



Informe 01

CONFIDENCIAL

Proyecto: **eBridge 2.0 Sistema integrado para el desempeño de puentes**

Fecha de inicio: 01/07/2013 Fecha finalización: 31/12/2015

Documento 1 – Informe técnico de los resultados del proyecto

Fecha del informe: 01/03/2016

Preparado por: Grupo de investigación de eBridge

Autores:

Garita Rodríguez, César

Picado Alvarado, Federico

Ortiz Quesada, Giannina

Soto Montoya, Casia

Navarro Henríquez, Francisco

CIVCO
Centro de Investigaciones en
Vivienda y Construcción



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Coordinador: Giannina Ortiz Quesada
Institución: Tecnológico de Costa Rica
e-mail: gortiz@tec.ac.cr
Tel.: (506) 2550-2309
Página web: www.tec.ac.cr

*El presente es el informe final del proyecto de investigación denominado **eBridge 2.0: Sistema integrado para el desempeño de puentes**, se compone de dos documentos, el informe técnico de resultados y el informe administrativo y de productos.*

***eBridge** es un proyecto multidisciplinario coordinado por el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción y en el que participaron las escuelas de Ingeniería en Electrónica, Computación, Forestal y Producción Industrial; además se contó con participación en algunas tareas de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Además de estudiantes de otras carreras como Ingeniería en Diseño Industrial, Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Ingeniería en Computadores e Ingeniería en Mecatrónica. Dicho proyecto se encuentra dentro programa de investigación eScience.*

Otro elemento fundamental para el desarrollo del proyecto fue la participación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) y el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

Este proyecto es la segunda etapa de un proyecto a largo plazo que pretende generar herramientas para la predicción de fallas en puentes.

FIRMAS

<hr/> Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc. Director Escuela de Ingeniería en Construcción	<hr/> Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc. Coordinadora Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO)	<hr/> Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc. Coordinadora Proyecto eBridge 2.0: Sistema integrado para el desempeño de puentes
--	--	---

Contenido

1.	Resumen Ejecutivo	8
1.1.	Código y Título del proyecto	9
1.2.	Autores y direcciones	9
1.3.	Resumen	9
1.4.	Palabras clave	10
2.	Introducción.....	10
3.	Objetivo 1. Definir modelos y protocolos para integrar la información del sistema integrado para evaluación de puentes	11
3.1.	Introducción.....	11
3.2.	Marco teórico.....	12
3.3.	Metodología.....	12
3.4.	Resultados	13
3.4.1.	Resumen de resultados técnicos.....	14
3.5.	Discusión y conclusiones	14
3.6.	Recomendaciones.....	16
4.	Objetivo 2. Mejorar el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge integrando otras variables	17
4.1.	Introducción.....	17
4.2.	Marco teórico.....	17
4.3.	Metodología.....	19
4.4.	Resultados	19
4.4.1.	Puente sobre el río Purires, ruta nacional 2.....	20
4.4.2.	Puente sobre el río Purires, ruta nacional 1.....	24
4.5.	Discusión y conclusiones	30
4.6.	Recomendaciones.....	31
5.	Objetivo 3. Optimizar la metodología de evaluación de puentes con base en la información técnica del mismo	31
5.1.	Introducción.....	31
5.2.	Marco teórico.....	32
5.3.	Metodología.....	36
5.4.	Resultados	38
5.4.1.	Metodología integrada para la evaluación de puentes	38
5.5.	Discusión y conclusiones	41
5.6.	Recomendaciones.....	41
6.	Objetivo 4. Establecer un geo portal con la información proveniente de la evaluación de los puentes y su entorno.....	42
6.1.	Introducción.....	42
6.2.	Marco teórico.....	42
6.3.	Metodología.....	45
6.4.	Resultados	45
6.4.1.	Revisión del estado del arte sobre geoportales existentes y sus características	45

6.4.2.	Análisis de requerimientos para el prototipo	49
6.4.3.	Diseño de geoportales con potenciales usuarios.....	54
6.4.4.	Diseño de prototipo de geoportal.....	58
6.5.	Discusión y conclusiones	61
6.6.	Conclusiones.....	62
6.7.	Recomendaciones.....	66
7.	Objetivo 5. Desarrollar las herramientas de escalamiento de redes de sensores para monitorización estructural, mediante la optimización de la tecnología existente y su adaptación	66
7.1.	Introducción.....	66
7.2.	Marco Teórico	67
7.3.	Metodología.....	75
7.4.	RESULTADOS	88
8.	Resumen de principales resultados	101
9.	Resumen de principales conclusiones	102
10.	Resumen de discusiones y recomendaciones.....	104
11.	Referencias.....	105
12.	Apéndices	108

Indice de Figuras

Figura 1. Gráfico de probabilidad. Caso I.	21
Figura 2. Gráfico de probabilidad Caso II.	21
Figura 3. Gráfico de probabilidad. Caso IIa.	22
Figura 4. Distribución de carga versus resistencia. Caso I.	22
Figura 5. Distribución de carga versus resistencia. Caso II.	23
Figura 6. Distribución de carga versus resistencia. Caso IIa.	23
Figura 7. Puntos de medición puente sobre el río Virilla, ruta 1.	25
Figura 7. Esfuerzos en punto A.	29
Figura 9. Esfuerzos en punto B.	30
Figura 10. Esfuerzos en punto C.	30
Figura 11. Metodología utilizada para el objetivo 3.	37
Figura 12. Porcentaje de puentes por década de construcción.	39
Figura 13. Propuesta de aplicación de metodologías cuantitativas para evaluación de puentes, de acuerdo al grado de daño de la inspección visual.	40
Figura 14. Esquema de puente sobre el Río Coto Colorado.	51
Figura 15. Diagrama de interacción entre usuarios y actividades.	53
Figura 16. Evaluación de importancia de consultas en la su rutina diaria.	54
Figura 17. Evaluación de importancia de consultas en general.	54
Figura 18. Metodología utilizada para crear el geoportal.	59
Figura 18. Ventana principal generada con CartoDB.	60
Figura 19. Panel de capas y tabla de atributos de los puentes.	60
Figura 21. Hacer búsquedas y editar información.	61
Figura 22. Operación de un sensor de fibra óptica FBG.	69
Figura 23. Diagrama interrogador láser de barrido rápido para sensores FBG.	70
Figura 24. Sensor óptico FBG de esfuerzo. Os3155.	71
Figura 25. Curvas sensor óptico FBG de esfuerzo.	72
Figura 26. Sensor óptico FBG de temperatura.	72
Figura 27. Ejemplo medición de temperatura de sensor óptico FBG.	73
Figura 28. Acelerómetro FBG para medición de vibraciones. Os 7100.	73
Figura 29. Ejemplo acelerómetro FBG para medición de vibraciones.	74
Figura 30. Vista del puente, febrero 2014.	75
Figura 31. Vista en Planta y Lateral del puente. Ubicación puntos de medición A, B y C.	76
Figura 32. Vista superior tridimensional del modelo computacional.	78
Figura 33. Modelo analítico. Modo de vibración y frecuencia.	78
Figura 34. Esquema de instrumentación.	79
Figura 35. Vista del puente patrón, Agosto 2014.	80
Figura 36. Vista en planta y perfil del puente patrón.	81
Figura 37. Esquema de Instrumentación.	82
Figura 38. Puntos de medición sensores de deformación y deflexión.	83
Figura 39. Instrumentación deformímetros en las vigas de acero I.	83
Figura 40. Instrumentación medidores de desplazamiento.	84

Figura 41. Ubicación Carga de Prueba.....	84
Figura 42. Puente patrón con Carga de Prueba Baja (335 Kgs).....	86
Figura 43. Puente patrón con Carga de Prueba Media (712 Kgs).	86
Figura 44. Puente patrón con Carga de Prueba Alta (1030 Kgs).....	87
Figura 45. Señales de vibración y espectro de frecuencia, punto de medición A.	88
Figura 46. Participación Modal vs Frecuencia	89
Figura 47. Comparación de frecuencias mediciones experimentales versus modelo analítico. Punto de medición A – nodo 7.	90
Figura 49. Comparación de frecuencias nodos A y B	91
Figura 50. Tolerancias Confort para aceleraciones pico.....	93
Figura 51. Estudio de percepción de las aceleraciones (Chang 1973).....	94
Figura 52. Criterio de aceleración pico.	95
Figura 53. Deformación dinámica el punto de medición A.....	96
Figura 54. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Baja.	97
Figura 55. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Media.....	98
Figura 56. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Alta.	98
Figura 57. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Baja.	100
Figura 58. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Media.....	100
Figura 59. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Alta.	101

Indice de cuadros

Cuadro 1. Autores y direcciones	9
Cuadro 2. Resumen de objetivo, entregables y actividades.	11
Cuadro 3. Escenario de simulación I	22
Cuadro 4. Escenario de simulación II	23
Cuadro 5. Deformaciones unitarias (ϵ) y Esfuerzos máximos en los puntos A, B y C.	26
Cuadro 6. Índices de confiabilidad y probabilidades de fallas para los tres puntos de carga.	28
Cuadro 7. Estructuras de puentes por década de construcción	39
Cuadro 8. Resumen de características presentadas en el documento GIS Cloud.	58
Cuadro 9. Desglose por tipo de vehículo y su participación respecto al total.	77
Cuadro 10. Frecuencias obtenidas para nodos A y B.....	91
Cuadro 11. Resumen mediciones de vibración en puntos A, B y C.....	92
Cuadro 12. Aceleraciones máximas y mínimas en tramo cercha.	92
Cuadro 13. Esfuerzos máximos en los puntos A, B y C.....	96
Cuadro 14. Deflexión para las tres condiciones de la carga de prueba estática.....	97
Cuadro 15. Deformación para las tres condiciones de la carga de prueba estática.	99
Cuadro 16. Esfuerzos de tensión estáticos para las tres condiciones de la carga de prueba estática.	99

1. Resumen Ejecutivo

El presente documento contiene el informe final del proyecto de investigación **eBridge 2.0: Sistema integrado para el desempeño de puentes**. eBridge es un proyecto multidisciplinario coordinado por el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción y en el que participaron las escuelas de Ingeniería en Electrónica, Computación, Forestal y Producción Industrial; además se contó con participación en algunas tareas de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Además de estudiantes de otras carreras como Ingeniería en Diseño Industrial, Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Ingeniería en Computadores e Ingeniería en Mecatrónica. Dicho proyecto se encuentra dentro programa de investigación eScience.

El informe presenta los resultados técnicos principales, agrupados por cada uno de los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto, siendo el objetivo general el desarrollar un prototipo de sistema integrado de información para consultas estratégicas sobre el desempeño de los puentes, basado en datos obtenidos por medio de sistemas de información geográfica, medición cuantitativa del desempeño, modelos de confiabilidad estructural e información técnica de la estructura.

Dado que este es un proyecto multidisciplinario, para su ejecución se definió 5 objetivos específicos por área de conocimiento, cada uno de los cuales estuvo a cargo de un investigador, sin embargo, es importante mencionar que cada uno de ellos se encuentra ligado uno con otro y el desarrollo fue conjunto. Los objetivos específicos planteados fueron:

- Definir modelos y protocolos necesarios para el establecimiento de un sistema integrado de evaluación de puentes.
- Mejorar el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge, integrando nuevas variables.
- Optimizar la metodología de evaluación de puentes con base en la información técnica del mismo.
- Desarrollar un prototipo de un geoportal con la información de evaluación de los puentes y su entorno.
- Desarrollar las herramientas de escalamiento de redes de sensores para monitorización estructural mediante la optimización de la tecnología existente y su adaptación.

En la primera etapa del proyecto eBridge (eBridge 1.0: Predicción remota de fallas en puentes) se identificaron metodologías y herramientas para la determinación de las variables que más influyen en el desempeño estructural de una estructura de puente.

En esta segunda etapa, se trabajaron herramientas para la integración de la información que sea la base de un sistema nacional de monitoreo de estructuras de puentes, con un fuerte apoyo tecnológico y motivando cada vez más el uso de tecnología. Se trabajó en varias áreas la integración de sistemas, instrumentación, evaluación de estructuras y modelo de confiabilidad y sistemas de información geográfica.

1.1. Código y Título del proyecto

eBridge 2.0: “Sistema integrado para la determinación del desempeño de estructuras de puentes”

1.2. Autores y direcciones

Cuadro 1. Autores y direcciones

Investigador	Escuela/Centro	email	Google Scholar
Giannina Ortiz Quesada. Coordinadora	Ingeniería en Construcción / Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción	gortiz@tec.ac.cr	GianninaOrtiz
Francisco Navarro Henríquez.	Ingeniería Electrónica	fnavarro@tec.ac.cr	
Casia Soto Montoya	Ingeniería Forestal / Centro de Investigación Bosque Industria	csoto@tec.ac.cr	
César Garita Rodríguez	Ingeniería en Computación / Centro de Investigaciones en Computación	cesar@tec.ac.cr	CesarGarita
Federico Picado Alvarado	Ingeniería en Producción Industrial	fpicado@tec.ac.cr	

1.3. Resumen

El objetivo general de eBridge 2.0 es desarrollar un prototipo de sistema integrado de información para consultas estratégicas sobre el desempeño de los puentes, basado en datos obtenidos por medio de sistemas de información geográfica, medición cuantitativa del desempeño, modelos de confiabilidad estructural e información técnica de la estructura.

Además se plantearon objetivos específicos claros, mediante los cuales se alcanzó el objetivo general propuesto. Estos objetivos son:

1. Definir los modelos y protocolos necesarios para el establecimiento de un sistema integrado de evaluación de puentes.
2. Mejorar el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge, integrando nuevas variables
3. Optimizar la metodología de evaluación de puentes con base en la información técnica del mismo.

4. Desarrollar un prototipo de un geoportal con la información de evaluación de los puentes y su entorno.
5. Desarrollar las herramientas de escalamiento de redes de sensores para monitorización estructural, mediante la optimización de la tecnología existente y su adaptación.

Para alcanzar estos objetivos se establecieron 4 áreas de trabajo: integración de sistemas, evaluación estructural y modelo de confiabilidad, sistemas de información geográfica e instrumentación. En cada una de estas áreas de trabajo se contó con la participación de los diferentes investigadores y de estudiantes.

El informe que se presenta a continuación, se estructura por objetivos específicos y el desarrollo de cada uno contempla una introducción al tema, el marco teórico, la metodología, los resultados principales, las conclusiones y recomendaciones.

1.4. Palabras clave

Puentes, evaluación de puentes, Structural Health Monitoring, flujos de trabajo, confiabilidad estructural, sistemas de información geográfica para puentes, eBridge.

2. Introducción

El objetivo general de la primera fase del proyecto eBridge, fue generar capacidad para la predicción de fallas en puentes, esto se logró desarrollando e identificando metodologías y herramientas necesarias para la determinación de las variables que más influyen en el comportamiento estructural de un prueba, desarrollando a su vez algunas pruebas de concepto.

La mayor limitante en esta etapa fue la falta de información a nivel nacional sobre las características y el estado de los puentes en Costa Rica, ya que el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) ni el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) contaban con un inventario de puentes.

Se evidenció entonces la necesidad de no sólo contar con un sistema que permita conocer las características y estado de los puentes y de generar los datos necesarios, sino que también en el mediano plazo esta información fuera la base de un sistema de inteligencia de negocios orientado a la gestión proactiva de la infraestructura de puentes del país.

El tema de infraestructura a nivel nacional, se considera uno de los principales problemas que se afrontan, no sólo por ser uno de los indicadores más débiles para la competitividad del país (así expresado por el Foro económico mundial), sino que representa un problema de seguridad y riesgo.

Algunas de las causas identificadas de esta problemática son:

- Falta de mantenimiento
- Falta de planificación
- Falta de recurso humano capacitado
- Falta de sistematización de la administración de la infraestructura

El enfoque que tiene el presente proyecto, es plantear un prototipo de sistema de información, que integre diferentes variables y metodologías que ayuden en la toma de decisiones en la temática de puentes a nivel nacional, siendo actores fundamentales en el éxito de lo aquí planteado el MOPT y el CONAVI.

Uno de los logros importantes de este proyecto en su segunda fase ha sido la firma de un contrato interadministrativo entre el TEC y el CONAVI, que pretende generar la información necesaria para contar con el inventario nacional de puentes, evaluar puentes y capacitar a funcionarios del CONAVI. Siendo esta la base de la información utilizada en este proyecto.

Otro logro importante ha sido la incorporación de estudiantes en las diferentes actividades, lo que ha permitido ir generando masa crítica en el tema, se han generado también cursos de capacitación en relación con la temática y se han publicado artículos sobre el trabajo tanto a nivel nacional como internacional.

3. Objetivo 1. Definir modelos y protocolos para integrar la información del sistema integrado para evaluación de puentes

Responsable: Ing. César Garita Rodríguez, PhD.

3.1. Introducción

Las actividades y productos asociados al Objetivo 1 se describen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Definir los modelos y protocolos necesarios para el establecimiento de un sistema integrado de evaluación de puentes.	1. Revisión del estado del arte de sistemas para integración de información distribuida en áreas relacionadas al proyecto.	Documento con revisión de trabajo relacionado.
	2. Análisis de los requerimientos de información integrada para los componentes del sistema.	Documento de análisis de requerimientos.
	3. Diseño de modelos y protocolos para integración de información.	Documento de diseño del prototipo.
	4. Desarrollo de prototipo del sistema integrado	Prototipo del sistema integrado.

Este objetivo específico contribuye directamente a cumplir el objetivo general del proyecto pues define los modelos y protocolos que permiten integrar la información estratégica que

es generada por otros componentes. A través del prototipo desarrollado en este objetivo, los usuarios pueden realizar consultas y manipular información proveniente de diferentes fuentes de forma integrada.

3.2. Marco teórico

En el documento entregable incluido en: Apéndice 12-1 a 12-4, se provee una revisión detallada del estado del arte de sistemas para integración de información distribuida en áreas relacionadas al proyecto, que constituye el marco teórico de este objetivo. Las principales áreas identificadas fueron:

- Monitoreo de Salud Estructural de Puentes: esta área representa el marco teórico del dominio de aplicación del sistema integrado.
- Sistemas de monitoreo de puentes: en esta área se estudian las funcionalidades y enfoques generales de sistemas de monitoreo de puentes existentes.
- Administración de información en SHM: este rubro incluye el estudio de modelos de información, bases de datos y sistemas administradores de datos en SHM de puentes.
- Integración con componentes específicos: esta categoría revisa enfoques relacionados con los sistemas o componentes específicos involucrados en la arquitectura de e-Bridge.
- Integración de información en redes colaborativas: esta categoría del análisis se refiere a un estudio de técnicas y modelos de redes colaborativas que son aplicables en el contexto de integración de información en SHM.

El estudio realizado buscó por un lado evitar “reinventar la rueda” en integración de información en SHM y por otro lado identificar oportunidades de diferenciación o posibles valores agregados del enfoque que se plantee para e-Bridge.

Además, en cada uno de los otros documentos entregables asociados a este objetivo, se incluyen y analizan diversas referencias bibliográficas que complementan y actualizan el marco teórico realizado como primera tarea. También se logró publicar un artículo sobre la revisión del estado del arte relacionado con el objetivo 1, como se indica en la subsección Apéndice 12-1 de este documento.

3.3. Metodología

Por favor notar que cada documento entregable (incluido en apéndices) asociado a este objetivo contiene una descripción de la metodología seguida para realizar las tareas asociadas. A continuación se incluye un resumen de la metodología seguida en cada tarea:

- Tarea 1 – Revisión del estado del arte de sistemas para integración de información distribuida en áreas relacionadas al proyecto. Con base en el objetivo y la tarea, se determinó que el alcance general de esta revisión sería técnicas de integración de información en monitoreo de salud de estructuras (Structure Health Monitoring – SHM) y en particular, puentes. Luego se definió un conjunto inicial de áreas que cubren o clasifican de manera más detallada el alcance general de la revisión. Una vez definidas las áreas preliminares, se procedió a hacer búsquedas de información

bibliográfica relevante por cada una de ellas. Se revisaron los documentos disponibles de la fase anterior del proyecto, y luego se hicieron búsquedas utilizando diferentes motores y repositorios. La búsqueda incluyó en particular revisiones de trabajos relacionados existentes para pasar luego a trabajos más especializados. Cada vez que se encontraba una referencia útil, se guardaba la cita, el documento fuente o URL, el resumen y comentarios (anotaciones), clasificadas por área, en un documento temporal de síntesis. También se incluía la cita en un manejador de referencias bibliográficas. La búsqueda se realizó de la manera descrita hasta que ya no se encontraban referencias que contribuían de manera significativa a la revisión en curso, o bien hasta que se consideraba que ya se contaba con suficiente información. Finalmente, se procedió a documentar la revisión de manera formal mediante la redacción de un documento que resume las referencias estudiadas y las relaciona con las áreas (y subáreas) definidas según el objetivo de esta tarea.

- Tarea 2 – Análisis de los requerimientos de información integrada para los componentes del sistema. Para el análisis de requerimientos funcionales específicos de integración de información en e-Bridge 2.0, se siguió una metodología de consulta participativa involucrando usuarios y expertos tanto internos como externos al proyecto a través de la organización de talleres de trabajo. En particular, se organizaron dos tipos de talleres de consulta de requerimientos: talleres internos y talleres externos. Para los diversos talleres se diseñaron cuestionarios específicos que apoyaron la recolección de información ofrecida por los participantes. Para el análisis de los resultados de los cuestionarios se utilizó aplicando la técnica de ordenamiento de tarjetas abierto o “*open card sorting*” en inglés. En lo referente a la metodología del proceso que se llevó a cabo para seleccionar la herramienta base que respondiera a los requerimientos de integración del prototipo del sistema e-Bridge 2.0, las principales actividades realizadas fueron:
1. Revisión bibliográfica sobre comparación de herramientas; 2. Definición de criterios de evaluación de herramientas; 3. Selección de herramientas a evaluar; 4. Comparación de herramientas; 5. Evaluación de herramientas; 6. Instalación y pruebas de herramientas seleccionadas.
- Tarea 3 – Diseño de modelos y protocolos para integración de información. La etapa de diseño propiamente dicha se ha dividido en 2 fases principales: 1. Diseño de la arquitectura general: en esta fase se describe el marco general que define los componentes principales del diseño y sus relaciones; 2. Diseño de modelos y protocolos específicos: en esta fase se detalla la operación de cada uno de los componentes descritos en la arquitectura general en términos de modelos y protocolos.
- Tarea 4 – Desarrollo de prototipo del sistema integrado. En general, la metodología de diseño y desarrollo de los prototipos descritos en este documento sigue una metodología de cascada (actividades de análisis, diseño y desarrollo). También se aplicaron ajustes o incorporaron aspectos de metodologías incrementales e iterativas a lo largo del proyecto según resultó conveniente en el desarrollo y la integración de subsistemas existentes. En particular, las subsecciones del documento asociado a esta tarea, describen los pasos metodológicos para el desarrollo de los cada componente.

