y evaluación de los criterios en los sistemas. Este análisis fue realizado en base en la investigación descrita en la sección anterior, así como en el criterio experto del equipo de trabajo de e-Bridge 3.0.

### Definición de criterios

El cuadro 1 muestra los criterios de evaluación seleccionados; estos criterios corresponden con funciones que tienen o deben tener los sistemas de monitoreo de puentes. Para facilitar su comprensión fueron clasificados por áreas.

### Selección de sistemas

A partir de la revisión bibliográfica realizada se identificaron algunos sistemas de monitoreo de puentes, que podrían contener entre sus funciones algunos de los criterios de evaluación previamente definidos. Los sistemas identificados en la revisión bibliográfica son:

1. *SIPUMEX*: es un sistema integral para la administración de puentes de la red federal de carreteras en México [12].
2. *LTBP (Long-Term Bridge Performance)*: es un programa que ha recopilado información sobre los puentes de carreteras nacionales desde hace 20 años, autorizado por el Congreso de Estados Unidos, para comprender mejor el rendimiento del puente. Contiene un conjunto de herramientas basadas en datos, incluyendo modelos predictivos para optimizar la gestión de los puentes [13].
3. *BRIMOS*: es un sistema que consta de varios sensores, redes de transmisión de datos de alta velocidad y un centro de información que recopila y difunde información de alto nivel sobre el comportamiento del puente [14].
4. *SMH Live (Structural Health Monitoring Live)*: es una solución integrada para el monitoreo de salud estructural incluyendo el diseño óptimo de un sistema de monitoreo de salud estructural [15].
5. *Pontis*: Es un sistema de gestión de puentes utilizado por Departamentos de Transporte de los Estados Unidos y por múltiples agencias de transporte de países alrededor del mundo como Hungría, Italia y varias agencias australianas, para apoyar su labor de gestión de puentes [8].

6. *SAEP (Sistema de Administración de Estructuras de Puentes)*: es un sistema que se utiliza en Costa Rica por el MOPT para realizar la gestión de puentes nacionales [8].
7. *E-Bridge 2.0*: es un sistema integrador de información estratégica que es generada por los otros componentes (sistema de información técnica, sistema de información geográfica, sistemas de sensores, modelos de fiabilidad) [9].
8. *Prototipo Chile (Nicolás Felipe Molina Schulz)*: consiste en un diseño básico de un Sistema de Gestión de Puentes, determinando los módulos necesarios para obtener un sistema útil y aplicable, que permita la priorización de la inversión, por medio de un método transparente [5].

**Cuadro 1.** Criterios de Evaluación.

Área	Criterio	Descripción
Modelo estructural	Administración de información técnica	Gestión de información básica y aspectos técnicos de puentes.
	Modelo de fiabilidad	Modelo probabilístico para estimar el comportamiento estructural de puentes.
	Inspección	Almacena la información de inspecciones realizadas.
Gestión de información	Inteligencia de negocios	Análisis de datos e información con base en técnicas de inteligencia de negocios.
	Red de comunicación	Canal de comunicación utilizado para transferir datos entre el registrador de datos y el encargado de realizar el análisis.
	Integración de información	Proporcionar un único punto de entrada a los usuarios para consultar la información estratégica de diferentes componentes.
	Aplicación para dispositivos móviles	Programa se accede directamente desde el celular o cualquier dispositivo móvil.
Información geográfica	Riesgo ambiental	Análisis ambiental, para prevención o en caso de que un daño ambiental afecte la estructura del puente.
	Sistema de información geográfico	Proporcionar acceso a la información geoespacial necesaria para evaluar adecuadamente aspectos ambientales.
Administración de mantenimiento	Priorización	Priorizar las actividades de mantenimiento en base a la condición de las estructuras.
	Proyección	Proyectar a varios años escenarios de reparación o remplazo.
	Predicción	Predecir fallas y vida útil de los puentes.
	Gestión de presupuesto	Incorporar restricciones de presupuesto para priorizar las actividades de mantenimiento con base en fondos disponibles.
	Gestión de costos	Modelo que permite cuantificar los costos de inspección, mantenimiento, reparación fallas, entre otros.
	Generación de reportes	Genera un reporte en documento PDF, EXCELL, XML o lo visualiza en el sistema.
Monitoreo	Monitoreo automático de estructuras	Tipos de monitoreo realizado. Permanente, o periódico.