3.4. Resultados

Esta sección presenta el resumen de los resultados asociados al Objetivo 1 en términos de: resultados técnicos, las acciones de difusión y participación estudiantil, se adjuntan en el documento 2.

3.4.1. Resumen de resultados técnicos

Los principales resultados técnicos asociados a este objetivo se resumen a continuación:

- Análisis de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con monitoreo de salud estructural (Structural Health Monitoring – SHM, por sus siglas en inglés) de puentes. En este contexto, el análisis de enfoques relacionados con integración de información en e-Bridge se ha dividido en las siguientes áreas principales: a) Monitoreo de Salud Estructural de Puentes; b) Sistemas de monitoreo de puentes; c) Administración de información en SHM; d) Integración con componentes específicos; e) Integración de información en redes colaborativas.
- Resultados de análisis de requerimientos de consultas estratégicas. Este punto incluye los resultados encontrados a partir de los talleres de consulta internos y externos realizados para la Tarea 2. Estos talleres se realizaron con el objetivo de identificar las posibles consultas estratégicas que resultan importantes en diferente medida para diferentes audiencias de usuarios. Además, como parte del análisis de requerimientos para integración de información, se realizó un estudio detallado de herramientas de administración de flujos de trabajo y de procesos de negocios que llevó a la selección de una herramienta particular para futuras fases de diseño y desarrollo. Todos los resultados de este análisis se encuentran resumidos en el apéndice.
- Los resultados técnicos específicos con respecto al diseño de modelos y protocolos incluyen (ver apéndices):
 - Modelo de Arquitectura General para Integración de Información.
 - Protocolo de integración de aplicaciones existentes con Suite Taverna.
 - Protocolo de integración de web services con BD e-Bridge 2.0.
 - Protocolo de integración de aplicaciones web con servidor Taverna .
 - Protocolo de interacción de usuarios con Taverna Workbench.
- Con respecto al diseño y desarrollo del prototipo para el sistema de integración de información, los productos específicos obtenidos incluyen los siguientes prototipos principales (ver apéndices):
 - Prototipo de Flujo de Trabajo de Análisis de Modelo Real.
 - Prototipo de Red Inalámbrica para Monitoreo de Puentes.
 - Prototipo de Análisis de Información usando Inteligencia de Negocios.
 - Prototipo de Portal e-Bridge y Aplicaciones Web / Móvil.

Estos resultados se encuentran desglosados en detalle en los apéndices que incluyen los documentos respectivos a cada tarea de este objetivo.

3.5. Discusión y conclusiones

A continuación se resumen y discuten las principales conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio realizado sobre trabajos relacionados con integración de información:

- El área de SHM es un campo extenso, complejo y muy rico en cuanto a su potencial para desarrollo de aplicaciones computacionales novedosas. A pesar de que existen muchos sistemas y tecnologías para SHM, aún existen retos importantes con respecto al manejo del flujo de grandes cantidades de información en tiempo real, así como en la interpretación, análisis y predicción de las condiciones de los puentes.
- SHM de puentes es un dominio que está actualmente muy poco estandarizado en cuanto a modelos y enfoques de administración de datos. Esto lleva por un lado a la definición de modelos propios o basados en prácticas “de facto” así como a la promoción y participación en actividades e iniciativas de estandarización.
- Los componentes específicos de e-Bridge que deben integrarse, presentan enfoques y tecnologías muy heterogéneos desde el punto de vista computacional (base de datos, lenguajes de programación, ambientes de desarrollo, etc.). La integración de información de estos componentes debe realizarse mediante un mecanismo lo más general posible, tomando en cuenta los altos niveles de heterogeneidad, distribución física y autonomía en el manejo de información, que presentan estos sistemas.
- El paradigma de redes colaborativas es perfectamente aplicable al área de SHM de puentes, vista como una alianza de entidades (universidades, municipalidades, centros de investigación, ministerios, ingenieros, científicos, etc.) que deben colaborar y compartir información con el fin de alcanzar objetivos comunes, en este caso monitoreo integral de salud de puentes, con base en sistemas computacionales.
- Se puede concluir que ninguno de los enfoques y proyectos revisados aplica la disciplina de redes colaborativas y en particular, ninguno aplica administración de procesos de negocios con el fin de integrar información entre entidades o componentes, por lo que esto podría convertirse eventualmente en un elemento diferenciador en siguientes etapas (análisis / diseño) del proyecto e-Bridge 2.0. Se recomienda analizar en detalle la posibilidad concreta de utilizar modelos y herramientas BPM / Workflow en las siguientes fases del proyecto.

Con respecto a la tarea sobre análisis de requerimientos de integración de información, las principales conclusiones son las siguientes.

- El método seleccionado para analizar los requerimientos mediante talleres guiados por cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas, permitieron obtener información valiosa y realista con respecto a las verdaderas expectativas de usuarios potenciales de e-Bridge 2.0.
- Se trabajó en la selección de la herramienta que permita atender los requerimientos analizados. Esta selección se realizó mediante un proceso de comparación y evaluación entre todas las herramientas. La herramienta finalmente seleccionada fue Taverna.

Para la tarea sobre diseño de modelos y protocolos, las conclusiones principales fueron:

- La arquitectura general propuesta está compuesta básicamente de: una capa de aplicaciones web, una capa de servidor de aplicaciones basada en el suite de Taverna (Workbench y Server) y servicios web, y una capa de administración de datos. La solución así diseñada se caracteriza por su interoperabilidad y escalabilidad.

- El sistema de integración de información diseñado está en capacidad de integrar diversas fuentes de datos sin importar en qué fueron desarrolladas o dónde se encuentran ubicadas.

En cuanto a la tarea asociada al diseño y desarrollo del prototipo de integración de información, se pueden destacar estos puntos:

- Los flujos de trabajo científicos son una herramienta muy poderosa para promover la interoperabilidad y la integración de información generada por sistemas heterogéneos asociados a monitoreo de salud de puentes.
- Las técnicas de inteligencia de negocios son completamente aplicables al área de monitoreo de salud de estructuras.
- Los prototipos asociados al sistema de integración de información de e-Bridge 2.0 apoyan directamente los procesos de toma de decisiones estratégicas en el ámbito de monitoreo de salud de puentes pues permiten integrar y sintetizar la información distribuida en sistemas heterogéneos. El uso de flujos de trabajo científicos y la aplicación de técnicas de inteligencia de negocios resultan clave en este sentido y representan un elemento diferenciador de esta investigación.

Finalmente, se concluye que se cumplieron satisfactoriamente todas las tareas y entregables asociados al Objetivo 1 del plan de acción del proyecto.

3.6. Recomendaciones

Las recomendaciones principales relacionadas con el objetivo 1 se incluyen en los siguientes puntos:

- Existen muchas tecnologías computacionales relacionadas con administración de información en SHM que podrían aplicarse en este proyecto, incluyendo: big data, cloud computing, minería de datos, inteligencia de negocios, etc. Sin embargo, su aplicación debe evaluarse con cuidado considerando que el alcance u objetivo principal del proyecto en esta fase es integración de información con miras a un futuro enfoque de sistema experto. Se recomienda que estas tecnologías potenciales sean evaluadas en función del alcance, recursos y calendario del proyecto antes de ser consideradas para implementación.
- Se recomienda fuertemente el uso de herramienta Taverna como base de la integración de información en e-Bridge así como en proyectos con requerimientos similares en ese sentido.
- Se puede planificar en el futuro un programa de capacitación sobre la creación de flujos de trabajo en Taverna Workbench dirigido a todos aquellos usuarios que podrían diseñar flujos de trabajo.
- Como principales recomendaciones se pueden mencionar las siguientes:

- A partir del análisis y la investigación desarrollada alrededor del diseño de red inalámbrica, se puede considerar diseñar en el futuro un sistema inteligente de monitoreo de bajo costo basado en estándares abiertos.
- Se recomienda seguir adelante en futuras propuestas de investigación basadas en la utilización de flujos de trabajo y de herramientas de inteligencia de negocios tales como Taverna y Pentaho. Estos elementos representan puntos importantes de diferenciación con respecto a otros proyectos y sistemas de monitoreo de salud de puentes en el ámbito internacional.

4. Objetivo 2. Mejorar el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge integrando otras variables

Responsable: Ing. Federico Picado Alvarado, PhD.

4.1. Introducción

En esta etapa del proyecto, se tomaron las referencias anteriores y se trabajó en la integración de variables, para ello se utilizó el software Minitab. Se trabajaron dos casos específicos el puente sobre el río Purires en la ruta nacional 2 y el puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 1.

4.2. Marco teórico

La revisión bibliográfica realiza por Ortiz (Ortiz, 2013) en el Informe Técnico del Proyecto eBridge 1 no ha cambiado sustancialmente en el desarrollo del objetivo en mención durante el II semestre del 2013. Se mantienen los mismos hallazgos de proyectos realizados en otras partes del mundo. Los conceptos fundamentales que dan soporte al objetivo No.2 se resumen a continuación:

- Un modelo de confiabilidad es una ecuación matemática que pretende determinar la probabilidad de ocurrencia de una falla (Estes, 1997).
- El modelo de confiabilidad estará en función del estado límite, el cual se puede definir como (Nowak, 2004):

$$G = R - S = 0 \text{ Margen de seguridad}$$

R: Resistencia (capacidad momento)

S: Efecto de carga (momento aplicado)

$G > 0$ ---> estructura segura

Probabilidad falla:

$$P_f = \text{Prob} (R - S < 0) = \text{Prob} (G < 0)$$

- Muñoz (Muñoz, 2006) desarrolla los conceptos estadísticos de la confiabilidad estructural mediante la determinación del Índice de Confiabilidad (β) definido como la inversa de la función estándar acumulada de la probabilidad de falla (P_f):

$$\beta = \Phi^{-1} (P_f)$$

La distribución de la función límite (G) está determinada por la zona de falla donde la media de la función G (m_G) es proporcional a la desviación estándar (S_G). La proporción de estos dos parámetros es el índice de confiabilidad (β) y asumiendo una distribución normal, esta puede evaluarse como:

$$m_G = \beta * S_G$$

$$\beta = \frac{m_G}{S_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}}$$

Dónde:

m_R, m_S : medias de la distribución de la resistencia y las cargas

S_R, S_S : desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las cargas.

- Nowak (Nowak, 2000) compara los índices de confiabilidad para tres códigos internacionales para el análisis de confiabilidad estructural en puentes, a saber:
 - Código Europeo: $\beta = 7.0 - 8.0$
 - Código Español: $\beta = 5.1 - 6.8$
 - Código AASHTO: $\beta = 4.5 - 4.9$
- O'Connor (O'Connor, 2012) describe las aplicaciones, ventajas y desventajas el uso de la simulación Monte Carlo como una herramienta útil para modelar fenómenos con cierto grado de incertidumbre. Las aplicaciones más importantes de la simulación Monte Carlo incluyen confiabilidad, disponibilidad, logística, pronósticos, análisis del riesgo análisis de interferencias carga-resistencia lo cual es altamente relacionable al objetivo de investigación. Es un método iterativo de simulación para evaluar un modelo determinístico utilizando variables y números aleatorios. Se fundamenta en conocer a priori las distribuciones de probabilidad de las variables bajo estudio. Los datos generados de una simulación pueden ser representados y analizados por técnicas estadísticas tradicionales.

- Ebeling (Ebeling, 2010) describe y aplica los pasos para una adecuada selección de una distribución de probabilidad teórica para una variable aleatoria continua o discreta mediante pruebas de bondad de ajuste. Las pruebas más recomendadas son: Anderson Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner. Los valores típicos del nivel de significancia utilizado son $\alpha = 0.05$ y 0.10 .

4.3. Metodología

La metodología utilizada como primera aproximación de un modelo de confiabilidad inicial fue la siguiente:

- a. Selección del tipo de puente a analizar
- b. Realizar las pruebas estáticas y dinámicas
- c. Análisis de mecanismos de falla
- d. Realizar análisis estructural usando SAP2000
- e. Determinar el elemento estructural más comprometido con el desempeño del puente
- f. Calcular valores de deformación (ϵ) (strains)
- g. Calcular esfuerzos de carga ($= \epsilon * E$)
- h. Realizar pruebas de bondad de ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad del esfuerzo de carga y deformaciones
- i. Escenario de simulación I. Simular valores de esfuerzo en flexión carga y resistencia. Usando Minitab 16.2.4
- j. Determinar el índice de confiabilidad, la probabilidad de falla y la probabilidad de sobrevivencia (confiabilidad)
- k. Calcular el número de réplicas basado en la probabilidad de falla para ser usado en el II escenario de simulación
- l. Escenario de simulación II. Simular valores de esfuerzo en flexión carga y resistencia. Usando Minitab 16.2.4
- m. Determinar el índice de confiabilidad, la probabilidad de falla y la probabilidad de sobrevivencia (confiabilidad)
- n. Análisis de resultados. Comparación de los dos escenarios de simulación. Comparación con códigos internacionales
- o. Conclusiones y recomendaciones

4.4. Resultados

La metodología se aplicó en dos puentes el puente sobre el río Purires, ruta nacional 2 y el puente sobre el río Virilla, ruta nacional 1.

4.4.1. Puente sobre el río Purires, ruta nacional 2

El puente en análisis denominado "Purires", se ubica en la ruta nacional número 2. Es un puente de vigas continuas de acero W27X94, de 39,45m de longitud total y distancia promedio entre apoyos menor a 15 m, cuenta con 4 puntos de apoyo. Posee una losa de concreto de 15 cm de espesor con refuerzo de acero #6 cada 15 cm de forma transversal y cada 25 cm longitudinalmente y una sobre capa de asfalto que varía entre 14 y 7 cm de espesor. Posee dos carriles y doble vía y el promedio diario de vehículos es de 11 318, el ancho de la superficie de ruedo es de 6,6m y cuenta con aceras de 1,5m. La distancia libre desde el río tiene un promedio de 5m. La fecha de construcción de dicho puentes se estima en los años 50's, pero se desconoce la fecha exacta. (Ortiz, 2013)

- Propiedades del material
 - Acero A33. W 27x94
 - Módulo de Elasticidad = 2,038,901,78 kg/cm²
 - Esfuerzo de fluencia kg/cm² : Promedio: 2574.78, Desviación estándar: 295.72. (Estes, 1997)
 - Pruebas estáticas
 - Tomado de protocolo presentado por Carvajal (2012)
 - Prueba estática: Caso I.
 - Prueba estática: Caso II
 - Prueba estática: Caso Ila
 - Análisis estructural realizado con programa SAP2000
 - Pruebas de bondad de ajuste para los valores de deformaciones (strains)
 - La prueba de hipótesis a probar es la siguiente:
 - Ho: datos siguen una distribución normal
 - H1: datos no siguen una distribución normal
- Para la prueba de hipótesis se utilizará un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.
 - Caso I: Valor P (0.10) > α . No hay suficiente evidencia estadística para concluir H1. Los datos siguen una distribución normal. Figura 1.

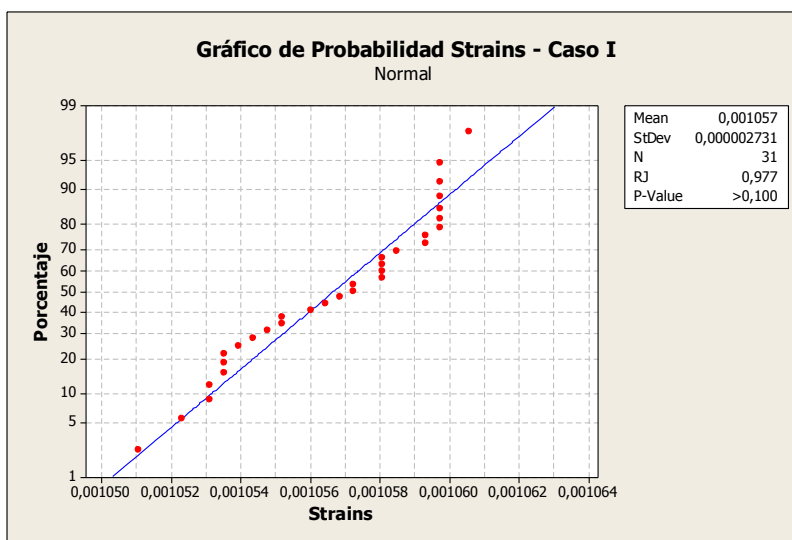


Figura 1. Gráfico de probabilidad. Caso I.

- Caso II: Valor P (0.010) < α . Hay suficiente evidencia estadística para concluir H_1 . Los datos no siguen una distribución normal. Figura 2.

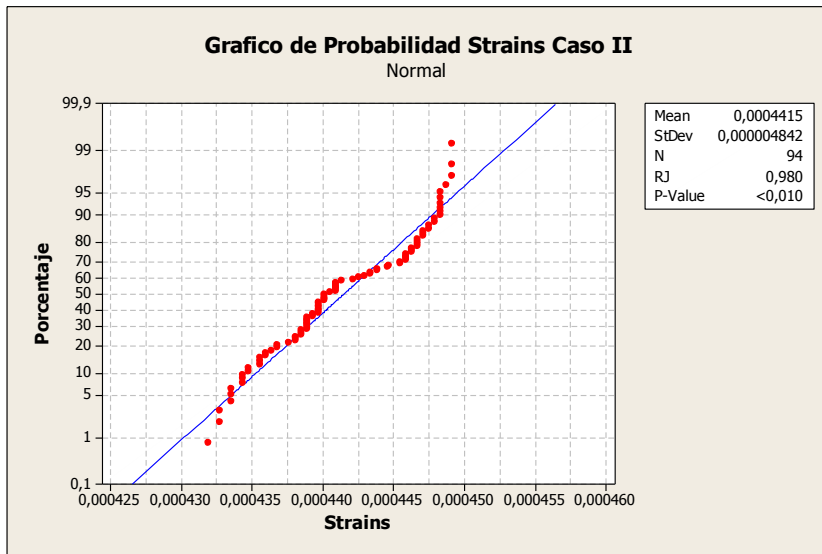


Figura 2. Gráfico de probabilidad Caso II.

- Caso III: Valor P (0.010) < α . Hay suficiente evidencia estadística para concluir H_1 . Los datos no siguen una distribución normal. Figura 3.

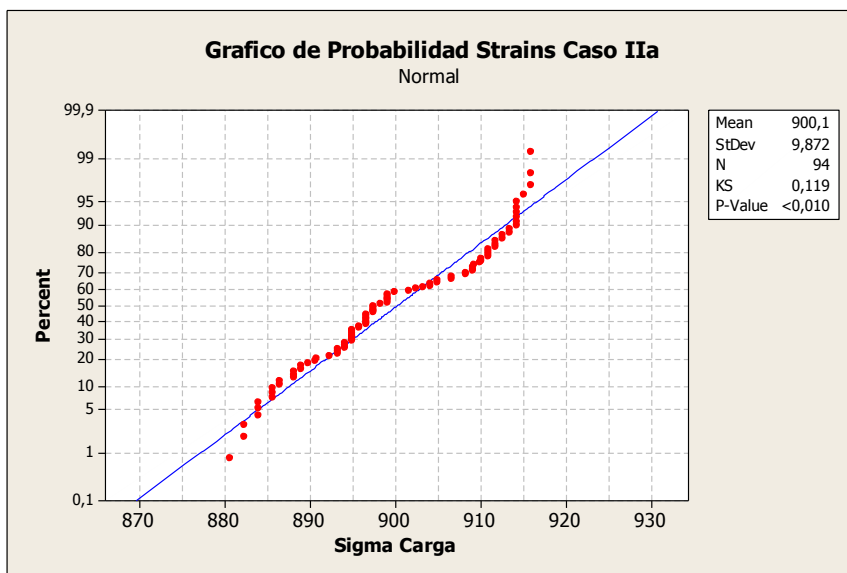


Figura 3. Gráfico de probabilidad. Caso IIa.

- Los resultados del escenario de simulación I se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Escenario de simulación I

	Datos de Pruebas	Índice de Confiabilidad	Probabilidad de Supervivencia	Probabilidad de Falla
Tipo de Prueba	n	β	R	P_f
Prueba Estática I	31	1,667	0,952281186	0,047718814
Prueba Estática II	94	5,239	0,9999999	8,05317E-08
Prueba Estática IIa	94	6,105	9,999999995E-01	5,1149640E-10

- Para realizar el escenario de simulación II, es necesario calcular el número de réplicas, basado en la fórmula propuesta por Estes (Estes, 1997):

$$n = \frac{10}{P_f}$$

Dónde P_f es tomado del escenario de simulación I.

- Los resultados del escenario de simulación II se muestran en el cuadro 4.

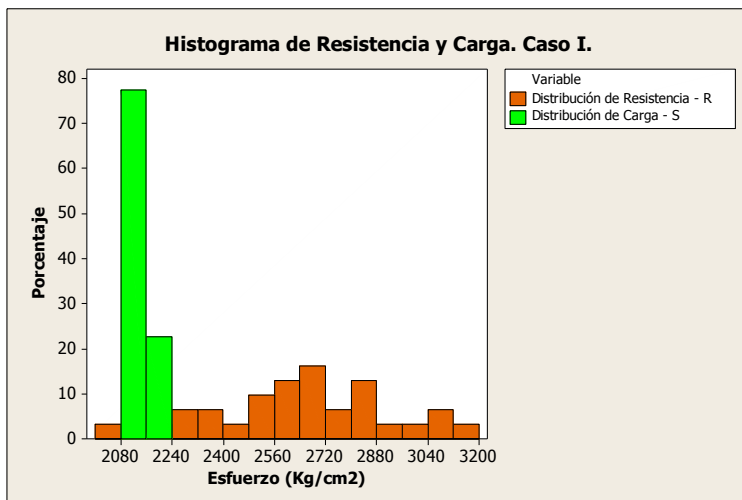


Figura 4. Distribución de carga versus resistencia. Caso I.

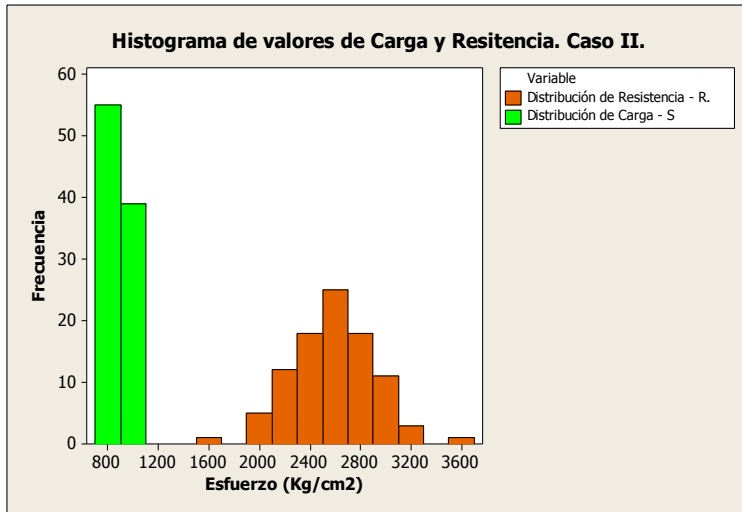


Figura 5. Distribución de carga versus resistencia. Caso II.

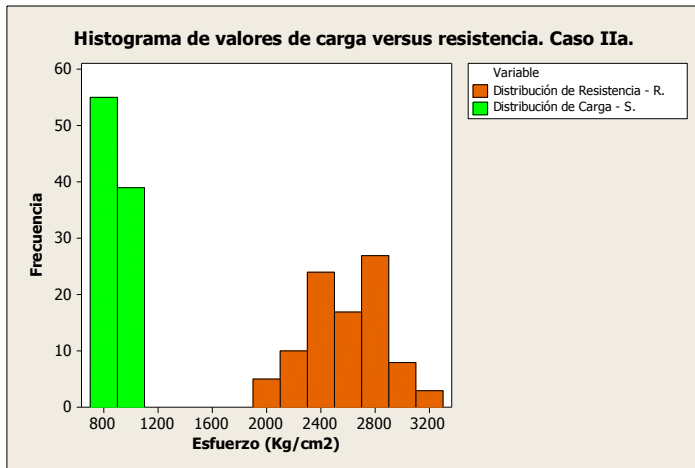


Figura 6. Distribución de carga versus resistencia. Caso IIa.

Cuadro 4. Escenario de simulación II

	Cantidad de Datos Simulación	Índice de Confiabilidad	Probabilidad de Supervivencia	Probabilidad de Falla
Tipo de Prueba	n	β	R	P_f
Prueba Estática I	210	1,320	0,906615764	0,093384236

Prueba Estática II	1000	5,619	0,99999999	0,00000001
Prueba Estática Ila	1000	5,538	9,99999985E-01	1,5286251E-08

(*) Cuando n es muy grande se decidió utilizar 1000 réplicas.

- En relación a la Prueba estática de carga I (Cuadro 3) con un índice de confiabilidad $\beta = 1.6677$ no cumple los requerimientos de ningún código internacional para el análisis estructural de puentes. La figura 4 representa el comportamiento de los valores de carga y resistencia. Se recomienda revisar el protocolo de carga utilizado en esta prueba y el análisis estructural realizado para analizar en mayor detalle las causas y efectos de un índice de confiabilidad bajo.
- Los índices de confiabilidad para las pruebas estáticas de carga II y Ila (Cuadro 1) cumplen satisfactoriamente los requerimientos de los códigos Español y AASHTO. Sin embargo, no satisface los requerimientos del código Europeo. Las Figuras 5 y 6 representan el comportamiento de los valores de carga y resistencia en ambos escenarios.
- Sobre los resultados del escenario de simulación II (Cuadro 4) se mantiene la mismas conclusiones anteriores donde las prueba estática I no satisface los requerimientos de los códigos internacionales mientras las pruebas estáticas II y Ila se cumplen satisfactoriamente los requerimientos internacionales.
- Es importante analizar en más detalle el comportamiento no normal de algunos datos de deformaciones (strains) en dos pruebas de carga estática ya que el análisis posterior para el cálculo del índice de confiabilidad asume una distribución normal.

4.4.2. Puente sobre el río Purires, ruta nacional 1

Análisis de Confiabilidad del Puente sobre el Río Virilla en la Ruta Nacional No.1

Fecha: 9 de noviembre de 2014

Objetivo:

Aplicar el modelo de confiabilidad desarrollado en la segunda etapa del proyecto eBridge con los resultados obtenidos del análisis de vibración y esfuerzos sobre el puente del río Virilla en la Ruta Nacional No.1 reportados en el informe “Inspección detallada sobre superestructura para identificar evidencia de fatiga del 9/7/2014”.

Metodología

La metodología está basada en la aplicación del modelo de confiabilidad y análisis de rendimiento de puentes desarrollada por Picado y Ortiz (2014) con los resultados obtenidos en el estudio de la inspección detallada sobre la superestructura para identificar evidencia de fatiga en el puente sobre el Río Virilla en la ruta nacional No.1 (Ortiz et al 2014).

a. Tipo de puente

Tal y como se reporta en el informe presentado por Ortiz et al 2014, el puente sobre el río Virilla, ubicado en la ruta nacional N° 1, en el distrito de la Uruca, del cantón San José en la provincia de San José, fue diseñado en 1960. Tiene una longitud de 160 metros y cuenta con dos secciones de 19,84 m cada una, su alineación es recta.

b. Mediciones de vibración y esfuerzos

Se realizaron mediciones de vibraciones en tres puntos denotados como A, B y C. Ver figura 52 adjunta tomado del informe por (Ortiz et al 2014).

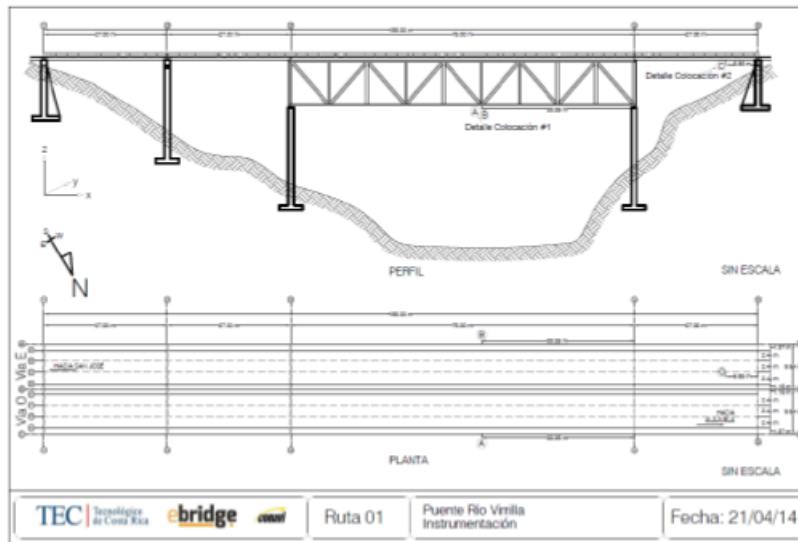


Figura 52. Ubicación de puntos de medición

Figura 7. Puntos de medición puente sobre el río Virilla, ruta 1.

Resultados Obtenidos

Medición de esfuerzos

El cuadro 5 muestra los esfuerzos máximos calculados según las mediciones de deformación unitaria (ϵ) (strains) dada por los sensores, y los esfuerzos máximos en los mismos puntos provenientes del modelo teórico para fatiga. Cabe señalar que solo se tomaron los valores mayores al percentil del 95% dónde los esfuerzos de carga son determinados como $\sigma = \epsilon \cdot E$. Los datos mostrados son los reportados en el Informe dado por (Ortiz et al 2014).

Cuadro 5. Deformaciones unitarias (ϵ) y Esfuerzos máximos en los puntos A, B y C.

PUNTO	ϵ ($\mu\epsilon$)	σ	σ_{Modelo}
	Percentil 95%	kg/cm ²	kg/cm ²
A	7,6	15,96	85,4
B	104,27	218,97	89,3
C	128,4	269,64	197,1
<i>E=</i>	2.10E+06	kg/cm ²	

Las propiedades mecánicas del material utilizado en el presente informe se basaron en el trabajo realizado por Estes (Estes, 1997), a saber:

- Acero A33. W 27x94
- Módulo de Elasticidad = 2,038,901,78 kg/cm²
- Esfuerzo de fluencia kg/cm²: Promedio: 2574.78, Desviación estándar: 295.72.

Resumen de estadísticos descriptivos de la deformación dinámica en los puntos de medición A, B y C:

Estadísticos descriptivos: A

Variable	N	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
A	91317	12,975	4,994	24,942	38,49	7,604	8,952	11,573	15,544	38,148

Variable	Rango	IQR
A	30,544	6,592

Estadísticos descriptivos: B

Variable	N	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
B	90023	106,66	3,42	11,68	3,20	104,27	104,94	105,47	106,75

Variable	Máximo	Rango	IQR
B	132,92	28,65	1,81

Estadísticos descriptivos: C

Variable	N	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
C	90396	131,07	6,48	42,03	4,95	128,36	128,67	129,45	130,32

Variable	Máximo	Rango	IQR
C	182,06	53,70	1,65

Determinación del índice de confiabilidad, la probabilidad de falla y la probabilidad de sobrevivencia (confiabilidad)

Para la determinación de los índices de confiabilidad se utilizaron las técnicas de simulación Montecarlo basados en las propiedades mecánicas del material utilizado, las deformaciones dinámicas calculas y el número total de mediciones realizadas en cada punto de medición A, B y C respectivamente. Se utilizó el software Minitab 17 para el análisis estadístico y la simulación Montecarlo.

El modelo de confiabilidad está en una ecuación matemática que pretende determinar la probabilidad de ocurrencia de una falla (Estes, 1997).

El modelo de confiabilidad estará en función del estado límite, el cual se puede definir como (Nowak, 2004):

$$G = R - S = 0 \text{ Margen de seguridad}$$

R: Resistencia (capacidad momento)

S: Efecto de carga (momento aplicado)

$$G > 0 \text{ ---> estructura segura}$$

Probabilidad falla:

$$P_f = \text{Prob} (R - S < 0) = \text{Prob} (G < 0)$$

Muñoz (2006) desarrolla los conceptos estadísticos de la confiabilidad estructural mediante la determinación del Índice de Confiabilidad (β) definido como la inversa de la función estándar acumulada de la probabilidad de falla (P_f):

$$\beta = \Phi^{-1} (P_f)$$

La distribución de la función límite (G) estará determinada por la zona de falla dónde la media de la función G (m_G) es proporcional a la desviación estándar (S_G). La proporción de estos dos parámetros es el índice de confiabilidad (β) y asumiendo una distribución normal, esta puede evaluarse como:

$$m_G = \beta * S_G$$

$$\beta = \frac{m_G}{S_G} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}}$$

Dónde:

m_R , m_S : medias de la distribución de la resistencia y las cargas

s_R , s_S : desviaciones estándar de la distribución de la resistencia y las cargas.

El cuadro xx muestra los índices de confiabilidad y probabilidad de falla para los tres puntos de carga basados en el análisis con simulación Montecarlo.

Cuadro 6. Índices de confiabilidad y probabilidades de fallas para los tres puntos de carga.

	ϵ ($\mu\epsilon$)	Esfuerzo	Esfuerzo modelo	Índice de confiabilidad	Probabilidad de Supervivencia	Probabilidad de Falla
PUNTOS	Percentil 95%	kg/cm2	kg/cm2			
A	7,6	15,96	85,4	8,6143	1	0
B	104,27	218,97	89,3	7,9809	1	0
C	128,4	269,64	197,1	7,7837	1	0

Las figuras 8, 9 y 10 muestran los histogramas de los esfuerzos de carga y fluencia para cada punto de carga.

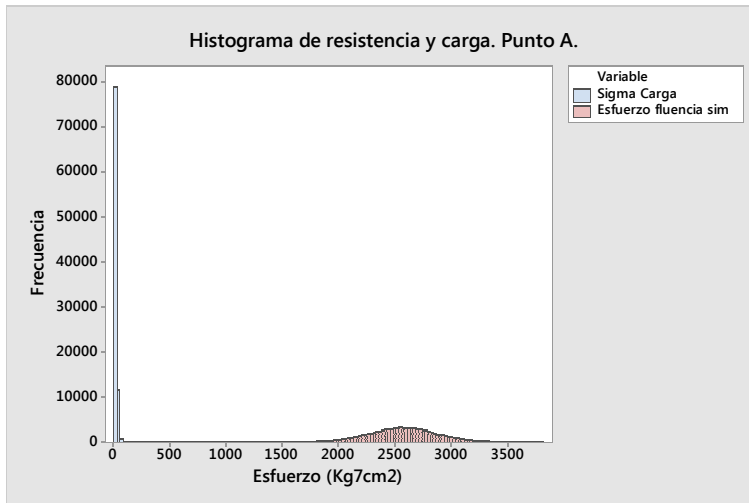


Figura 7. Esfuerzos en punto A.

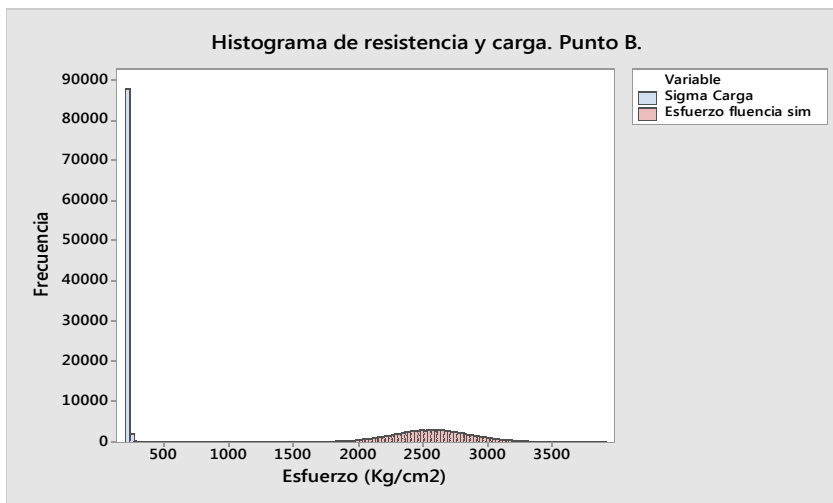


Figura 9. Esfuerzos en punto B.

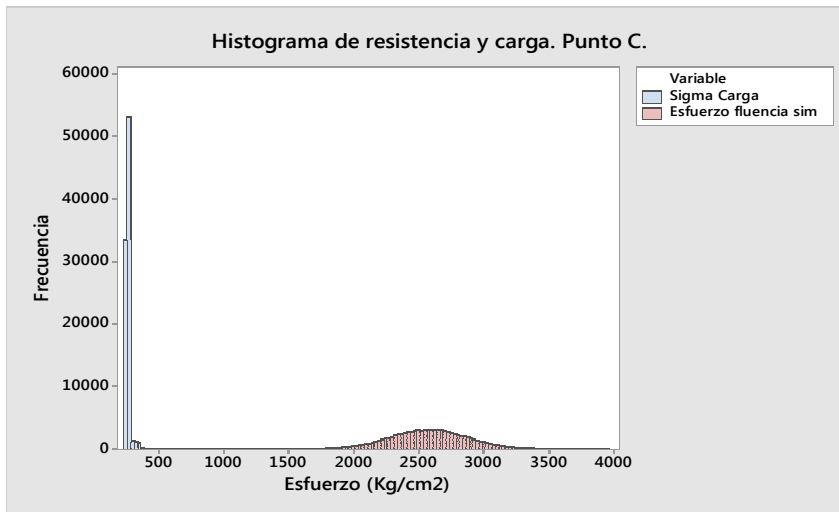


Figura 10. Esfuerzos en punto C.

Comparación con códigos internacionales

Nowak (Nowak, 2000) compara los índices de confiabilidad para tres códigos internacionales para el análisis de confiabilidad estructural en puentes, a saber:

- Código Europeo: $\beta = 7.0 - 8.0$
- Código Español: $\beta = 5.1 - 6.8$
- Código AASHTO: $\beta = 4.5 - 4.9$

Como puede observarse los índices de confiabilidad obtenidos para el puente sobre el río Virilla se encuentran dentro los rangos establecidos como satisfactorios en los tres códigos internacionales de referencia. Incluso sobrepasa a dos de ellos (Español y AASHTO).

4.5. Discusión y conclusiones

Puente sobre el río Purires:

- El análisis de confiabilidad estructural basado en índices de confiabilidad para el Río Purires cumple satisfactoriamente los requerimientos de dos códigos internacionales para dos pruebas estáticas. Solamente para una condición de carga no satisface esos requerimientos.

- Se debe analizar en más detalle el comportamiento no normal de algunos datos de deformación (strains).
- Los protocolos de pruebas de carga y análisis estructural son satisfactorios para el análisis posterior del cálculo de índices de confiabilidad, probabilidad de fallas y probabilidad de confiabilidad y para el diseño de un modelo de confiabilidad.
- El uso de la simulación Monte Carlo demostró ser una herramienta muy valiosa para el desarrollo de un modelo de confiabilidad.
- La metodología empleada cumplió satisfactoriamente las necesidades del análisis requerido. Se mejoró el modelo de confiabilidad propuesto en la primera fase de eBridge, al integrar otras variables aleatorias experimentales y otras variables obtenidas con la aplicación de simulación Monte Carlo garantiza una evaluación menos subjetiva.

Puente sobre el río Virilla:

- Los resultados obtenidos con el modelo de confiabilidad son muy afines con los resultados obtenidos del análisis estructural de la superestructura en los puntos de medición establecidos reportados en el informe por Ortiz et al (2014).
- El modelo de confiabilidad muestra valores altos para los índices de confiabilidad comparables con los códigos internacionales.
- Los resultados indican que la superestructura de acero no se encuentra comprometida desde el punto de vista de la confiabilidad.

4.6. Recomendaciones

- Analizar el comportamiento no normal de algunas variables.
- Determinar una metodología para el manejo de variables continuas no normales.
- Aplicar la metodología empleada con otros puentes que tengan los datos de pruebas estáticas y análisis estructural ya obtenidos.
- Continuar depurando la metodología utilizada en el puente piloto.
- Aplicar el modelo de confiabilidad nuevamente en la superestructura del puente sobre el Río Virilla una vez que la rehabilitación se haya realizado.

5. Objetivo 3. Optimizar la metodología de evaluación de puentes con base en la información técnica del mismo

Responsable: Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.

5.1. Introducción

Durante la etapa 1 del proyecto eBridge, se analizaron diferentes metodologías para la evaluación de puentes, con un especial énfasis en lo que sugiere el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT).

En esta segunda etapa, además de la metodología visual planteada en el Manual de Inspección de Puentes del MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007), se revisó y analizó la metodología de evaluación de puentes de la Federal Highway Administration de los Estados Unidos de Norteamérica (Federal Highway Administration, 2006), la cual corresponde también a una metodología de análisis visual de daños.

Posterior a realizar una comparación de estas metodologías se analizaron metodologías cuantitativas que pudieran ayudar a entender mejor el comportamiento de la estructura y su deterioro a lo largo del tiempo.

El tener claro para Costa Rica una propuesta metodológica básica de evaluación, la cual sea estandarizada por los administradores de la infraestructura vial, es vital para atender el problema planteado en esta investigación, el cual es la carencia de un sistema que integre y estructure la información de estado y desempeño de los puentes para una toma de decisiones ágil y efectiva.

Para atender el objetivo de optimizar la metodología de evaluación de puentes con base en la información técnica del mismo, se recurrió a un análisis de las metodologías de evaluación aplicables, se aplicaron estas metodologías en el campo y finalmente se hace la propuesta de una metodología clara con diferentes etapas y un proceso simplificado. Para este análisis fue clave la ejecución del contrato interadministrativo entre el Consejo Nacional de Vialidad y el TEC.

5.2. Marco teórico

La evaluación de una estructura de puente es la valoración del desempeño del mismo en un momento determinado y la identificación de daños y fallas en la estructura.

En una evaluación se obtiene la información técnica necesaria, se identifica su deterioro y se puede planificar un mantenimiento o la rehabilitación de la infraestructura.

El daño en una estructura se define como cambios en los materiales, en sus propiedades geométricas, en las propiedades de los sistemas, sus condiciones de frontera o conectividad. Los daños pueden afectar el desempeño actual o futuro de las estructuras

Estos daños deben ser identificados para poder evaluar y saber su estado:

- Detección del daño: es cuando se identifica la presencia de un daño.
- Localización del daño: es cuando se localiza el daño.
- Tipificación del daño: es cuando se determina el tipo de daño.
- Extensión del daño: es cuando se evalúa la severidad del daño.

Una falla es la condición de un puente cuando un estado límite es alcanzado o excedido, Las fallas que ocurren en las estructuras se pueden clasificar por la fabricación o el diseño, esta puede ser por no tener los cálculos correspondientes; y en fallar por los materiales, también esta las fallas por los materiales que pueden ser por ocupar materiales inapropiados o por la falta de calidad de estos. También están las fallas por construcción por la deformación o defectos de la formaleta; fallas por el incremento de cargas, más de

las que esta soporta y las de mantenimiento por no darle un mantenimiento, reparación, rehabilitación o refuerzo a la estructura. (Wenzel, 2009)

Inspección visual

La inspección visual es uno de los procesos iniciales para la evaluación y monitoreo de las estructuras, para poder analizar a simple vista, en qué condiciones y lugares se trabajará y luego hacer una inspección más detallada, haciendo un inventario y asignando una calificación, para después proceder si esta necesita una rehabilitación o intervención; las inspecciones pueden ser:

- Inspección inicial
- Inspecciones de rutina
- Inspección de daños
- Inspecciones avanzadas
- Inspección de miembros críticos
- Inspecciones bajo el agua
- Inspecciones especiales

Pruebas sobre los materiales

El comportamiento o las respuestas de la estructura como un puente o pavimento rígido no solo dependen de su diseño sino también de los materiales con los que es construida la estructura. Para conocer las características y condiciones de los materiales que se utilizan, se deben realizar ensayos o pruebas que pueden ser ensayos o pruebas; estas pueden ser las pruebas destructivas (destructive testing DT) y no destructivas (non destructive testing, NDT).