### Comparación de sistemas

A partir de los sistemas de monitoreo de puentes seleccionados y los criterios identificados en las subsecciones anteriores, se generó una tabla comparativa para facilitar el análisis de las funciones ofrecidas por los sistemas estudiados. El cuadro 2 resume el resultado obtenido. En cada celda de la tabla se indica si el sistema cumple o no con la funcionalidad respectiva o bien si no se encontró suficiente información para determinarlo.

**Cuadro 2.** Evaluación de los Sistemas de Monitoreo de Puentes.

	SIPUMEX	LTBP	BRIMOS	SMH Live	Pontis	SAEP	E-Bridge 2.0	Prototipo Chile
Administración de información técnica	Si.	Si.	Si.	-	Si.	Si.	Si.	Si.
Modelo de fiabilidad	Si.	-	-	-	-	-	Si.	-
Inspección	-	Si.	Si.	-	Si.	Si.	Si.	Si.
Inteligencia de negocios	-	-	-	-	-	-	Si.	-
Red de comunicación	Si.	No.	-	Si.	-	No.	Si.	No.
Integración de información	-	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	-
Aplicación para dispositivos móviles	No.	No.	No.	No.	No.	No.	Si.	No.
Riesgo ambiental	Si.	-	Si.	-	-	-	No.	-
Sistema de información geográfico	-	-	Si.	No.	-	Si.	Si.	Si.
Priorización	Si.	-	Si.	-	Si.	Si.	No.	No.
Proyección	-	-	-	-	Si.	-	No.	No.
Predicción	Si.	-	Si.	Si.	Si.	No.	No.	No.
Gestión de presupuesto	-	-	-	-	-	No.	No.	No.
Gestión de costos	Si.	Si.	-	-	Si.	Si.	No.	Si.
Generación de reportes	Si.	-	Si.	Si.	Si.	Si.	Si.	-
Monitoreo automático	Si.	No.	Si.	Si.	-	-	Si.	No.