Pruebas no destructivas

Las pruebas no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés), son la prueba aplicada a un material que no perjudica la utilidad del miembro o material que se está analizando o probando. Estas pruebas requieren de una buena calibración, un técnico que sepa utilizarlas y un profesional que pueda interpretar los resultados de la inspección avanzada.

Pruebas no destructivas en concreto

Métodos de fuerza: Estas son pruebas de rebote y penetración de una fuerza sobre el concreto y se usan para predecir la resistencia del mismo. Como por ejemplo, el martillo Schmidt, el más común. Esta prueba está regida por la ASTM C805 "Test Method for Rebound Number for Hardened Concrete". Estas pruebas pueden no ser confiables.

Métodos sónicos: Este método mecánico se realiza por medio de la velocidad de un pulso sónico se utiliza un martillo que crea un pulso y se toma el tiempo que tarda entre un punto y otro del concreto; el tiempo se relaciona con el módulo de elasticidad del material. Esta técnica presenta el problema de que es poco práctica en grandes superficies, por ejemplo losas. La norma ASTM D4580 hace referencia a la misma. (AASHTO 2011)

Métodos magnéticos: La aplicación principal de estos métodos es comprobar la presencia de refuerzo de acero en el concreto. Estos dispositivos generan un campo magnético y con ello se ubican discontinuidades superficiales. Presenta buenos resultados en un rango de recubrimiento menor a tres pulgadas.

Métodos eléctricos: Los métodos eléctricos para inspección de puentes con elementos de concreto incluyen medidas de resistividad y potencial. La resistividad eléctrica puede ser usada para determinar la permeabilidad de una losa de concreto. Puede revisarse la norma ASTM D3633. También pueden ser utilizados para determinar la corrosión en el acero de refuerzo, utilizando diferencias de potencial eléctrico.

Métodos nucleares: La aplicación principal de estos métodos es medir el contenido de humedad en el concreto, utilizando la adsorción de neutrones.

Termografía: La termografía infrarroja se utiliza como prueba complementaria para determinar la delaminación en las superficies de concreto. Trabaja bajo el principio de zonas frías y zonas de calor, por ejemplo las delaminaciones interrumpen la transferencia de calor en el concreto. Mayor información puede encontrarse en ASTM D4788.

Radar de penetración terrestre (GPR): es un método geofísico que utiliza pulsos de radar para obtener imágenes del subsuelo. Este método no destructivo utiliza la radiación electromagnética en la banda de microondas (UHF / VHF frecuencias) del espectro radioeléctrico, y detecta las señales reflejadas desde las estructuras del subsuelo. Se utiliza para medir el deterioro de las losas de concreto, puede medir discontinuidades tanto en concreto como en asfalto.

Radiografía: este método incluye la irradiación de rayos gamma sobre el concreto para un análisis posterior de la placa obtenida. Se requiere de un entrenamiento importante para la interpretación de los resultados.

Técnicas de ultrasonido: Estos dispositivos normalmente utilizan mediciones de velocidad en el concreto de un pulso generado por un transductor piezoeléctrico. La velocidad de este pulso depende de la composición y madurez del concreto y sus propiedades elásticas. La relación con el esfuerzo o la fuerza depende de pruebas experimentales realizadas previamente.

En el caso de presencia de grietas esta técnica resulta muy útil. Las técnicas de ultrasonido con un buen entrenamiento y experiencia resultan una herramienta muy útil

Capacidad de carga de un puente

Las pruebas de capacidad de carga son importantes para establecer las condiciones físicas y determinar las necesidades de mantenimiento.

La capacidad de carga de un puente se basa en las condiciones estructurales, propiedades de los materiales, cargas, condiciones del tráfico y el sitio; existentes en el momento. Se debe calcular cada vez que se produzcan cambios en algunas de las condiciones.

Las pruebas de carga permiten medir la respuesta de un puente de forma controlada y con cargas predeterminadas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Se

usan para verificar tanto los componentes como el desempeño del sistema bajo cargas conocidas y es una metodología de evaluación alternativa para analizar la capacidad de carga del puente. Proveen suficientes datos para establecer de forma segura los niveles de carga viva para puentes antiguos.

Pruebas de diagnóstico: Se usan para determinar la respuesta de ciertas características como cargas, distribución de cargas o validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos.

Pruebas de resistencia: Se usan para establecer la capacidad máxima segura del puente, cuando el comportamiento del puente se encuentra fuera del rango elástico.

Las pruebas estáticas usan cargas estacionarias para evitar vibraciones en el puente, la intensidad y posición de la carga varía durante el ensayo. Las pruebas estáticas de diagnóstico sirven para verificar y ajustar los modelos analíticos de predicción.

Las pruebas dinámicas usan cargas que varían con respecto al tiempo o cargas en movimiento que producen vibraciones en el puente. Las pruebas dinámicas incluyen el análisis con vehículos en movimiento, la respuesta del comportamiento con el tráfico normal y el análisis de vibración para relacionarlo con la carga de sismo.

Durante estas pruebas se aplican cargas suficientemente altas para propiciar un cambio en el comportamiento del puente, pero sin afectar la integridad de la estructura.

Sistemas de administración de puentes

La información generada en los procesos de inspección debe almacenarse con el fin de posteriormente tomar decisiones sobre el mantenimiento, reparación, rehabilitación o reconstrucción de la infraestructura.

En Estados Unidos se utiliza el software de la AASHTO denominado Pontis, para realizar esta labor, la información se puede obtener en <http://www.aashtoware.org>.

En el norte de Europa se encuentra BRIMOS, que es una empresa que brinda la evaluación y monitoreo de estructuras, puede obtenerse mayor información en <http://www.brimos.com>.

En Costa Rica, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), cuenta con un sistema de administración de estructuras de puentes denominado SAEP.

Para la evaluación de estructuras de puentes, se cuenta con una serie de normas que deben tenerse en consideración, a continuación se enlistan las principales a tomar en cuenta:

Lineamientos AASHTO

- AASHTO Guide Manual for Bridge Element Inspection. First Edition-2011. Este manual sustituye al AASHTO Guide for Commonly Recognized (CoRe) Structural Elements e intenta ser una referencia para la estandarización de elementos, definiciones, cálculos de cantidades, definición de estados de condición, recomendaciones de intervenciones y convenciones de inspección.
- Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. U.S. Department of Transportation. Federal Highway y

Administration.1995. Este documento provee una guía para la evaluación y codificación de los componentes principales de las estructuras de puentes.

- Bridge Inspector's Reference Manual.U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration .2006. Este documento incluye una guía de inspección detallada de las estructuras de puentes.
- The Manual for Bridge Evaluation. SecondEdition. 2011. Este manual publicado por la AASHTO es un estándar y provee uniformidad en los procedimientos y políticas para determinar las condiciones físicas, las necesidades de mantenimiento y la capacidad de cargas de los puentes en Estados Unidos de Norteamérica.

Lineamientos MOPT

- Manual de Inspección de Puentes, 2007. Este manual incluye la descripción general de las estructuras, terminología, responsabilidades, generalidades del inventario y la inspección, lineamientos para la calificación del grado de deterioro y los formularios para realizar las inspecciones.
- Lineamientos para el mantenimiento de puentes, 2007. Estos lineamientos incluyen información sobre el sistema de administración de puentes, identificación del deterioro, elementos a considerar en inspecciones detalladas, análisis estructural y medidas de seguridad.

Metodologías de evaluación

Antes de iniciar el proceso de evaluación de un puente es necesaria la recopilación de toda la información disponible sobre este, a esta información se le llama expediente del puente e incluye información básica sobre ubicación, planos y especificaciones, así como reportes de inspecciones previas. En muchas ocasiones esta información no está disponible y por lo tanto se requiere de una visita al sitio para obtener algunos de estos datos.

La evaluación de una estructura de puente incluye, además, una visita previa al sitio, la cual permitirá elaborar el plan de inspección y considerar el equipo y elementos de seguridad necesarios para llevar a cabo el trabajo. Una vez listo este plan se procede a realizar las inspecciones de inventario y evaluación visual de daños.

Estas inspecciones visuales se limitan a caracterizar evidencias de daños en las estructura y en sus materiales, para evaluar el comportamiento de la estructura se deben recurrir a metodologías de evaluación cuantitativas como las pruebas de cargas o el monitoreo.

5.3. Metodología

Para la obtención del objetivo planteado en este capítulo, se utilizó la metodología expuesta en la figura 11.

La misma consistió en utilizar la metodología propuesta en la fase anterior del proyecto, la cual incluía una evaluación visual de daños y una evaluación cuantitativa, incluyendo pruebas sobre la estructura. A esta se le adicionaron algunos elementos propuestos en el

Manual de Inspección de la FHWA y lo solicitado en el Manual de Inspección de Puentes del MOPT, dado que el MOPT es el ente rector en Costa Rica, de este se tomó la totalidad de requerimientos.

Dado que a nivel nacional no existe un inventario de los puentes completo, se debió incluir en la metodología no sólo la evaluación sino que debieron incluirse los procesos de recopilación de información para el inventario de puentes.

Se entiende por inventario las características de ubicación, geométricas y de materiales de cada una de las estructuras, las cuales no cambiarán en el tiempo a menos que la estructura reciba una rehabilitación o sea sustituida.

Las estructuras evaluadas pertenecen a la red vial nacional, y se tuvo acceso a ellas gracias al contrato interadministrativo entre el CONAVI y el TEC, el cual inició su ejecución en el año 2014. La muestra analizada fue de 344 puentes, de diferentes características de una población esperada de 1440 puentes (24% de la población).

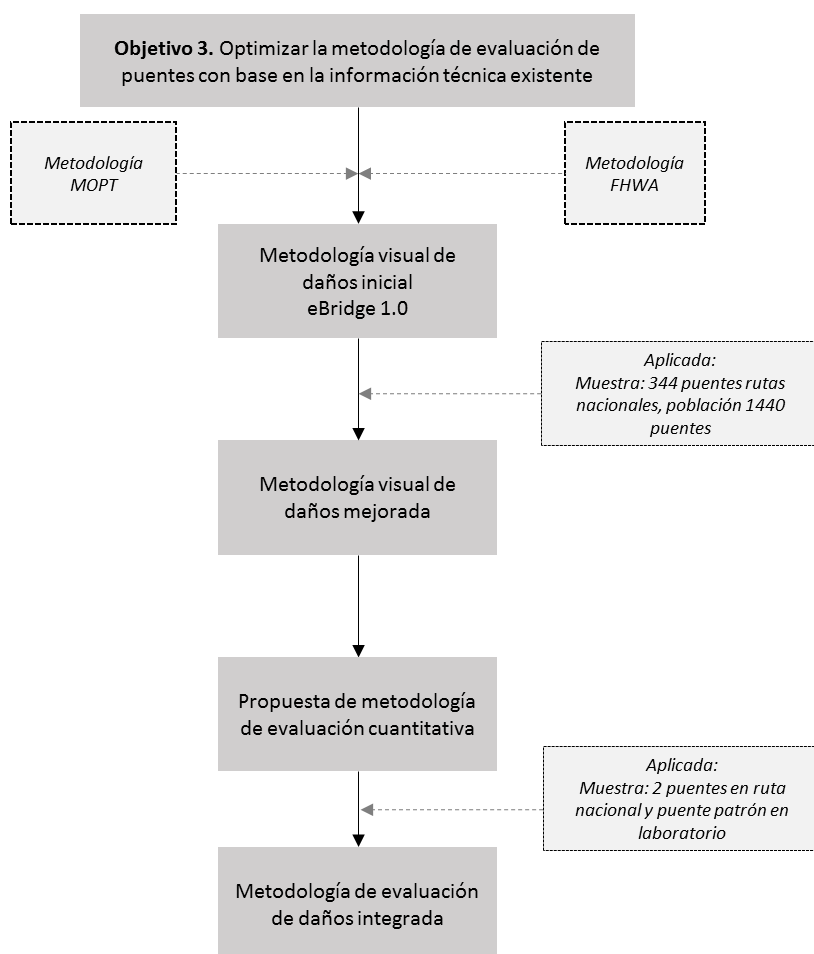


Figura 11. Metodología utilizada para el objetivo 3

La aplicación de la inspección de inventario y visual de daños, inició con 32 puentes ubicados en la provincia de Guanacaste, para realizar estas inspecciones a los ingenieros

inspectores responsables se les dio una capacitación y los manuales respectivos, así como los formularios para la toma de datos, sin embargo al evaluar el trabajo realizado, se observó que no existía una estandarización en la asignación de los grados de daños y mucho menos en el proceso de aplicación de la metodología de evaluación.

Durante los siguientes meses se aplicaron cambios en los diferentes procesos y formularios, así como en la simplificación de los informes finales. Todo esto concluye con una nueva propuesta de evaluación visual basada en procesos y bajo la norma INTE/ISO/IEC:17020:2012, la cual fue propuesta en el trabajo final de graduación del estudiante de Licenciatura en Ingeniería en Construcción Israel Monge Leiva. (Ver Apéndice 12-5. Procedimientos para evaluación visual de puentes).

Posteriormente, una vez que se contó con datos suficientes de inspecciones se generaron parámetros que permitirán determinar cuando una estructura requiere de una evaluación mayor y el tipo de análisis que podría realizarse. Dado que el proyecto de investigación no contaba con los fondos suficientes para realizar las otras etapas de evaluación, se recurrió también al contrato interadministrativo entre el CONAVI y el TEC, y se lograron analizar dos estructuras, con las cuales se puso en práctica la metodología propuesta.

5.4. Resultados

El resultado principal de este objetivo es el planteamiento de una metodología de evaluación de puentes integrada.

5.4.1. Metodología integrada para la evaluación de puentes

La evaluación de puentes debe partir en primer lugar de un inventario que permita conocer las características principales de las estructuras, con el fin de orientar las evaluaciones hacia determinar sus puntos vulnerables.

Dado que en Costa Rica no se cuenta con un inventario completo de las estructuras existentes, se utilizaron los datos recopilados por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes del Tecnológico de Costa Rica e introducidos al Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP), a setiembre del 2015 con una muestra de 344 puentes. Esto nos permitió caracterizar las estructuras de forma general. Además se analizaron los principales daños encontrados y su valoración visual. (Ver Apéndice 12-6. Resultados obtenidos para el inventario nacional de puentes)

De estas estructuras analizadas, solamente el 22% cuenta con planos constructivos y se conoce de su fecha de construcción o inauguración del 30%. Esto representa un riesgo importante ya que desconocen los parámetros para los cuales fueron diseñados y por lo tanto la estimación teórica de su vida útil se hace imposible.

Considerando los datos existentes, y la observación realizada, a continuación se muestra en forma gráfica la caracterización de las estructuras correspondiente al 30% del total de puentes en rutas nacionales.

Cuadro 7. Estructuras de puentes por década de construcción¹

Década de construcción	Cantidad de puentes
Años 20's	3
Años 30's	7
Años 40's	3
Años 50's	13
Años 60's	11
Años 70's	29
Años 80's	14
Años 90's	15
Años 2000's	8

Puentes por década de construcción

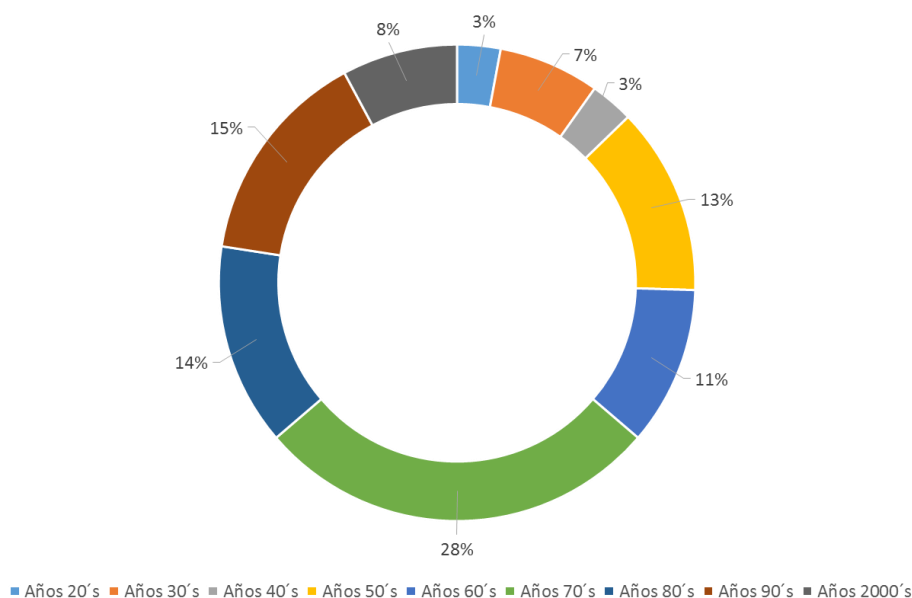


Figura 12. Porcentaje de puentes por década de construcción.

De la información disponible y mostrada, podemos observar que el 26% de las estructuras ya cumplieron su vida útil, suponiendo una vida útil de 50 años y sin conocer el mantenimiento recibido, y el 39% de los puentes están muy cerca de alcanzar esta estimación de vida útil. Esto plantea un problema y es la incógnita de si el país tiene los recursos necesarios para su sustitución. Otros países que se han enfrentado a este problema, se han enfocado en establecer metodologías y parámetros claros de evaluación,

¹ Corresponde a los puentes que cuentan con esta información, a la fecha 103 puentes.

inversiones fuertes en mantenimiento y rehabilitación de estructuras, teniendo en algunos casos estructuras de más de 150 años en perfecta funcionalidad.

De allí que el tener claro cuáles van a ser los parámetros de evaluación en el caso de Costa Rica es fundamental.

La evaluación puede tener varios enfoques, entre ellos:

- Deficiencia estructural
- Deficiencia en seguridad
- Obsolescencia funcional

La primera, y que es la que se enfoca el país en este momento, se refiere a un enfoque de evaluación basado en aspectos estructurales. Para iniciar la evaluación de una red de puentes que tiene poca información y que no se tiene inventariada es el mejor enfoque.

Posteriormente se deben analizar elementos de seguridad vial en la estructura tanto para peatones como para vehículos y finalmente analizar la funcionalidad de la estructura.

Paralelamente los datos que se obtienen pueden ayudar en determinar vulnerabilidad de la estructura ya sea desde un punto de vista sísmico, como de su capacidad hidráulica.

Una vez realizada la evaluación cualitativa se debe evaluar la necesidad de una evaluación cuantitativa, para ello se sugiere utilizar los datos obtenidos en la evaluación visual, de acuerdo a lo mostrado en la figura 9.

Valor de la evaluación	Nivel del daño	Sugerencia
1	No hay daño evidente	Inspección rutinaria posterior
2	Leve	Inspección rutinaria posterior
3	Intermedio	Pruebas adicionales
4	Avanzado	Pruebas adicionales
5	Deficiente	Pruebas adicionales

Figura 13. Propuesta de aplicación de metodologías cuantitativas para evaluación de puentes, de acuerdo al grado de daño de la inspección visual

El nivel de profundidad de cada paso en la evaluación cuantitativa, dependerá de lo obtenido en la inspección visual de daños.

Con respecto a las evaluaciones cuantitativas, estas se pueden enfocar en análisis del material o análisis de comportamiento. Para el análisis del material se utilizaron de preferencia métodos no destructivos y para el análisis de comportamiento la medición

utilizando instrumentación electrónica. En el caso de este proyecto se valoraron 2 estructuras de forma detallada (utilizando para ello el contrato interadministrativo CONAVI-TEC), el puente sobre el Río Virilla ruta nacional 1 y el puente sobre el río Aguacaliente. Ver Apéndice 12-7 y 12-8 con detalle de resultados.

5.5. Discusión y conclusiones

Una vez aplicadas las metodologías resultado de eBridge 1.0, se valoraron cambios importantes específicamente en estandarizar los procedimientos, de tal forma que se garantiza una evaluación menos subjetiva. En el Apéndice 12-5, se adjuntan los procedimientos propuestos, así como los instructivos y los formularios para la toma de datos. Estos procedimientos están basados en el Manual de evaluación de puentes del MOPT, recomendaciones de la AASHTO y la experiencia generada en el proyecto. Lo más importante en este caso es la aplicación del procedimiento establecido.

Con respecto a las evaluaciones detalladas, como estas pueden tener diferentes enfoques, es necesario antes de cada evaluación la definición de los objetivos a alcanzar con la evaluación y ajustar los diversos procedimientos existentes, especialmente en la AASHTO, para alcanzar los resultados.

En el caso específico del puente sobre el río Virilla, ruta nacional 1, el enfoque fue un análisis de fatiga de la estructura, para lo cual se adaptó el procedimiento planteado en el Manual de Evaluación de Puentes de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011).

En el caso del puente sobre el río Aguacaliente, el enfoque de la evaluación era determinar la capacidad de carga real de la estructura, para ello se adaptó el procedimiento descrito en el Manual de Evaluación de Puentes de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011).

5.6. Recomendaciones

Con el fin de validar las metodologías expuestas, es necesario continuar con su aplicación siguiendo los procedimientos recomendados con el fin de garantizar la homogeneidad en los resultados, también se recomienda incluir estos procedimientos dentro del alcance de la acreditación con la ya cuenta el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, esto con el fin de potenciar la aplicación de los mismos a nivel nacional.

También se recomienda la documentación y adaptación al medio nacional de las evaluaciones detalladas y cuantitativas y documentar sus usos, de forma tal que se extienda su aplicación y beneficios a nivel nacional.

Por otra parte es necesario trabajar en generar herramientas móviles que permitan una toma de datos y procesamiento más ágil y con resultados en menor tiempo.