### Identificación de actores, información y procesos principales

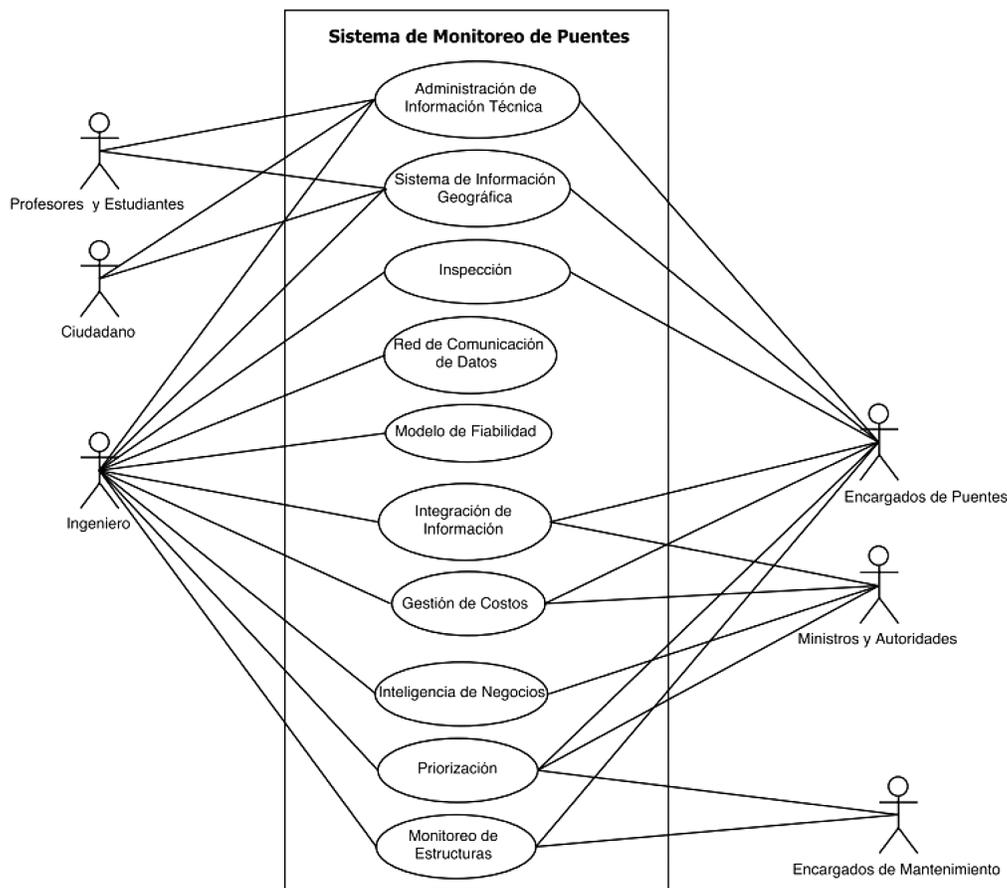
A partir de la comparación desarrollada en la sección anterior, se realizó una evaluación para seleccionar los procesos prioritarios que se deben desarrollar en un sistema de monitoreo de puentes. Con base en los procesos seleccionados se identificaron los actores interesados y su motivación. El cuadro 3 muestra los procesos y actores seleccionados.

#### Casos de uso

Los procesos y actores identificados en la sección anterior, fueron documentados en detalle mediante la casos de uso para especificar los requerimientos de sistemas computacionales (ver p.ej. [16]). En la figura 1, se presenta un diagrama que resume los casos de uso desarrollados. Cabe mencionar que los actores más importantes tienen interés en casi todos los procesos del sistema de monitoreo de puentes, sin embargo, existen actores como profesores y estudiantes que solo tienen interés en ciertas funciones específicas tales como información básica del puente.

**Cuadro 3.** Procesos y actores principales para un sistema de monitoreo de puentes.

Procesos	Actores	Motivación
Administración de Información Técnica	Ingeniero	-Administrar información de puentes.
	Ciudadano	-Interesado en información básica del puente (ubicación, año de construcción, nombre, capacidad, altura, etc.).
	Profesores y Estudiantes	
	Encargados de Puentes	-Interesados en información básica del puente, su estado, planes de intervención, historial de mantenimiento.
Modelo de Fiabilidad	Ingeniero	-Obtener el índice de fiabilidad de los puentes.
Inspección	Ingeniero	-Obtener información sobre el estado de los puentes.
	Encargados de Puentes	
Inteligencia de Negocios	Ingeniero	-Obtener información básica y del estado de los puentes mediante un sitio web.
	Ministros y Autoridades	-Visualizar información gráficamente. -Toma de decisiones más rápida y acertada.
Red de Comunicación	Ingeniero	-Obtener información del comportamiento de los puentes.
Integración de Información	Ingeniero	-Obtener información de puentes mediante un flujo de trabajo científico, el cual integra diferentes aplicaciones.
	Encargados de Puentes	
	Ministros y Autoridades	
Sistema de Información Geográfica	Ingeniero	-Administrar el geo portal, riesgos de la infraestructura y mapas de mantenimiento de rutas.
	Ciudadano	-Ubicación de los puentes.
	Profesores y Estudiantes	
	Encargados de Puentes	-Riesgos de infraestructura y mapas de mantenimiento.
Priorización	Ingeniero	-Establecer prioridades de mantenimiento. -Programación de intervenciones.
	Encargados de Puentes	-Establecer y evaluar prioridades de inversión.
	Ministros y Autoridades	-Establecer prioridades de inversión.
	Encargados de Mantenimiento	-Verificar las actividades de mantenimiento a realizar.
Gestión de Costos	Ingeniero	-Cuantificar y evaluar costos de mantenimiento, inspección y reparación de puentes.
	Encargados de Puentes	
	Ministros y Autoridades	
Monitoreo de Estructuras	Ingeniero	-Estadísticas descriptivas, alarmas y eventos. -Analizar resultados obtenidos del monitoreo de puentes.
	Encargados de Puentes	-Alarmas y eventos por segmentos de control. -Reportes específicos.
	Encargados de Mantenimiento	-Consultas por categorías de fallas.