Es necesario además iniciar propuestas de investigación enfocadas en propuestas de mejora de las estructuras de acuerdo a su valoración y la experimentación de nuevos métodos constructivos y nuevos materiales.

6. Objetivo 4. Establecer un geo portal con la información proveniente de la evaluación de los puentes y su entorno

Responsable: Ing. Casia Soto Montoya, MSc.

6.1. Introducción

Se propuso generar un prototipo de servicio geoespacial para visualizar espacialmente y poder hacer relaciones entre los puentes y otras capas de información geográfica disponibles para los puentes evaluados por el proyecto eBridge. Se estudiaron algunos de los geoportales existentes para Costa Rica y para otros países. Además, se hizo una descripción de las herramientas que tiene cada geoservicio y se detectaron las características deseables de cada uno. Se definieron los perfiles de los usuarios y se concluyó que es necesario generar diferentes diseños del geoservicio para cada tipo de usuario. Entre las características deseables de los geoportales destacaron la presentación de los metadatos, la existencia de fotografía aérea y el permitir manejar varias capas de datos a la vez con un grado de transparencia. Sin embargo, cada decisión debe ser validada con el usuario final.

6.2. Marco teórico

Los sistemas de información geográfica

Los SIG son tecnologías para el manejo de información geográfica, están formados por equipos electrónicos (hardware) programados (software) que permiten manejar datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo de trabajo.

Los geoportales y las infraestructuras de datos espaciales

Un geoportal es un portal web que permite encontrar y acceder a información geográfica y servicios geográficos a través de la Internet. Algunos de los servicios que pueden ofrecer los geoportales son visualización, edición, análisis, descarga de información, cambio de sistema de coordenadas, entre otros. Los geoportales son importantes para el uso eficaz de los SIG y un elemento clave de las infraestructuras de datos espaciales (IDE).

Las IDE resultaron como respuesta a la diversidad de formatos y la imposibilidad de disponer en tiempo real de datos actualizados, diversas organizaciones han desarrollado

iniciativas para compartir información por medio de la WEB (Bernabé y López, 2012). Las IDE, son la manera más efectiva en que se adquiere, maneja, ordena y distribuye la información espacial, lo cual ha sido muy útil para las instituciones de gobierno en diferentes niveles. Sin embargo, los datos espaciales y sus servicios son muy heterogéneos, esto puede causar confusión al usuario final, si no hay una forma amigable de presentar los datos, ni tampoco una forma para analizarlos de forma sencilla, sin requerir de conocimiento avanzado en SIG (Xu *et al*, 2011). Una solución a este problema es el diseño de geoportales, que pueden eliminar la variación en la forma de presentar la información geográfica para ver, descargar o analizar datos espaciales.

Un geoportal es un sitio web que funciona como punto de acceso para obtener o cargar datos de información geográfica, también se define como un sitio que permite a través de una interfaz gráfica, visualizar datos espaciales con el objetivo de consulta (Tait, 2005) (Bolívar Leyva, 2008). Los geoportales funcionan como punto de acceso para buscar, agregar, compartir y visualizar información de las IDE; para que un geoportal tenga una interfaz gráfica robusta debe tener (Xu *et al*, 2011):

Interactividad: se refiere a la capacidad que tiene el usuario para manipular los mapas deseados.

Compatibilidad: relación entre la visualización de los datos y el tipo de contenido, en ocasiones se necesitan procesos adicionales para generar productos visibles.

Eficiencia: tiempos de transmisión (descarga / subida) de una capa o una imagen entre servidores y clientes.

Diseño de una IDE centrado en el usuario

Según Bernabé y López (2012), el geoportal es el punto de encuentro entre los usuarios, los productores y los proveedores de los servicios de la IDE en la web, debe proporcionar las funcionalidades que los usuarios requieren; algunas de estas funcionalidades son localizar, visualizar, descargar y procesar información. Los autores proponen el método de Diseño Centrado en el Usuario (DCU), las etapas que lo conforman son el análisis de requerimientos, el diseño, la evaluación, la implementación y la explotación.

La fase de análisis de requerimientos permite conocer los objetivos del Geoportal, los usuarios a los que está dirigido el servicio. Esta etapa además, permite determinar los contextos, casos de uso, contenidos y funcionalidades requeridos por los usuarios.

En la etapa de diseño y creación del prototipo se definen aspectos del diseño gráfico y aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema (configuración de servidores, programación de aplicaciones, etc.).

Posteriormente, en la fase de evaluación de los prototipos, por medio de los métodos de inspección, indagación o test, se obtiene retroalimentación sobre el desempeño del prototipo y el grado de satisfacción de los usuarios potenciales.

Por último se implementa el prototipo optimizado resultante de la fase anterior, y el geoportal se pone en producción.

El diseño de la página principal requiere especial importancia, ya que esta debe atraer al usuario y hacerle fácil la identificación de contenidos y funcionalidades; debe ser diseñada teniendo presente las capacidades y necesidades de los usuarios a los que está dirigido el servicio. La navegación debe proporcionar al usuario una experiencia conforme con sus

expectativas. Se recomienda utilizar nombres comprensibles y descriptivos en los enlaces de navegación, incluir referencias que ayuden a saber en todo momento la ubicación dentro de la estructura del sitio, facilitar el acceso rápido a los contenidos por medio de un buscador adecuado, desplegar rápidamente la cartografía, etc. (Bernabé y López, 2012).

Desarrollo de prototipos de geoportales

Según Sommerville (2002) citado por Moreno (S.F) la creación de un producto de software puede realizarse mediante diferentes modelos de programación, entre los cuales se encuentran el lineal y el iterativo basado en prototipos. En el segundo caso se generan prototipos que son modelos experimentales de un sistema o de un componente de un sistema, con los elementos necesarios para permitir su uso. El autor manifestó que los prototipos son un medio eficaz para aclarar los requisitos de los usuarios e identificar las características de un sistema que deben cambiarse o añadirse, permiten verificar la viabilidad del diseño.

6.3. Metodología

Revisión del estado del arte

Se hizo una revisión a través de internet de seis geoportales nacionales y cuatro geoportales de otros países, que actualmente están disponibles a través de internet, con el objetivo de tomarlos como referencia para el diseño del prototipo. Se hizo una descripción de los elementos de esos geoportales y se resaltaron los elementos frecuentemente encontrados, así como los elementos que se cree pueden ser de utilidad para el geoportal de eBridge.

Análisis de requerimientos para el prototipo

Para hacer el análisis de requerimientos para el prototipo del geoportal se definieron y analizaron los posibles usuarios del geoservicio, tomando como base la experiencia generada con el contrato de eBridge-CONAVI.

Posteriormente, se aplicaron entrevistas a funcionarios del CONAVI y de municipalidades. Además, Se trabajó con estudiantes de la Maestría en Gestión Vial en la configuración de un geoportal básico con la tecnología de ADDAX Software, los estudiantes propusieron otras herramientas que consideraron necesarias para el geoportal. También, se aplicó una entrevista abierta a los usuarios internos del proyecto eBridge, para definir las tareas realizadas con el SIG, los flujos de trabajo y los casos de uso.

Diseño del prototipo del geoportal

Se utilizó la información del estado del arte y la obtenida mediante el análisis de requerimientos para proponer una herramienta acorde a lo existente.

Generación de los prototipos

Se hizo una comparación de los paquetes tecnológicos más utilizados y se seleccionó uno para generar el prototipo del geoportal.

6.4. Resultados

6.4.1. Revisión del estado del arte sobre geoportales existentes y sus características

Se encontraron geoportales creados por instituciones privadas o instituciones de gobierno que facilitan información a los usuarios, a continuación se describen algunos de ellos:

Geoportal de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE)

RECOPE cuenta con un geoportal sencillo en el cual se muestran sus planteles de almacenamiento y distribución, además, muestra la ubicación aproximada de la tubería del poliducto (RECOPE, 2014).

El geoportal utiliza el mapa base de *Google Maps*, permite visualizar la vista del mapa general, imágenes satelitales y un mapa del relieve. El Geoservicio, simboliza los planteles de RECOPE con archivos en formato de tipo punto a los cuales se les puede hacer clic izquierdo para consultar la ubicación, última fecha de actualización y el nombre del plantel.

Geoportal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI)

El OVSICORI cuenta con un geoportal sencillo para mostrar la ubicación de sus estaciones a lo largo de Costa Rica. Este Geoportal al igual que los de RECOPE y FUNDECOR utilizan un mapa base de *Google Maps*, permitiendo visualizar el mapa o imágenes satelitales (OVSICORI, 2014). El Geoservicio permite seleccionar objetos espaciales en el mapa para obtener el código de nombre de la estación.

Geoportal de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA)

El Geoportal de la UNA tiene la función de dar información básica de la ubicación de sus sedes, facultades, centros, parqueos, sodas, bibliotecas, auditorios y teatros. Para seleccionar qué tipo de infraestructura o edificación se quiere buscar, se debe seleccionar en el menú ubicado sobre la vista general del mapa. Además, este geoportal permite trazar rutas desde un punto especificado por el usuario, hasta algunas de las sedes o puntos de la institución y brinda una serie de direcciones para llegar al destino final (UNA, 2014).

Este geoportal permite seleccionar elementos espaciales con el clic izquierdo, una vez seleccionados se muestra la información como nombre de la edificación, teléfonos, fax, sitio web y una imagen descriptiva.

Geoportal de la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR)

FUNDECOR trabaja con propietarios que quieran someter sus bosques o tierras al manejo de recursos naturales, por medio de convenios entre la institución y el propietario de la finca (Fundecor, 2014), los convenios se muestran en el geoportal que se encuentra en la página web, donde se puede obtener información como el área que abarca el convenio establecido, el número y tipo de convenio y el uso que tiene el suelo de la finca.

Este geoportal es informativo y no permite el análisis ni la carga de datos externos. Las herramientas detectadas en este geoportal son el acercamiento y alejamiento, el desplazamiento a través del mapa y la selección de atributos espaciales para obtener información de los mismos.

Geoportal de la Municipalidad de Palmares

La Municipalidad de Palmares, cuenta con un geoportal en el que brinda información geográfica a su población y usuarios en general, donde es posible consultar información del cantón, por ejemplo el tipo de calles, albergues temporales, instituciones públicas,

centros de salud, licencias de licores, toponimia (nombre de los barrios, urbanizaciones, entre otros), ríos, rutas de recolección de basura, catastros, zonas homogéneas, provincias y cantones. Estas capas se encuentran en un menú al lado izquierdo, se pueden desactivar y activar según convenga.

Esta interfaz permite visualizar el geoportal en dos formas, donde se puede pasar de la vista estándar a una vista en pantalla completa, una interfaz gráfica más amigable con el usuario y se habilitan nuevas herramientas (Municipalidad de Palmares, 2014).

Las herramientas que se habilitan en modo de pantalla completa son la medición de áreas y distancias, consulta de atributos y búsqueda de coordenadas. De igual forma, se habilita el botón de opciones de la capa, donde se puede elegir dar un grado de transparencia a la capa, el orden en que se muestran las capas y un acercamiento al área total que abarca la capa. El Geoservicio también tiene la posibilidad de cambiar el mapa base utilizando OpenStreetMap, Google Satellite, y Ortofotos con escalas 1:10000 y 1:50000 (Municipalidad de Palmares, 2014).

El Sistema Nacional de Información Territorial de Costa Rica (SNIT)

El Sistema Nacional de Información Territorial de Costa Rica fue generado por el Programa de Regularización de Catastro y Registro, con el propósito de generar información que sirva de insumo para la toma de decisiones relacionadas con el ordenamiento territorial. Busca involucrar a las instituciones que generan información de interés nacional y promover el uso correcto de la información geoespacial (SNIT, 2016).

El SNIT cuenta con un sitio WEB por medio del cual se tiene acceso a un catálogo de metadatos a un visualizador geográfico y servicios geoespaciales como WMS y WFS.

El visualizador tiene un panel de capas que permite activar y desactivar las capas que están organizadas por institución, tiene herramientas básicas de zoom y desplazamiento en el mapa. El visualizador permite, agregar capas por medio de los servicios WMS y WFS de otros servidores. Además, en este servicio se pueden medir longitudes y áreas.

Geoportal del Ayuntamiento de Barcelona, España

El geoportal del ayuntamiento de Barcelona, cuenta con una sección de descargas de colecciones cartográficas, documentos de estilo descriptivos, informativos o normativos, además de series de datos que el usuario final puede acceder. Este geoportal utiliza herramientas típicas de navegación en los mapas como acercar o alejar, vista total, vista previa, desplazamiento, ubicación de sitios con coordenadas, posicionamiento en zonas predefinidas, acercamiento por anchura de la imagen en metros, acercamiento o alejamiento por cambios en la escala y enfoque a los objetos seleccionados (Bolívar Leyva, 2008).

En este geoportal los atributos de los datos pueden ser exportados a formato Excel y cuenta con un filtro para elegir los datos que contengan características que el usuario defina. Otra propiedad importante que tiene este geoportal, es que cuenta con dos vistas, en la primera vista se pueden ver los datos originales del geoportal con su respectiva leyenda, en la otra vista se pueden visualizar capas con los servicios WMS al introducir una URL válida (Bolívar Leyva, 2008).

Para este geoportal está disponible la visualización de metadatos. Además, permite hacer búsquedas por palabras claves, temática, título, intervalo temporal o por delimitación de área geográfica (Bolívar Leyva, 2008).

Bolívar (2013) describe los servicios que conforman la IDE del ayuntamiento de Barcelona, conformados por WMS, WFS, catálogo de metadatos y servicio de geolocalización. También, la aplicación cliente corporativa de acceso a dichos servicios, permite acceder a las funcionalidades, herramientas e información territorial, relacionados con la gestión municipal y el ciudadano.

Nasa Spatial Wep Portal (SWP)

El SWP fue elaborado usando como base los mapas del servicio *Bing* perteneciente a Microsoft Corporation, con el propósito de asistir a la visualización del producto final que obtendrá el usuario. Los servidores de *Bing* tienen la ventaja de que se pueden presentar imágenes de alta calidad, mientras que los archivos raster provenientes de otro servidores (WMS o WCS) tienen un tope máximo de resolución. Además, Bing está diseñado para trabajar con imágenes segmentadas, esto permite que el usuario obtenga amplios mosaicos de imágenes de alta calidad (Xu *et al*, 2011). Se destaca el uso de servidores de este tipo que dan un aspecto agradable y facilitan la interpretación de la información. También se pueden usar como mapa base los servicios de Google Maps y OpenStreetMap.

Geoportal para visualizar los resultados de las iniciativas LEADER en la península Ibérica

Este geoportal tiene el propósito de mostrar los resultados de las políticas de desarrollo rural. Se ofrecen los datos para la península Ibérica, y se facilita la información al usuario de manera gratuita y sencilla (Nieto, Fernández, Hernández, & Gurría, 2010). Los autores destacan que el visor ofrece capacidad de visionado y navegación a través de toda la cartografía elaborada, permite obtener un mapa de lo que se está observando en ese momento en la ventana del visor y su impresión, y permite realizar con facilidad consultas sobre la información contenida en las bases de datos.

Las herramientas que se utilizan en la vista general del geoportal son la ventana de visor, el norte geográfico, el botón de actualizar, el mapa de referencia, el Zoom In/Out, el menú de capas, la leyenda, entre otros.

Geoportal Simón Bolívar

El Geoportal Simón Bolívar brinda información cartográfica y mapas geográficos de carácter oficial con temas de información social, económica y ambiental de Venezuela (Rujano, 2012).

El Geoportal Simón Bolívar se divide en tres niveles según Rujano (2012):

1. La capa de presentación: se refiere a la interfaz gráfica con que interactúa el usuario desde su navegador.
2. Capa para el modelo de negocio: se refiere al manejo de las solicitudes hechas al servidor.

3. Capa de persistencia: se refiere a identificar todos los ficheros e imágenes de las bases de datos y permitir exportarlos a formato vectorial con sus atributos asociados.

El objetivo de este proyecto fue trabajar con datos en gvSIG, para luego cargarlos a los servidores y publicarlos por medio de los geoportales en capas de información (Rujano, 2012).

Este geoportal utiliza como mapa base el servidor de OpenStreetMap, sin embargo se puede cambiar por imágenes raster obtenidas de servidores WMS. El geoportal cuenta con herramientas que permiten calcular áreas dibujadas por el usuario y la medición de distancias. A la izquierda, cuenta con un menú de capas, las cuales el usuario puede activar y desactivar a conveniencia. Estas capas se encuentran clasificadas en archivos vectoriales y archivos de imágenes satelitales en formato raster (Gobierno Bolivariano de Venezuela, 2014).

6.4.2. Análisis de requerimientos para el prototipo

Usuarios del geoportal de eBridge

Usuarios externos del geoportal

Se identificaron como usuarios externos del geoportal los siguientes:

Ciudadano usuario de la red vial

Cualquier ciudadano que quiera tener información general sobre el estado de los puentes, rutas alternas, cierres, restricciones de peso, restricciones en altura, entre otros.

Técnicos del MOPT-CONAVI

Técnicos que se encargan de mantener y actualizar los puentes de la red de carreteras nacionales.

Técnicos de las Municipalidades

Técnicos que se encargan de mantener y actualizar los puentes de las carreteras cantonales.

Usuarios internos del geoportal

Se identificaron como usuarios externos del geoportal los siguientes:

- Coordinador
- Asistente técnico
- Encargado del SIG

Entrevista abierta realizada a los usuarios internos del geoportal

Se definieron tres perfiles de usuarios internos para el geoportal, estos perfiles corresponden al coordinador, el asistente técnico y el encargado del SIG. En el segundo semestre del 2014 se hizo una entrevista abierta a cada usuario para que solicitaran lo requerido en el geoportal. A continuación se presentan los resultados de la entrevista:

Coordinador

El coordinador solicitó lo siguiente:

- Buscar puentes existentes por ruta.
- Consultar rutas alternas a las utilizadas por los puentes.
- Introducir al sistema un informe de los inventarios y de mantenimiento realizados a los puentes.
- Elaborar rutas para realizar mantenimiento a los puentes, las cuales se puedan enviar a terceros.

Asistente técnico

El asistente técnico solicitó lo siguiente:

Consulta general:

- Ver e insertar imágenes de los puentes, las imágenes deben ser del perfil del puente para ver el tipo de estructura del puente, además de una foto general para ver las dimensiones de calzada.
- Ver y agregar información de tránsito promedio diario (TPD), cantidad (porcentajes de vehículos livianos y pesados) y caracterización (tipo de camiones más comunes y dimensiones).
- Informar la ruta en la que se encuentre cada puente.
- Ver y añadir datos de cada inspección del puente, que indique el tipo de inspección, fecha y encargado.
- Generar alertas sobre el estado en que se encuentra cada puente. Estas alertas serán dirigidas a los usuarios en general, y enfocadas a la seguridad vial, donde se indique si el puente se encuentra debidamente marcado, cuenta con barandas, entre otros.
- Informar acerca de la funcionalidad del puente enfocado a la capacidad para el tránsito que circula, restricciones por peso, alto y ancho.
- Información del entorno (cuenca y características como comunidades aledañas o cercanas, amenazas y riesgos, entre otros).

- Consultar en una ventana de información, de acceso rápido, para cada puente, la longitud, tipo de estructura y ancho total.
- Además, se requieren ver y añadir los esquemas en el geoportal de cada puente como los que se muestran en la figura 14. Esto debido a que se deben consultar diariamente.
- Observar el inventario de alcantarillas y añadir fotos de la alcantarilla inventariada.

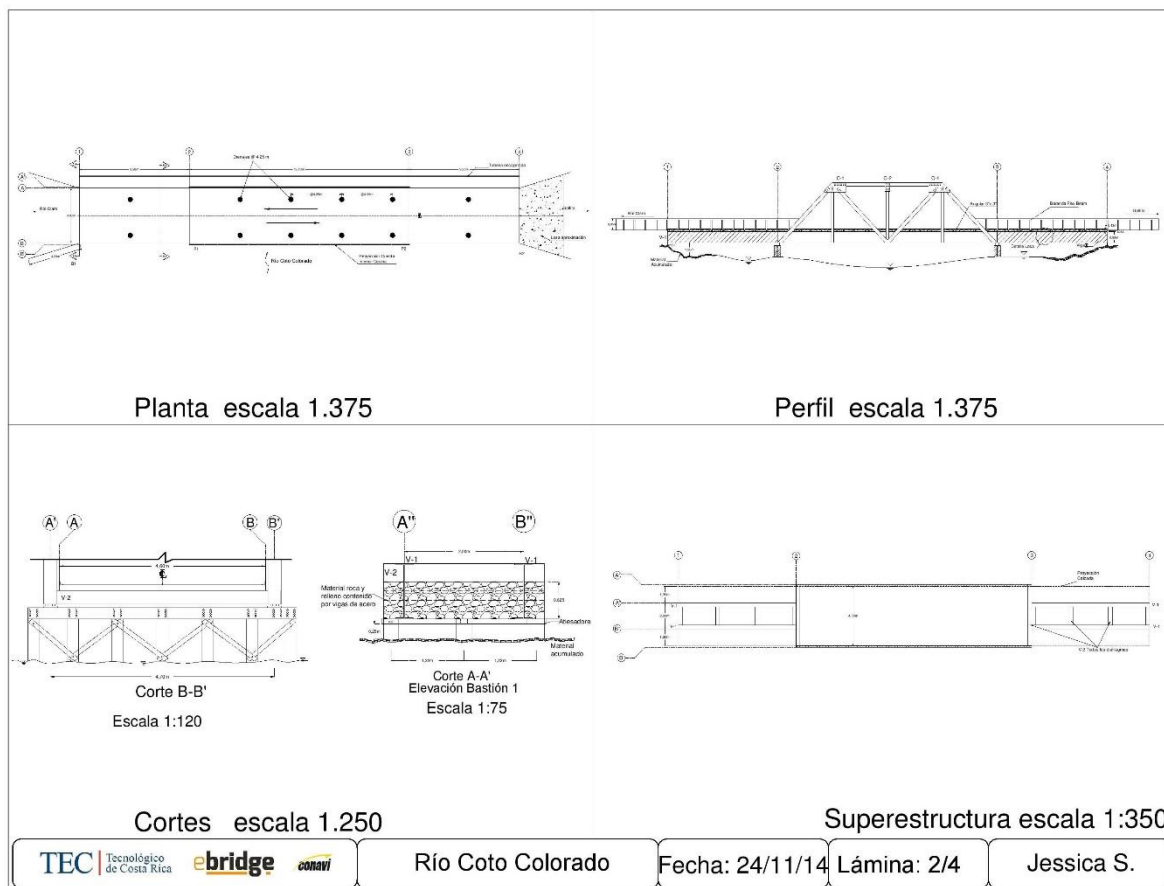


Figura 14. Esquema de puente sobre el Río Coto Colorado.

Consulta interna:

- Generar rutas alternas.
- Cargar y observar informes completos de cada puente.
- Manejar una base de costos de inspección en el sistema y producir estadísticos, para en un futuro realizar consultas de cuánto cuesta inspeccionar un puente. Las variables que afectan el costo son la longitud,

ubicación, accesibilidad y tipo de estructura, además de los viáticos, traslados y logística.

Encargado del SIG:

La encargada del SIG manifestó que el geoportal debe permitir:

- añadir las capas vectoriales de puentes,
- generar rutas alternas,
- agregar capas de riesgos,
- manejar los metadatos ,
- y debe permitir crear y modificar la simbología de las capas.

La persona responsable del SIG recibe la lista de puentes que serán inspeccionados en el trimestre, para cada puente se especifica el código, nombre, río que cruza, la ruta y el kilómetro en el que se encuentra. Posteriormente, genera una capa con la ubicación provisional de los puentes y obtiene las coordenadas en el sistema de coordenadas WGS84 y el sistema de proyección CRTM05. Adicionalmente, agrega el código de zona y la sección del puente.

El encargado del SIG entrega las coordenadas al asistente técnico para que las asigne a los equipos de inspección. Además, entrega las imágenes de ubicación y los mapas generales de los puentes.

Luego de la visita previa se entrega al encargado del SIG la lista con las coordenadas de los puentes tomadas en campo con GPS, las cuales se verifican con el mosaico de imágenes satelitales, si los puentes están correctamente georreferenciados se genera la capa oficial de puentes. Los puentes que no se encuentran debidamente georreferenciados se revisan y se ajustan.

Una vez validadas y corregidas las coordenadas de los puentes, el encargado del SIG actualiza la información sobre la zona, sección y kilómetro en que se ubica el puente. Además, genera la información ambiental (microcuenca y cobertura de suelo) para crear la capa oficial de puentes. Por último, genera los mapas ambientales para cada puente y las rutas alternas.

Diagrama de casos de uso

En la figura 15 se muestra el diagrama de casos de uso, este diagrama permite entender las actividades realizadas por los usuarios de cada perfil y la interacción entre estas actividades.

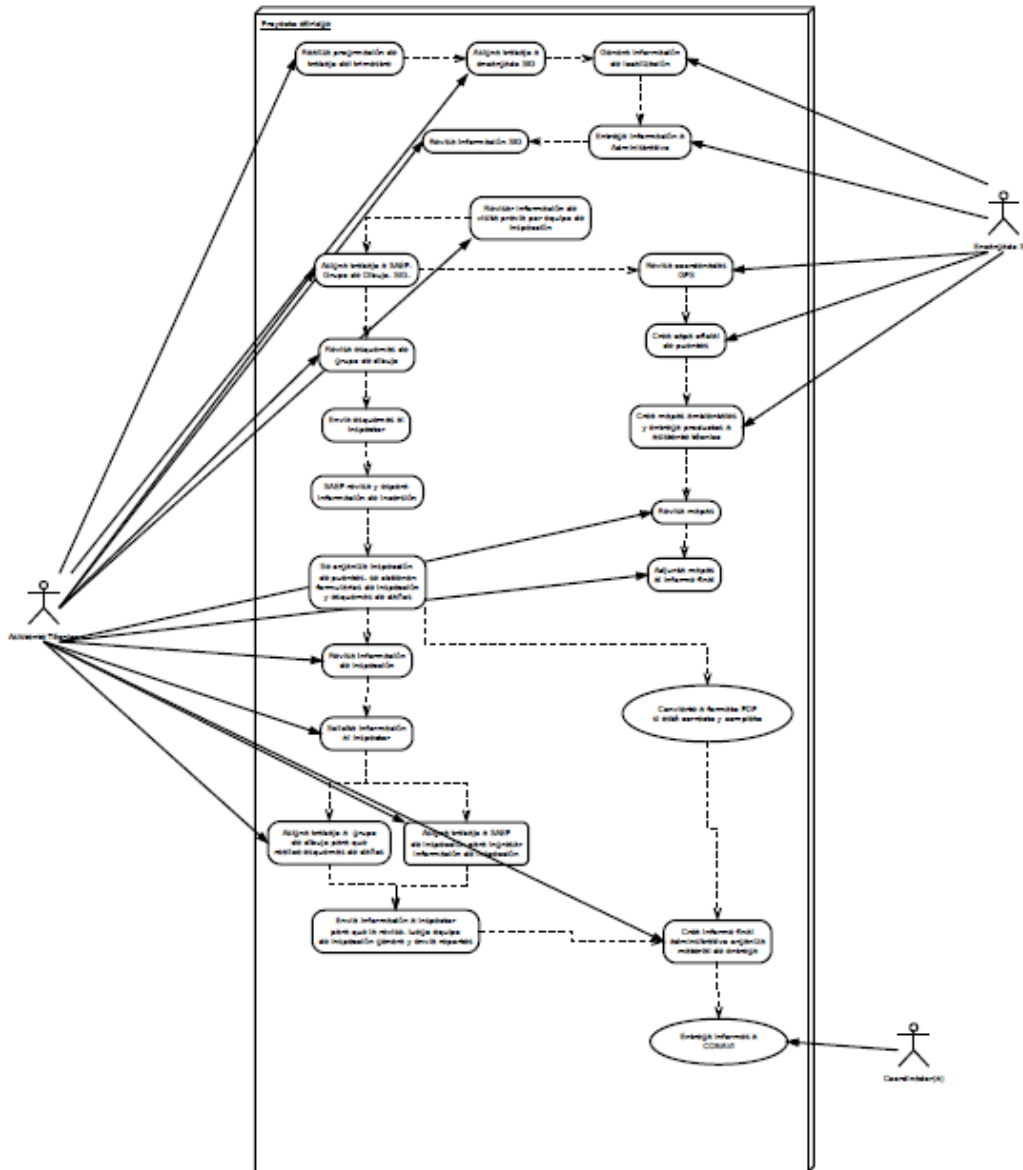


Figura 15. Diagrama de interacción entre usuarios y actividades.

Talleres para identificación de consultas y escenarios de requerimientos

Como se muestra en las figuras 3 y 4 no hay mucha diferencia entre la importancia que los usuarios dan a cada una de las actividades, los usuarios consideran que para su rutina diaria de trabajo, con una escala de 1 a 5 dónde 5 es el mayor nivel de importancia, las rutas alternas para ser utilizadas en caso de falla o mantenimiento tienen un nivel de importancia de 3,95 y los mapas de puentes a dar mantenimiento tienen un nivel de importancia de 3,90.

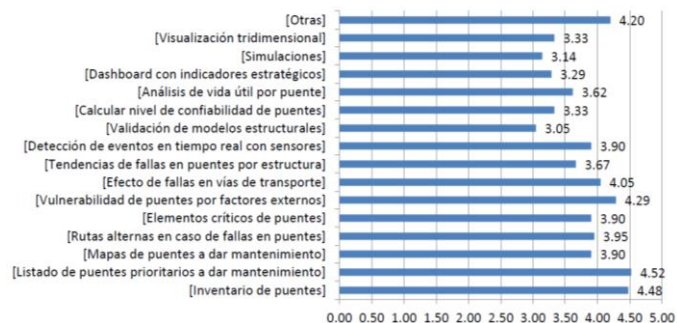


Figura 16. Evaluación de importancia de consultas en la su rutina diaria.

Fuente: Garita, 2014

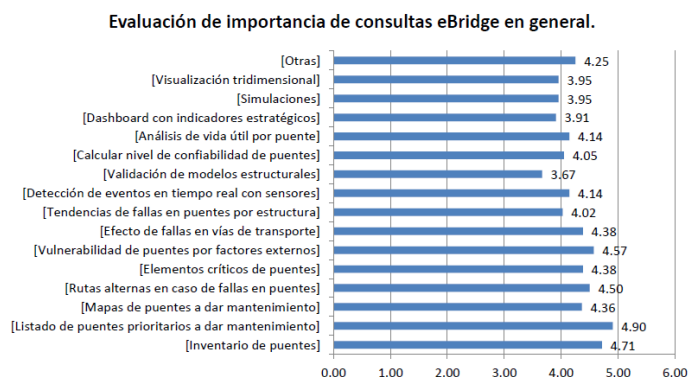


Figura 17. Evaluación de importancia de consultas en general.

Fuente: Garita, 2014.

6.4.3. Diseño de geoportales con potenciales usuarios

A continuación se presenta un resumen de las propuestas de herramientas para geoportales que manejen infraestructuras viales, las propuestas fueron hechas por los estudiantes del curso de maestría Sistemas de Información Geográfica Aplicado a la Ingeniería Vial, en ellas se puede analizar el tipo de consulta y resultado que espera el usuario.

Colaborador 1

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

Propuso una herramienta para calcular la ruta más corta en una red de caminos utilizando la variable de tiempo o distancia, con el objetivo de disminuir el tiempo o las distancias ya sean para el transporte de materiales para aplicar lastre a las carreteras, o para el transporte de cemento para la construcción de pavimentos unicapa. Además la herramienta debe

mostrar información de la distancia calculada y el estado en que se encuentra la superficie de rodamiento.

Otra herramienta propuesta fue la búsqueda o selección específica de transeptos de carreteras que se encuentren en mantenimiento, obteniendo un resumen de la distancia sometida a mantenimiento, el tipo de mantenimiento que se realiza en la carretera, tipo de suelos, capacidad soportante y cualquier tipo de información que sea relevante para los usuarios. Además la herramienta contaría con dos vistas para poder realizar dos consultas a la vez.

La tercera herramienta propuesta por este estudiante, consiste en que los administradores del geoportal puedan ingresar información con el fin de que el geoportal se mantenga actualizado. La información a actualizar consiste en el estado de la carretera, capacidad soportante y tipo de material de la carretera. Además propuso un historial de registro de datos, donde se indica el nombre del administrador que modificó los datos y el que rellenó el campo faltante. El ingreso de datos se pretende que sea por medio de una capa de puntos.

Colaborador 2

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

Este estudiante presentó herramientas básicas que debe tener el geoportal, como la visualización de capas de carreteras, cantones, puentes, ríos y una capa de alcantarillas; todas con sus respectivas etiquetas.

Colaborador 3

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: municipalidad

El estudiante propuso herramientas básicas como buscar información por atributos, medición de distancias y mostrar información de atributos.

Colaborador 4

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: empresa privada constructora

Propuso herramientas como el despliegue de información, el cálculo de la ruta más corta utilizando parámetros de tiempo o distancia, y una herramienta donde el usuario indique el tipo de vehículo, peso o ancho y con esa información calcular rutas óptimas para ese tipo de vehículos.

Colaborador 5

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: municipalidad

Propuso herramientas básicas como la visualización de información al hacer clic sobre objetos espaciales. Imprimir el área que se encuentra en el visor del geoportal, y una herramienta que permita la selección de tramos de carretera que necesiten ser revisados y

sometidos a mantenimiento. Además, propuso una herramienta que busque y muestre en la vista del geoportal tramos de carretera, ingresando códigos que correspondan a cada tramo.

Colaborador 6

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: institución pública de manejo de carreteras

Recomendó herramientas básicas para la visualización de capas.

Colaborador 7

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: empresa privada constructora

Propuso una herramienta que muestre la ubicación de los puntos de suministros de materiales que requiere la empresa constructora para sus proyectos. Además, propuso que se muestre la cantidad de materiales disponibles en los depósitos haciendo clic sobre los puntos de la capa.

Propuso calcular las rutas más cortas desde los tajos hasta los puntos donde se ubiquen los proyectos de construcción, o cualquier otro punto definido por el usuario.

Además, propone otra herramienta donde se muestre una tabla de resumen de los tajos de la constructora, donde se muestre toda la información de disponibilidad de materiales, ubicación de los tajos y teléfono, con el fin de facilitar la búsqueda al usuario.

Colaborador 8

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

Propuso una herramienta que permita una búsqueda para usuarios del geoportal que desconocen el nombre o códigos de las carreteras. Las variables a utilizar en la búsqueda son provincia, cantón, distrito y poblado. Además, propuso crear otra búsqueda para funcionarios de la institución pública y proveedores, esta búsqueda será avanzada y las variables serían Zona, Ruta, Sección y Proceso.

Propuso crear un informe de las búsquedas realizadas (PDF o EXCEL) con información adicional como: clase, longitud, límites, provincia, cantón y todas las contrataciones o licitaciones asociadas. También propuso la función para que el usuario del geoportal pueda elaborar mapas de las búsquedas y exportarlos en formato PDF o JPEG.

Colaborador 9

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

El estudiante propuso crear una herramienta de búsqueda utilizando criterios establecidos en la tabla de atributos de las capas del geoportal, al ingresar el valor que desea buscar se resaltarán los objetos geográficos en color rojo. Otro método que propone para realizar la búsqueda es seleccionar una variable y que se muestren todos los valores que contiene

dicha tabla, donde el usuario puede seleccionar y completar su búsqueda sin ingresar datos.

Además, propuso una herramienta para crear informes de las expropiaciones a realizar por una institución pública, creó un botón llamado “Crear ficha de expropiación”, donde se genera una ficha en formato PDF que contiene datos registrales, catastrales y procesos de expropiación. La ficha contendrá una imagen de la zona a expropiar en el geoportal y el área de la misma, calculada por esta herramienta.

Propuso crear una herramienta que permita obtener información catastral y sobre la expropiación, en forma de cuadro resumen, donde además se permite editar la información.

Colaborador 10

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: municipalidad

No presenta propuesta de herramientas clara.

Colaborador 11

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

Propuso herramientas básicas de un geoportal.

Colaborador 12

Formación: ingeniero en construcción

Campo de trabajo: empresa privada - constructora

Propuso elaborar una herramienta donde se puede observar el inventario de alcantarillas al seleccionarlos haciendo clic sobre los elementos geográficos en el geoportal. Además permite al usuario añadir fotos de la alcantarilla inventariada.

Propuso el almacenamiento de datos después de una inspección realizada a un puente o alcantarilla, donde se indiquen las patologías que presenta el puente para brindar una perspectiva del estado del puente, con el costo estimado de la reparación que requiere.

Propuso generar cuadros comparativos, donde se muestran las vistas previas de las estructuras seleccionadas, con el estado.

Colaborador 13

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: municipalidad

Propuso una herramienta que permite calcular la ruta más corta, permitiendo al usuario elegir el tipo de carretera ya sea asfaltada o de lastre.

Otra herramienta propuesta fue mostrar gráficamente la cantidad de carreteras por distrito en porcentaje del cantón de la municipalidad haciendo clic sobre cada distrito.

Colaborador 14

Formación: ingeniero civil

Campo de trabajo: institución pública - manejo de carreteras

El estudiante sugirió elaborar una herramienta donde se puedan consultar las rutas alternas disponibles, al estar un puente en mantenimiento o intervención. Además de mostrar información de tiempos de recorrido y distancia.

Propuso una herramienta que muestra información de contratos ejecutados en el puente, tiempo de intervención, inversión realizada para su intervención y una vista previa del puente.

Propuso una herramienta para que el usuario pueda hacer comentarios o consultas sobre los puentes y sea remitido por medio del correo de la institución pública encargada, para que un funcionario de la institución responda.

6.4.4. Diseño de prototipo de geoportal

Comparación de los paquetes tecnológicos más utilizados

En el cuadro 8, se muestra un resumen de los productos que se analizaron para generar el prototipo del geoportal.

Cuadro 8. Resumen de características presentadas en el documento GIS Cloud.

Producto	ArcGIS Online	CartoDB	GIS Cloud	MangoMap	MapBox
Tipo	Propietario	Open Source	Propietario	Propietario	Propietario
Acceso a atributos	Mediante API	Mediante API	Mediante API	No	Mediante API
Edición de atributos y geometría	Si	Si	Si	Si	No
Despliegue de etiquetas	No	Si	Si	Si	Si
Almacenamiento	10 MB	100 MB	1GB	2GB	3GB
Formatos	shp, gpx, csv	shp, xls, csv, gpx	shp, xls, csv, tab, kml, gpx, jpg, gif, png	shp	shp, kml, geojson, geotiff, csv, sqlite
Simbología	Configurable a través de valores de datos	Totalmente configurable a través de Carto CSS	Limitada	Configurable a través de valores de datos	Totalmente configurable a través de Carto CSS

Producto	ArcGIS Online	CartoDB	GIS Cloud	MangoMap	MapBox
Despliegue de datos	Configurable mediante HTML, Javascript y CSS	Configurable mediante HTML, Javascript y CSS	Básico, no configurable	Básico, no configurable	Configurable mediante HTML, Javascript y CSS
Funcionalidad adicional	Búsqueda por nombres de lugares, impresión	Acceso a todas las funciones de SQL y PostGIS	Mapas de calor, filtros mediante PostGIS	Búsqueda, impresión, plantillas	Geocodificador
Precio	\$2500 anual por 5 usuarios	\$539 anual	\$660 anual	\$588 anual	\$588 anual

Método de programación propuesto

En la figura 18 se muestra el método de programación propuesto para generar el Geoservicio.

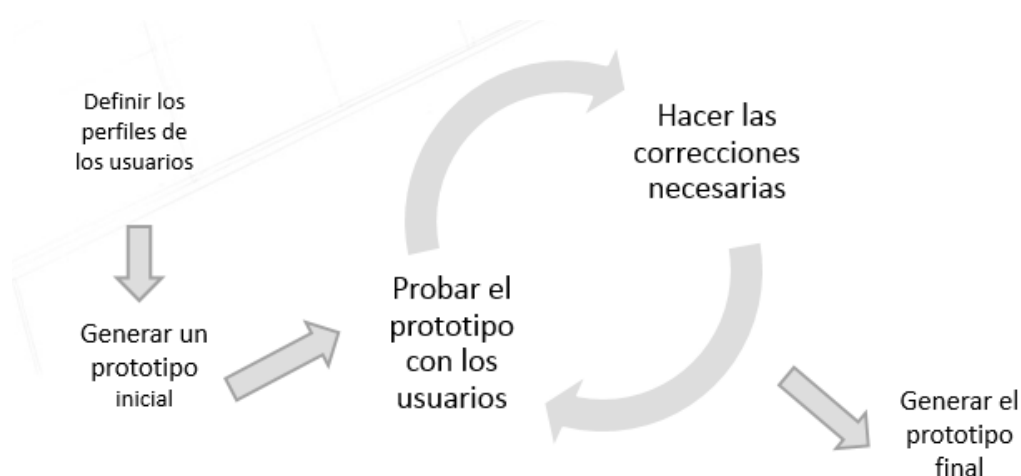


Figura 18. Metodología utilizada para crear el geportal.

Desarrollo del prototipo del geportal

El primer prototipo de geportal se generó con CartoDB, consta de una ventana principal que muestra en una ventana pequeña la información del proyecto y de fondo tiene el mapa (Figura 19). En este prototipo el usuario siempre tiene acceso al panel de capas y a la tabla de atributos con la información de los puentes (Figura 20). Además, el usuario puede hacer búsquedas de puentes específicos y editar la información de la tabla de atributos (Figura 21).

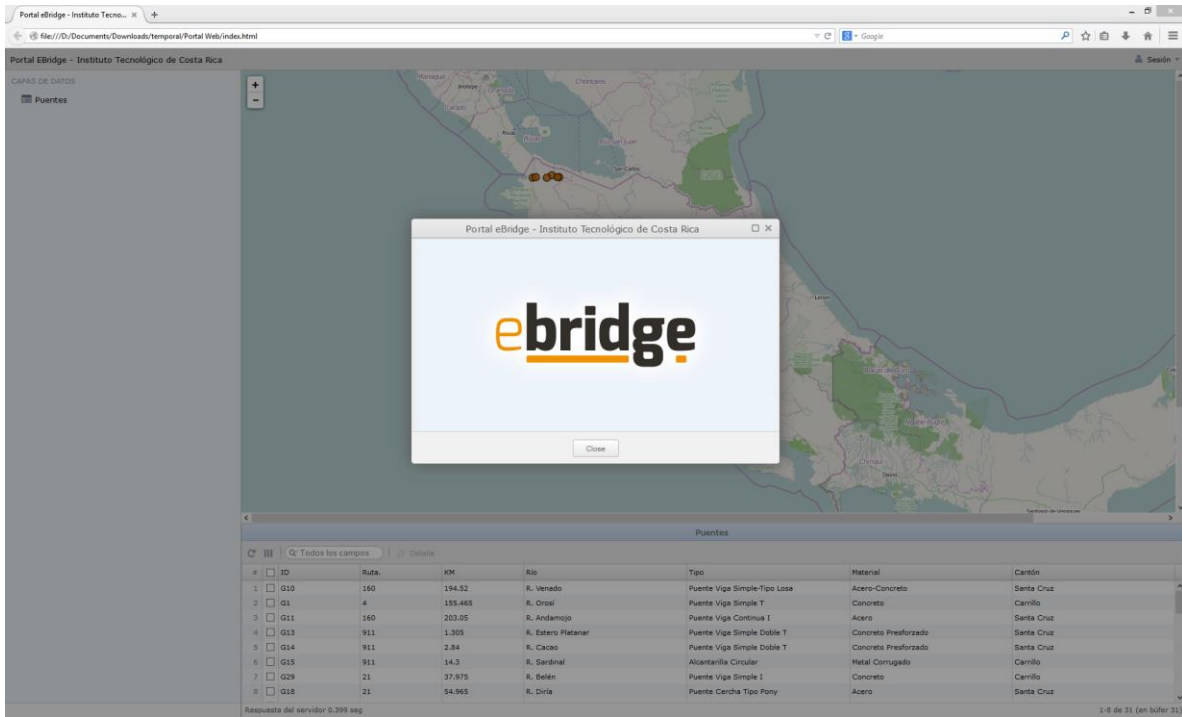


Figura 18. Ventana principal generada con CartoDB.