**Figura 1.** Diagrama General de Casos de Uso.

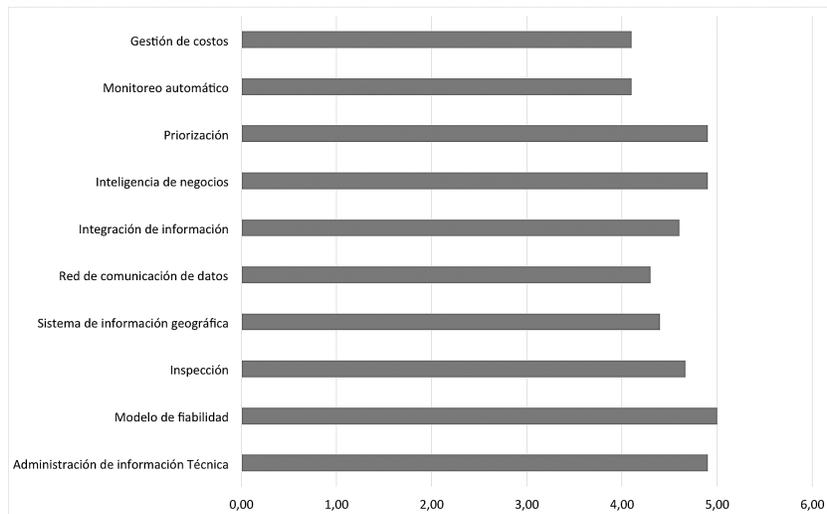
Cada uno de estos casos fue consecuentemente detallado en términos de funcionalidad e interacción con los actores específico.

## Validación

Para validar los procesos y requerimientos identificados, se siguió una metodología de consulta participativa involucrando usuarios y expertos tanto internos como externos al proyecto. En particular, se organizó un taller de validación con personas que respondieron una consulta realizada a partir de un cuestionario en el que se les solicitaba indicar su opinión con respecto al nivel de importancia (escala 1-5, donde 5 es el nivel más alto) de los procesos considerados. La figura 2 resume el promedio de las respuestas indicadas por los participantes consultados por cada proceso principal.

En total, el instrumento se aplicó a más de 10 personas incluyendo ingenieros en construcción con amplia experiencia en inspección de puentes, encargados de puentes en municipalidades, y un exministro del MOPT, entre otras.

El análisis de las respuestas sugiere que en general la evaluación de la importancia de los procesos y funciones identificados es alta. Particularmente, se destaca la importancia de los procesos de: modelo de fiabilidad, priorización, inteligencia de negocios y administración de información técnica.



**Figura 2.** Consulta de evaluación de importancia de procesos.

## Conclusiones y trabajo futuro

Como primer paso hacia el diseño de un sistema de monitoreo de salud de puentes en el proyecto e-Bridge 3.0, se realizó un análisis de requerimientos funcionales con base en una revisión bibliográfica y una comparación detallada de sistemas seleccionados. A partir del estudio realizado, se puede concluir que los proyectos de BRIMOS y SHMLive están entre los sistemas existentes más completos para monitoreo de puentes. La revisión también permitió identificar procesos diferenciadores o poco comunes en sistemas existentes tales como de inteligencia de negocios y aplicaciones móviles.