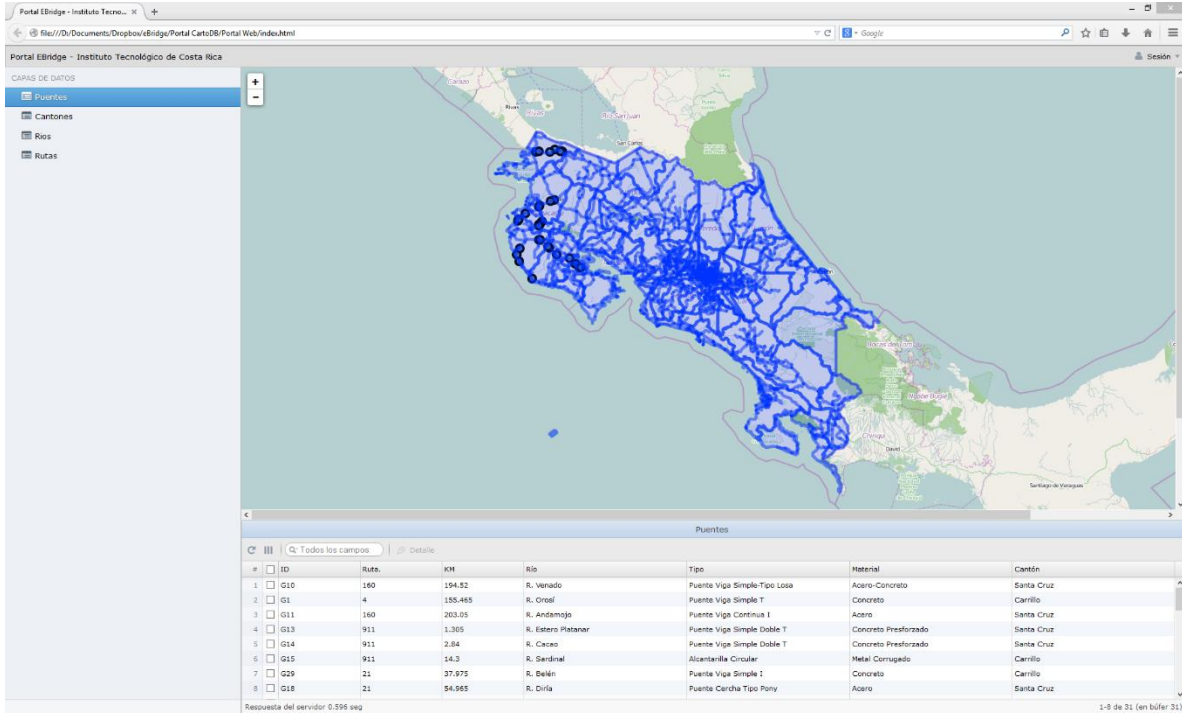


Figura 19. Panel de capas y tabla de atributos de los puentes.

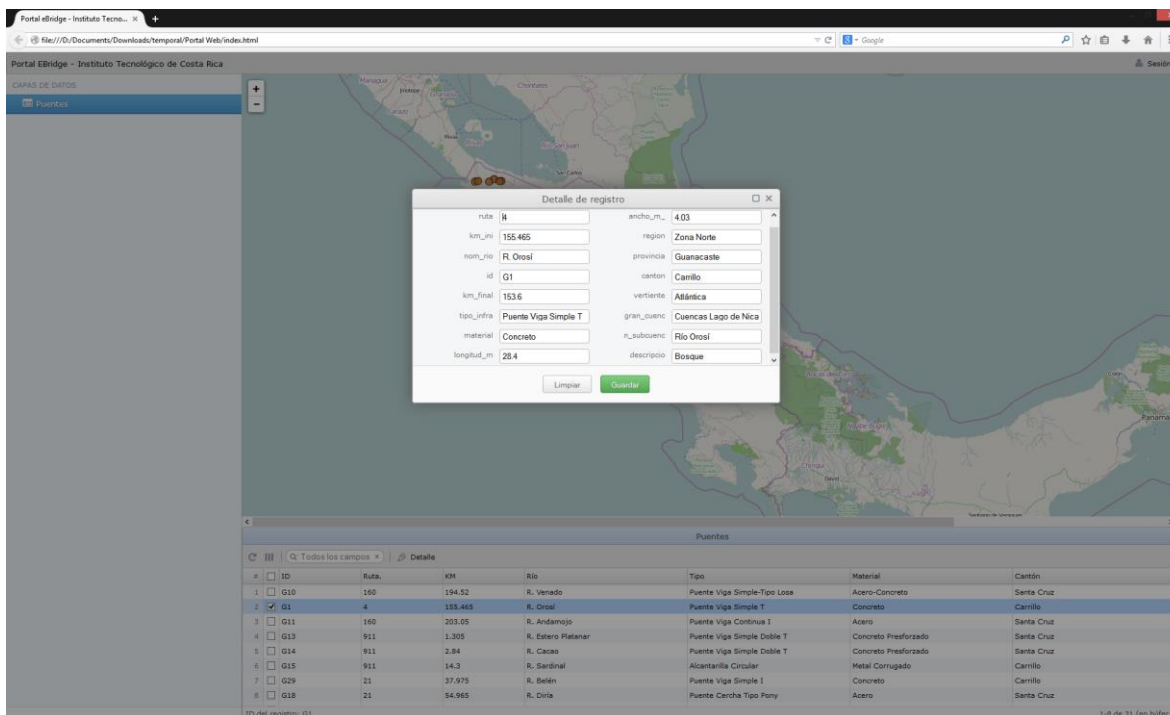


Figura 21. Hacer búsquedas y editar información.

6.5. Discusión y conclusiones

Revisión del estado del arte sobre geoportales

No se encontró ningún geoportal con las funcionalidades esperadas para el geoportal de eBridge; sin embargo, los geoportales encontrados sirvieron de referentes para determinar las herramientas básicas con las que debe contar este servicio. A partir de estas herramientas básicas se propuso otro conjunto de funcionalidades.

Análisis de requerimientos para el prototipo

Se considera que en el caso específico del geoportal de eBridge, los talleres para identificación de consultas y escenarios de requerimientos, no generaron información suficiente para la toma de decisiones, esto se determinó principalmente porque los usuarios dieron el mismo valor de importancia a todo y esto no permite priorizar.

Mediante el diseño de geoportales con potenciales usuarios se logró resultados más concretos, especialmente debido a que los usuarios fueron capacitados durante más de 10 sesiones de trabajo de cuatro horas sobre los SIG y fueron expuestos ante un geoportal base, sobre el cuál ellos diseñaron sus propuestas de herramientas.

Diseño del prototipo del geoportal

Para el diseño del geoportal se requieren elementos de software y hardware que pueden ser generados por el proyecto eBridge o comprados a través de una licencia y configurados para el proyecto. Por ejemplo, se puede montar el geoportal sobre tecnología de Esri, de CartoDB o de ADDAX.

Además, se deben configurar los flujos de trabajo para que el geoportal reciba y genere información conectado al resto de procesos del proyecto, para que se actualice y mantenga sin ser una carga adicional.

En general los geoportales están compuestos por un servidor de datos, conectado a una buena red de internet, acorde a la cantidad de usuarios y con disponibilidad 24 horas al día y 7 días a la semana. Por lo tanto se debe considerar si la colocación de este tipo de información con semejantes prestaciones es viable dentro del TEC.

Para generar un servicio que sea utilizado por los usuarios meta, se debe implementar un prototipo personalizado según el tipo de usuario del geoportel, esto se puede lograr con la metodología de enfoque en el usuario recomendada por Sancho y Callejo (2012). Además, según lo propuesto por los autores se debe contar con una página principal muy bien diseñada que tenga textos cortos y un lenguaje común, entre otros.

Desarrollo del prototipo del geoportal

Se seleccionó el modelo iterativo basado en prototipos para tener la flexibilidad de utilizar los prototipos para validar los requerimientos del geoservicio con los usuarios las veces que sea necesario hasta obtener un producto basado en el usuario.

El primer prototipo se generó con CartoDB, este prototipo está compuesto por una ventana para el despliegue de las capas geográficas, un panel de capas, una tabla de atributos que permite hacer filtros y búsquedas. Además, cuenta con las funciones básicas para desplazarse en el mapa.

A pesar de que en la etapa de diseño se generaron varios prototipos que contienen herramientas propuestas por los usuarios finales, en esta etapa de eBridge no se trabajó en un prototipo que integre todos los requerimientos, porque no se contó con la disponibilidad de personal humano ni recursos para realizar la programación. Sin embargo, estos productos quedan documentados como insumo para posteriores etapas del proyecto.

6.6. Conclusiones

Revisión del estado del arte sobre geoportales

- Los geoportales deben tener herramientas básicas de acercamiento o alejamiento, activar o desactivar capas, búsqueda por atributos o palabras clave, imprimir la vista actual o mostrar información de los objetos espaciales.

- Los geoportales deben permitir la visualización de los metadatos de las capas de información que contienen, esto permite dar al usuario final información sobre las fuentes de los datos, sus actualizaciones, la definición de sus contenidos o atributos. En los Geoportales estudiados solo se encontró esta función en el geoportal del Ayuntamiento de Barcelona.
- Uno de los elementos que se recomienda que deben tener los geoportales son los mapas base como lo mencionan los autores Xu *et al* (2011), debido a que mejoran el aspecto visual y es una buena ayuda gráfica para el usuario. Un ejemplo son los servicios de Bing brindados al geoportal de la NASA. Sin embargo, existen más opciones para utilizar mapas base como Google Maps, utilizado por los geoportales nacionales como el de la Municipalidad de Palmares, UNA, OVSICORI, RECOPE y FUNDECOR. Estos servidores no tienen un costo por su utilización, sin embargo existe la posibilidad de que cambien sus condiciones de servicio.
- Una solución a este posible problema es la utilizada por los autores del Geoportal Simón Bolívar (Gobierno Bolivariano de Venezuela, 2014) o el geoportal de la Municipalidad de Palmares (Municipalidad de Palmares, 2014), los cuales utilizan el servidor libre OpenStreetMap el cual funciona bajo la licencia “Open Database License” (ODbL), que permite copiar, distribuir, transmitir y adaptar sus mapas de información bajo la condición de darles el crédito correspondiente. Estos mapas se elaboran con la colaboración gratuita de expertos en SIG e ingenieros que se encargan de mantener los servidores funcionando correctamente (© Colaboradores de OpenStreetMap, 2014).
- Otro elemento importante a considerar en la elaboración de un geoportal es dar al usuario la función para añadir capas, ya sea en formato shape, WMS o WFS, para permitir al usuario añadir información complementaria y crear sus propios mapas de información. Esta función se encuentra disponible en el geoportal del ayuntamiento de Barcelona (Bolivar Leyva, 2008) y de Venezuela, con los cuales se puede añadir capas en formato WMS con el único requisito de ingresar una URL válida. En los demás geoportales vistos no se encontró alguna herramienta similar.
- Se recomienda definir diferentes perfiles de usuarios y de acuerdo a estos perfiles seleccionar los botones y herramientas, con el objetivo de hacer interfaces más amigables con cada tipo de usuario.
- Además, se recomienda que el Geoportal esté compuesto por una página de inicio, un catálogo de datos y servicios y un visualizador.
- En la página de inicio se pueden colocar noticias e información del proyecto, pero lo más importante de esta página es que permite hacer un filtrado inicial de la información por medio de un mapa (selección de una región) o de menús que segregan el tipo de información.
- Los Geoportales deben permitir manejar varias capas de datos a la vez, permitir dar un grado de transparencia a las capas, especialmente a los polígonos. De esta forma se permite ver con más facilidad capas de polígonos que se traslapan y generar mapas más personalizados.

Análisis de requerimientos para el prototipo

Algunas de las herramientas y funcionalidades propuestas por los estudiantes fueron:

- Cálculo de la ruta de menor costo (tiempo-distancia) para dar mantenimiento.
- Consulta del estado de un transepto, mantenimiento en proceso.
- Permitir agregar un punto para marcar un problema de mantenimiento, junto con información que permita la planificación de ese mantenimiento.
- Herramientas básicas que debe incluir el geoportal, como la visualización de capas de carreteras, cantones, puentes, ríos y una capa de alcantarillas; todas con sus respectivas etiquetas.
- Herramientas básicas como buscar información por atributos, medición de distancias y mostrar información de atributos.
- Herramienta donde el usuario indique el tipo de vehículo, peso o ancho y con esa información se calcule la ruta óptima para ese tipo de vehículo.
- Imprimir el área que se encuentra en el visor del geoportal.
- Herramienta que permita la selección de tramos de carretera que necesiten ser revisados y sometidos a mantenimiento.
- Herramienta que busque y muestre en la vista del geoportal tramos de carretera, ingresando códigos que correspondan a cada tramo.
- Mostrar la ubicación de los puntos de suministros de materiales, con el detalle de la cantidad de materiales disponibles en los depósitos haciendo clic sobre los puntos de la capa.
- Calcular las rutas más cortas desde los tajos hasta los puntos donde se ubiquen los proyectos de construcción, o cualquier otro punto definido por el usuario.
- Una tabla de resumen de los tajos, donde se muestre toda la información de disponibilidad de materiales, ubicación y teléfono, con el fin de facilitar la búsqueda al usuario.
- Búsqueda para usuarios del geoportal que desconocen el nombre o códigos de las carreteras. Las variables a utilizar en la búsqueda son provincia, cantón, distrito y poblado.
- Búsqueda para funcionarios de la institución pública y proveedores, esta búsqueda será avanzada y las variables serían Zona, Ruta, Sección y Proceso. Funcionalidad para generar un informe de las búsquedas realizadas (PDF o EXCEL) con información adicional como: clase, longitud, límites, provincia, cantón y todas las contrataciones o licitaciones asociadas.
- Función para que el usuario del geoportal pueda elaborar mapas de las búsquedas y exportarlos en formato PDF o JPEG.
- Búsquedas utilizando criterios establecidos en la tabla de atributos (filtros).

- Herramienta para crear informes de las expropiaciones a realizar con un botón llamado “Crear ficha de expropiación”, donde se genera una ficha en formato PDF que contiene datos registrales, catastrales y procesos de expropiación. La ficha contendrá una imagen de la zona a expropiar en el geoportal y el área de la misma, calculada por esta herramienta.
- Herramienta que permita obtener información catastral y sobre la expropiación, en forma de cuadro resumen, donde además se permite editar la información.
- Almacenamiento de datos después de una inspección realizada a un puente o alcantarilla, donde se indiquen las patologías que presenta el puente para brindar una perspectiva del estado del puente, con el costo estimado de la reparación que requiere.
- Generar cuadros comparativos, donde se muestran las vistas previas de las estructuras seleccionadas, con el estado.
- Herramienta que permite calcular la ruta más corta, permitiendo al usuario elegir el tipo de carretera ya sea asfaltada o de lastre.
- Mostrar gráficos de la cantidad de carreteras por distrito, en porcentaje del cantón, haciendo clic sobre cada distrito.
- Consultar las rutas alternas disponibles, al estar un puente en mantenimiento o intervención. Además de mostrar información de tiempos de recorrido y distancia.
- Herramienta que muestra la información de contratos ejecutados en el puente, tiempo de intervención, inversión realizada para su intervención y una vista previa del puente.
- Herramienta para que el usuario pueda hacer comentarios o consultas sobre los puentes y sea remitido por medio del correo de la institución pública encargada, para que un funcionario de la institución responda.

Diseño del prototipo del geoportal

En este estudio se diseñó un geoportal general, sin embargo se cuenta con seis tipos de usuarios, por lo tanto se debe aplicar el proceso iterativo basado en prototipos para generar productos para cada perfil de usuario.

El prototipo generado en esta etapa presentó únicamente funcionalidades de visualización y edición de datos en la tabla de atributos; sin embargo, se determinó que los usuarios menos básicos del geoportal requieren herramientas de proceso en línea, por ejemplo solicitan poder calcular la ruta alterna o la ruta de menor costo.

Se deben generar prototipos base para cada tipo de usuario y probarlos con los mismos para recibir retroalimentación hasta lograr herramientas que satisfagan las necesidades de cada uno.

6.7. Recomendaciones

Para que el proyecto eBridge pueda mantener su enfoque en infraestructuras de puentes, se recomienda utilizar alguna plataforma existente, alquilarla y contratar la personalización.

No se recomienda utilizar tecnologías para las que no se ofrezca el servicio de personalización, porque esto limitaría la usabilidad del servicio.

Se recomienda aplicar la metodología para desarrollo de usabilidad Hernández-Castro (2015), esta metodología genera insumos validados con los usuarios, para el diseño e implementación de los sistemas que simplifican y hacen menos costosa la etapa de desarrollo e implementación.

7. Objetivo 5. Desarrollar las herramientas de escalamiento de redes de sensores para monitorización estructural, mediante la optimización de la tecnología existente y su adaptación

Responsable: Ing. Francisco Navarro Henríquez, MSc.

7.1. Introducción

El proyecto de investigación que se desarrolla en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), denominado “*eBridge 2.0: sistema integrado para el desempeño de puentes*”, evalúa un sistema de instrumentación con sensores de fibra óptica FBG (*Fiber Bragg Grating*) que viene consolidándose en el monitoreo de la salud estructural de puentes, en pruebas no destructivas (NDT) estáticas y dinámicas con mediciones de deformación, desplazamiento, deflexión, temperatura y vibraciones.

Históricamente la fibra óptica ha sido utilizada en sistemas de comunicaciones que utilizan ondas luminosas para la transmisión y recepción de información. Pero desde el inicio de la década de los noventa se ha venido extendiendo la investigación en el campo de la optoelectrónica y, con esta, el desarrollo de productos en la industria de fibra óptica, especialmente la tecnología de sensores de fibra óptica. [1]

La tecnología de sensores de fibra óptica usa la fibra óptica ya sea como elemento sensor o como medio de transmisión de señales de un sensor remoto hacia un dispositivo electrónico que procesa las señales. Aunado al desarrollo de productos de alta calidad y confiables, ha ocurrido una rápida aceptación, e incluso el reemplazo en algunos casos, de los tradicionales sensores eléctricos, en una variedad de aplicaciones de detección, tales como: mediciones de deformación, esfuerzo (*strain*), temperatura, vibraciones, desplazamiento y deflexión, entre otras.

Particularmente en el área de aplicación de SHM, los sensores de fibra óptica han demostrado un gran potencial debido a que poseen una serie de ventajas únicas cuando se comparan con su contraparte tradicional.

La detección óptica usa luz en lugar de electricidad y fibra óptica estándar en lugar de cable de cobre. Las fibras ópticas, al no ser conductores de electricidad, son inmunes al ruido inducido por interferencia electromagnética (EMI) y a altos voltajes, así como resistentes a la corrosión metálica.

Además, son capaces de transmitir datos a largas distancias (hasta 10 km) con poca pérdida en la integridad de la señal. Igualmente, es posible interconectar múltiples sensores de fibra óptica con una sola fibra para reducir significativamente el tamaño, el peso y la complejidad de los sistemas de medición, y reducir potencialmente a largo plazo el costo de mantenimiento. [2]

Los sensores de fibra óptica son una alternativa muy apropiada para aplicaciones que se distribuyen o que abarcan una amplia zona geográfica. Decenas de sensores, incluyendo deformación, esfuerzo, aceleración y temperatura, pueden conectarse en cadena a lo largo de una sola fibra óptica. Los sensores ópticos son fiables para la instalación a largo plazo y, como resultado, se reduce el mantenimiento y la instalación de cableado requerido. Luego, la tecnología de sensores de fibra óptica permite realizar mediciones que antes eran imprácticas o, en algunos casos, imposibles con sensores convencionales.

7.2. Marco Teórico

Tecnologías de sensores de fibra óptica

En la actualidad existe una variedad de tecnologías de sensores ópticos, entre los cuales se pueden mencionar los interferómetros Fabry-Perot, Fiber Bragg Gratings (FBG), sensores distribuidos sobre la base de Rayleigh, Raman y técnicas de dispersión óptica de Brillouin. Dependiendo de la modulación de la luz y del efecto que se utiliza para medir los fenómenos físicos, estas tecnologías de detección óptica se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Intensidad
- Interferómetro
- Resonancia (Fabry-Perot)
- Distribución
- Polarimétrico
- Interferencia espectral (Fiber Bragg Grating)

Uno de los tipos de sensores ópticos más versátiles y ampliamente utilizados se denomina de rejilla de fibra Bragg (FBG, por sus siglas en inglés), el cual refleja una longitud de onda de luz específica que se transmite en respuesta a variaciones de temperatura o esfuerzo (*strain*).

Desde su descubrimiento en 1978 por Ken Hill [4] y su posterior desarrollo por varios centros de investigación, las rejillas dentro del núcleo de la fibra se han utilizado ampliamente en la industria de las telecomunicaciones.

Fundamentos de sensores de fibra óptica FBG

El espectro de frecuencias luminosas se puede dividir en tres bandas generales: infrarrojo, visible y ultravioleta. Cuando se manejan ondas electromagnéticas de mayor frecuencia, como las luminosas, se acostumbra a usar unidades de *longitud de onda* y no de frecuencia, puesto que el orden de las unidades de las frecuencias de las ondas luminosas va desde decenas de tera-hercios (THz, 1×10^{12}) para luz infrarroja, hasta decenas de peta-hercios (PHz, 1×10^{15}) para la luz ultravioleta, prefijos no comúnmente empleados para la unidad de frecuencia. La longitud de onda se suele expresar en *nanómetros* (1 nm equivale a 1×10^{-9} metros).

Una fibra óptica está compuesta por tres componentes principales: el núcleo, el revestimiento y la capa protectora. El revestimiento refleja la onda de luz de regreso al núcleo, asegurando la transmisión de la luz en el núcleo. Esta acción es posible debido a un índice refractivo más alto en el núcleo en relación con el revestimiento, lo que provoca una total reflexión interna de luz. La capa protectora sirve para proteger la fibra de condiciones externas y de daños físicos.