La especificación general de casos de uso representa una herramienta útil para comprender los requerimientos, los procesos y los actores que debe considerar un sistema nacional de monitoreo de puentes.

El taller de consulta permitió validar los procesos y requerimientos identificados entre un grupo de expertos en el tema. La metodología del taller guiado por un cuestionario con preguntas abiertas y cerradas permitió obtener información valiosa y realista con respecto a las verdaderas expectativas o requerimientos de usuarios potenciales del sistema.

Los procesos y requerimientos identificados en este trabajo van a ser analizados y priorizados para el diseño del prototipo de sistema de monitoreo considerado en el proyecto e-Bridge 3.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a todo el equipo de e-Bridge por la valiosa colaboración brindada para desarrollar este trabajo.

## Referencias

- [1] MIDEPLAN, "Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018", Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, Noviembre 2014.

- [2] C. Garita and G. Ortiz, "e-Bridge 3.0: A Strategic Approach to Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica", in *6th IFIP World Information Technology Forum, WITFOR 2016*, vol. 481, F. J. Mata and A. Pont, Eds. San Jose, Costa Rica: Springer-Verlag, 2016.
- [3] M. Gutierrez and C. Garita, "Prototype Development of a Wireless Embedded System for Bridge Monitoring ", presented at 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII), Managua, Nicaragua, 2017.
- [4] A. Gastineau, T. Johnson, and A. Schultz, "Bridge Health Monitoring and Inspections - A Survey of Methods", University of Minnesota, MN/RC 2009-29, 2009.
- [5] N. F. Molina, "Diseño de un Sistema de Gestión de Puentes Bajo Enfoque de Priorización de la Inversión", in *Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles* vol. Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile 2012.
- [6] R. W. Stratt, "Bridge Management a System Approach for Decision Making", *School of Doctoral Studies European Union Journal*, 2010.
- [7] C. Garita, "Enfoques de Integración de Información para Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Puentes", *Tecnología en Marcha*, vol. 29, 2016.
- [8] J. A. Murillo and R. Castillo, "El sistema informático para la administración de estructuras de puentes de Costa Rica (SAEP): ¿Vamos en la dirección correcta?", in *Boletín Técnico - Programa de Infraestructura de Transporte*, vol. 52, 2014.
- [9] G. Ortiz and C. Garita, "The e-Bridge 2.0 Approach for SHM of Bridges in Costa Rica", in *Structural Health Monitoring 2015 - System Reliability for Verification and Implementation, Proceedings of the Tenth International Workshop on Structural Health Monitoring, University of Stanford, September 1-3, 2015*, vol. 1, F.-K. Chang and F. Kopsaftopoulos, Eds. Pennsylvania, USA: DEStech Publications, Inc., 2015.
- [10] C. Garita and G. Ortiz, "Integrando Información Estratégica para Monitoreo de Puentes Nacionales", in *III Jornadas Costarricenses de Computación e Informática - JoCICI 2017*. Cartago, Costa Rica, 2017.
- [11] C. Garita and G. Ortiz, "Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges", in *Collaborative Systems for Smart Networked Environments: 15th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2014, Amsterdam, The Netherlands, October 6-8, 2014, Proceedings*, vol. 434, L. M. Camarinha-Matos and H. Afsarmanesh, Eds. Berlin Heidelberg: Springer, 2014, pp. 489-497.
- [12] F. Carrión, A. Quintana, and A. López, "Diseño y estrategia para un centro de monitoreo de puentes y estructuras inteligentes de México", vol. 132, 2011.
- [13] M. C. Brown, J. P. Gomez, and M. L. Hammer, "Long-Term Bridge Performance High Priority Bridge Performance Issues", 2014.
- [14] BRIMOS, "BRIMOS", <http://www.brimos.com>, 2017.
- [15] D. Inaudi, "SHMLive Web-based Data Management Software", 2011.
- [16] J. Gracia, *Aprende a Modelar Aplicaciones con UML*, 3rd ed: IT Campus Academy, 2018.