Un sensor de fibra óptica funciona al modular una o más propiedades de una onda de propagación de luz -incluyendo intensidad, fase, polarización y frecuencia- en respuesta a la variable física que se mide.

Los sensores de fibra óptica FBG son manufacturados aprovechando la tecnología actual en la industria de la fibra óptica para grado de telecomunicaciones, por medio de técnicas de exposición.

Dos configuraciones típicas consisten en exponer una pequeña porción de la fibra óptica a dos rayos de luz ultravioleta (UV) que interfieren un haz de luz UV enfocado a través de una máscara de fase. Esto crea en el núcleo de la fibra óptica una pequeña modulación periódica del índice de refracción. Esta alternación del índice refractivo de la fibra es permanente dada la intensidad de luz a la que es expuesto. La variación periódica que resulta en el índice refractivo se llama un *fiber Bragg grating*.

Debido a que la longitud de onda Bragg (λ_B) es una función de la separación entre las rejillas, los sensores de fibra óptica FBG pueden ser fabricados con varias longitudes de onda Bragg, lo cual permite a diferentes sensores FBG reflejar longitudes de onda de luz específicas.

La figura 22 muestra en forma esquemática las características de transmisión y reflexión en los sensores de fibra óptica FBG.

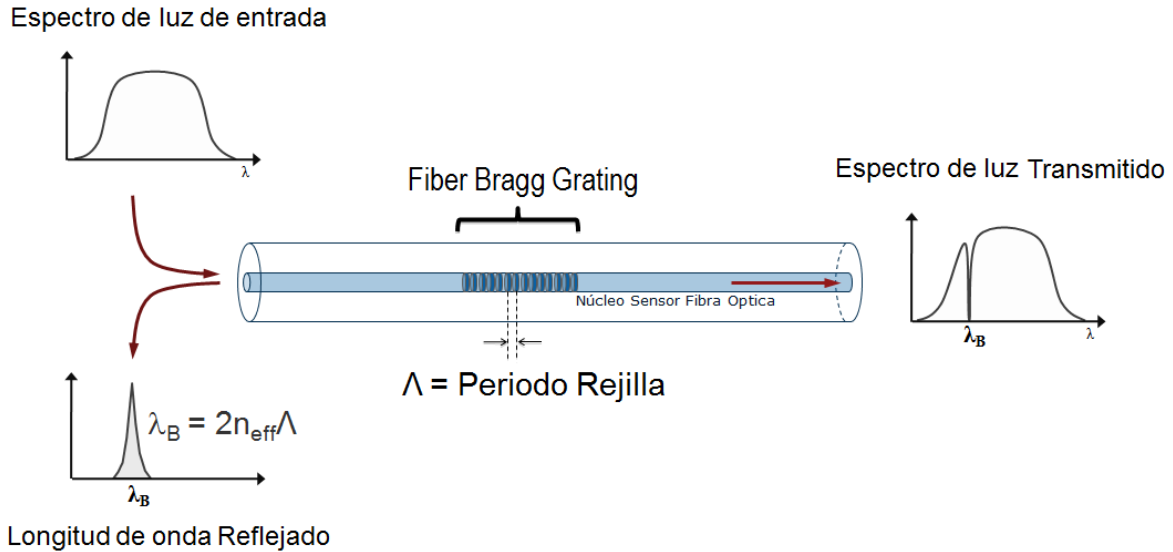


Figura 22. Operación de un sensor de fibra óptica FBG.

Un sistema de sensores de fibra óptica FBG se compone al menos de:

- Fuente y detector de luz.
- Elementos sensores de fibra óptica FBG.
- Fibra óptica y accesorios para la interconexión de la fibra.

La fuente y el detector de luz del sistema se incorporan en un equipo denominado **interrogador óptico**. Los métodos de interrogación óptica pueden categorizarse como: multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) y multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*).

La figura 23 muestra un diagrama genérico de la arquitectura interna de un interrogador óptico de láser de barrido rápido (*swept wavelength laser*) que usa el método de interrogación WDM para un sistema de sensores de fibra óptica FBG.

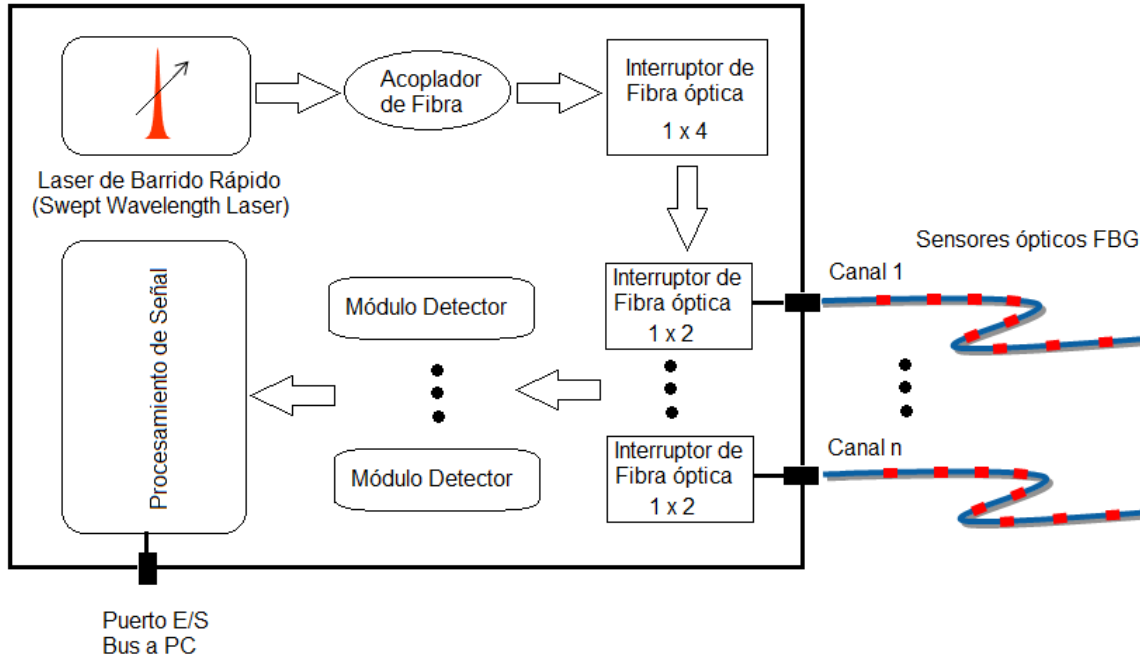


Figura 23. Diagrama interrogador láser de barrido rápido para sensores FBG.

Los interrogadores típicos proporcionan un rango de medición estándar de 80 nm, por lo que cada serie de sensores FBG puede incorporar hasta 20 sensores por canal del interrogador, siempre y cuando las longitudes de onda reflejadas no se traslapen en el espectro óptico. Para asegurar una adecuada operación, se acostumbra a dejar un rango aproximado de 4nm para el desplazamiento de la longitud de onda de los sensores de fibra óptica FBG.

Características de sensores de fibra óptica FBG para SHM

Los sistemas ópticos con sensores de fibra FBG han demostrado ser efectivos en el monitoreo de la salud estructural de obras civiles en diferentes áreas de aplicación, tales como: industria de petróleo y gas, generación eléctrica, transporte, aeroespacial e infraestructura civil.

Particularmente en la infraestructura de puentes, el monitoreo de la salud estructural basado en una plataforma de sensores FBG ha permitido implementar estrategias para la identificación de daños en varios niveles (detección, localización, tipificación, severidad), alertando por anticipado sobre posibles condiciones de riesgo de un puente. Además, si se cuenta con una base de datos y un sistema de monitoreo a largo plazo, es factible evaluar la magnitud de los daños y estimar la vida útil restante de una estructura.

Entre las principales mediciones que se requiere realizar en pruebas no destructivas para valorar el estado o desempeño de un puente, se encuentran: deformaciones, desplazamiento, deflexión y vibraciones. Estas mediciones, estáticas o dinámicas, pueden relacionarse directamente con los siguientes tipos de sensores de fibra óptica FBG:

- Esfuerzo (*strain*)
- Temperatura
- Acelerómetros

A continuación se expone cada uno de los tipos de sensores FBG mencionados, tomando como referencia el catálogo de productos de la empresa Micron Optics.

Medidor de esfuerzo (*strain*) FBG

La figura 24 muestra un sensor de esfuerzo (*strain*) de fibra óptica FBG con compensación de temperatura para medir deformación. Su tamaño aproximado es de 14cm de largo por 2,5 cm de ancho.



Figura 24. Sensor óptico FBG de esfuerzo. Os3155.

El límite de medición es de $\pm 2500\mu\epsilon$, con una sensibilidad $\approx 1.2\text{pm}/\mu\epsilon$. La vida útil por fatiga es de 100×10^6 ciclos a $\pm 2000\mu\epsilon$, con un rango operativo de temperatura de -40 a 80°C .

En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1586nm, para un rango operativo de 74nm, dejando un distanciamiento recomendado de 4nm entre la medición de esfuerzo ($\mu\epsilon$) y la temperatura, para el desplazamiento de las longitudes de onda sin interferencia.

La figura 25 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala con el espectro de las longitudes de onda de un sensor FBG de esfuerzo, compensado en temperatura y ejemplifica la correspondiente medición de $\mu\epsilon$.

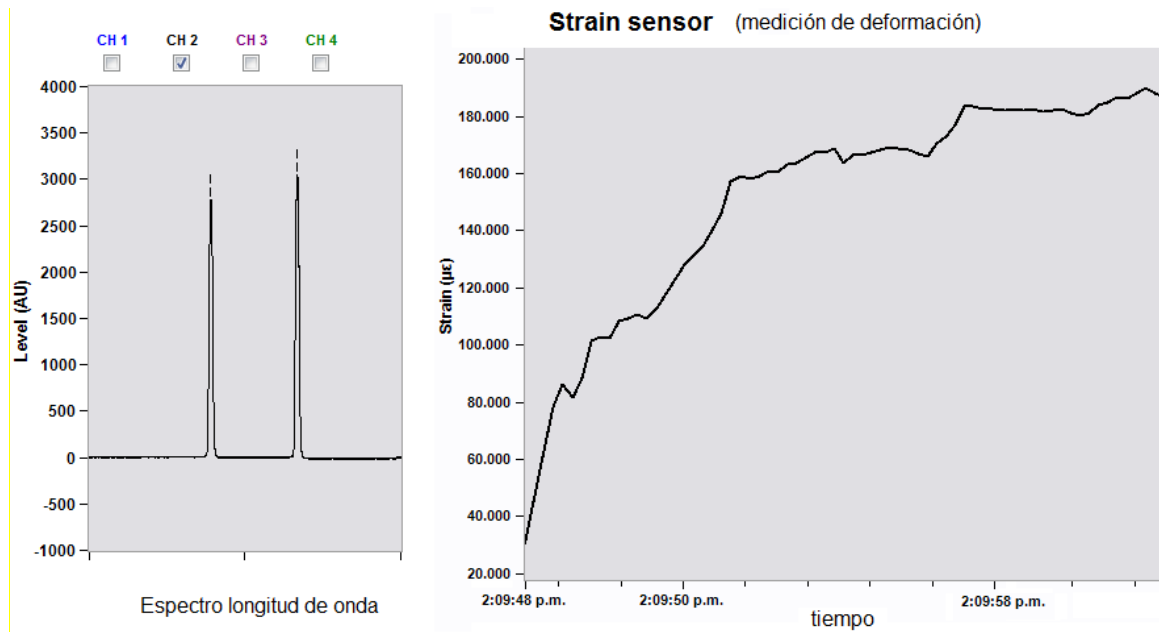


Figura 25. Curvas sensor óptico FBG de esfuerzo.

Medidor de temperatura FBG

La figura 26 muestra varios sensores de temperatura de fibra óptica FBG. El os4100 es un medidor diseñado específicamente para proporcionar compensación de temperatura en mediciones de deformación. El os4230 es una sonda de temperatura robusta, cuyo cuerpo es un tubo de acero inoxidable sellado, que protege la FBG. El os4300 es un sensor de temperatura no metálico.

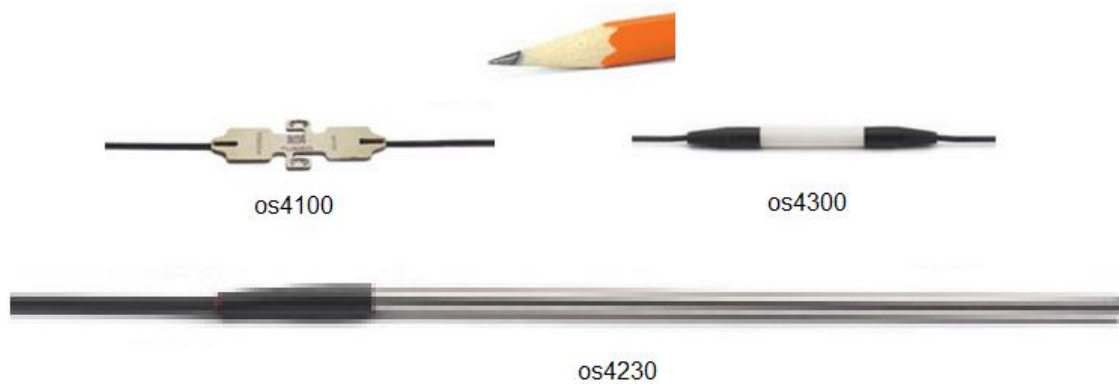


Figura 26. Sensor óptico FBG de temperatura.

Tomando como referencia la sonda de temperatura para describir las características del sensor, el rango operativo de medición es de -40 a 120°C , o de -200 a 275°C , con una sensibilidad $\approx 10\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1.7^{\circ}\text{pm}/^{\circ}\text{C}$). El tiempo de respuesta es de 1,5 segundos y una exactitud a largo plazo de 1°C para la calibración estándar. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1512 a 1588nm, para un

rango operativo de 76nm, en intervalos de 4nm para el desplazamiento de las longitudes de onda sin interferencia.

La figura 27 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala del espectro de la longitud de onda de un sensor FBG de temperatura y la medición de temperatura correspondiente.

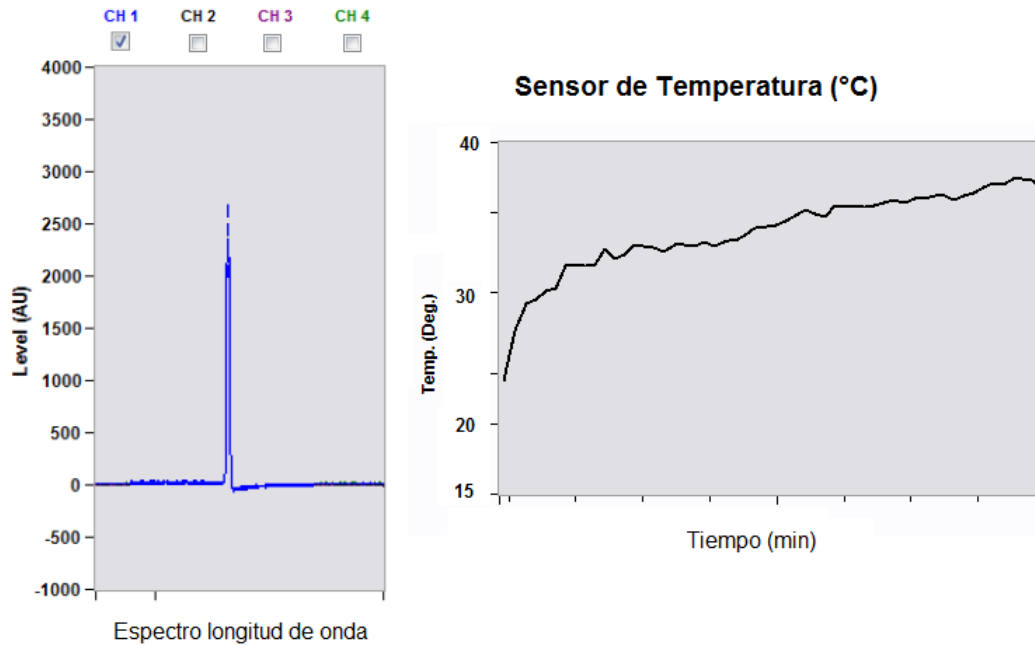


Figura 27. Ejemplo medición de temperatura de sensor óptico FBG.

Acelerómetros FBG

La figura 28 muestra acelerómetros de fibra óptica FBG para la medición de vibraciones. Los acelerómetros FBG pueden ser unidos a un bloque de montaje para configuraciones de uno, dos o tres ejes, como se muestra en la figura.

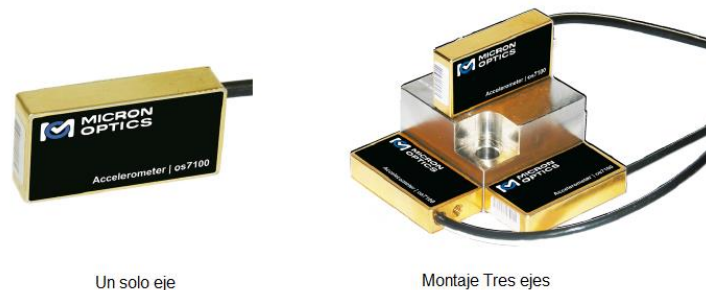


Figura 28. Acelerómetro FBG para medición de vibraciones. Os 7100.

El propósito de este tipo de sensor es realizar mediciones de la aceleración en grandes estructuras y en un rango de frecuencias bajas, desde 0 a 300 Hertz. Soporta un pico de impacto máximo de 100 g. El rango operativo de temperatura es de -40 a 80°C . Para propósito de análisis dinámico presenta una frecuencia de resonancia de aproximadamente 700 Hertz, con un peso de 28 gramos. Nótese que la frecuencia de resonancia del dispositivo es superior al rango de medición establecido y, por su peso, puede considerarse despreciable su contribución en los resultados de un análisis dinámico, aún en componentes de frecuencia de orden superior. En cuanto a las especificaciones ópticas, el rango estándar de longitud de onda se extiende de 1516 a 1588nm, para un rango operativo de 72nm, con intervalos al menos de 4nm entre cada eje.

La figura 29 muestra en forma de bosquejo un gráfico sin escala del espectro de la longitud de onda de un acelerómetro óptico FBG y la medición de vibraciones correspondiente ($1g$ equivale $\approx 9.8\text{m/s}^2$).

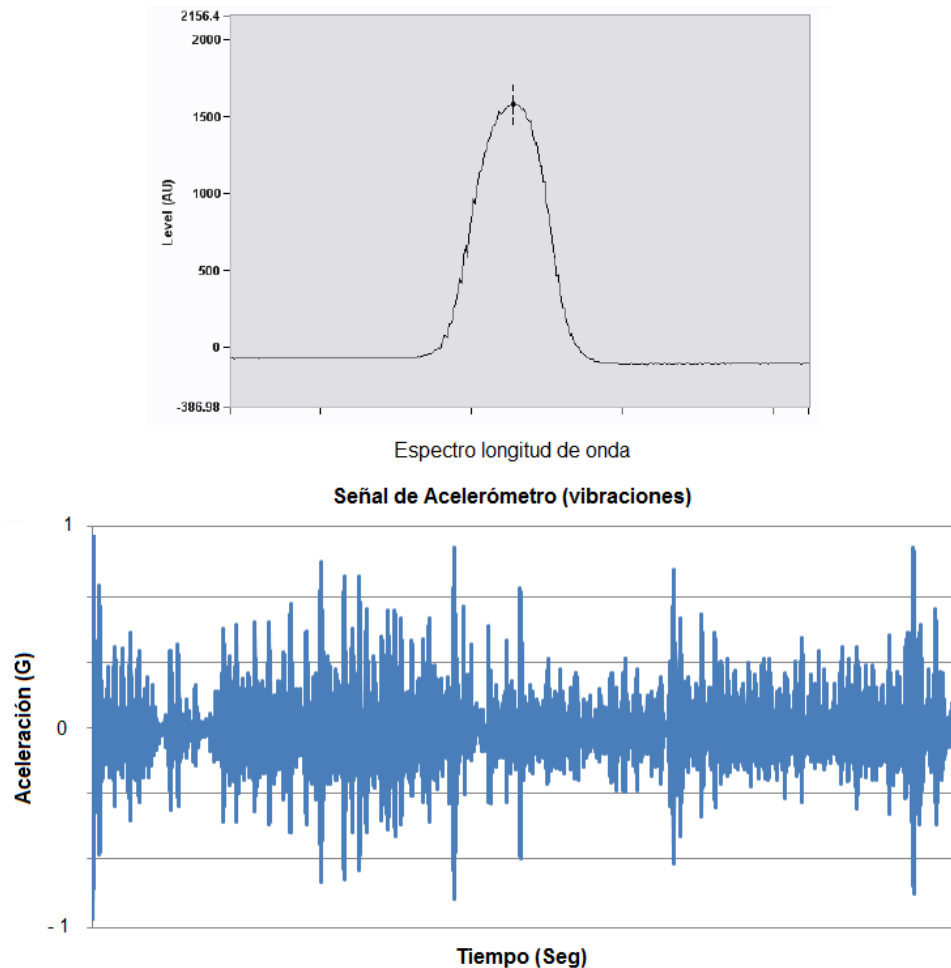


Figura 29. Ejemplo acelerómetro FBG para medición de vibraciones.

7.3. Metodología

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PUENTE

El puente sobre el río Virilla, ubicado en la ruta nacional 1, en el distrito de Uruca, del cantón de San José en la provincia de San José, fue diseñado en 1960. Tiene una longitud de 160 metros y cuenta con dos secciones de 19.84m cada una, su alineación es recta. Posee 7 superestructuras (seis de vigas I de acero y una de cercha). Posee dos bastiones y dos pilas, inicialmente se diseñó para una carga HS 15-44 con las especificaciones AASHTO 1957. (Ortiz, *et al.* 2014).

En el año 2010 se diseñó el reforzamiento de la losa, utilizando las especificaciones AASHTO 2002 y una carga HS20-44 + 25%. (AASHTO, 2011).

La figura 30 muestra una fotografía con la vista del puente y en la figura 31 puede observarse un diagrama con la vista en planta y lateral del puente con los puntos de medición para vibración y esfuerzo de deformación.



Figura 30. Vista del puente, febrero 2014.

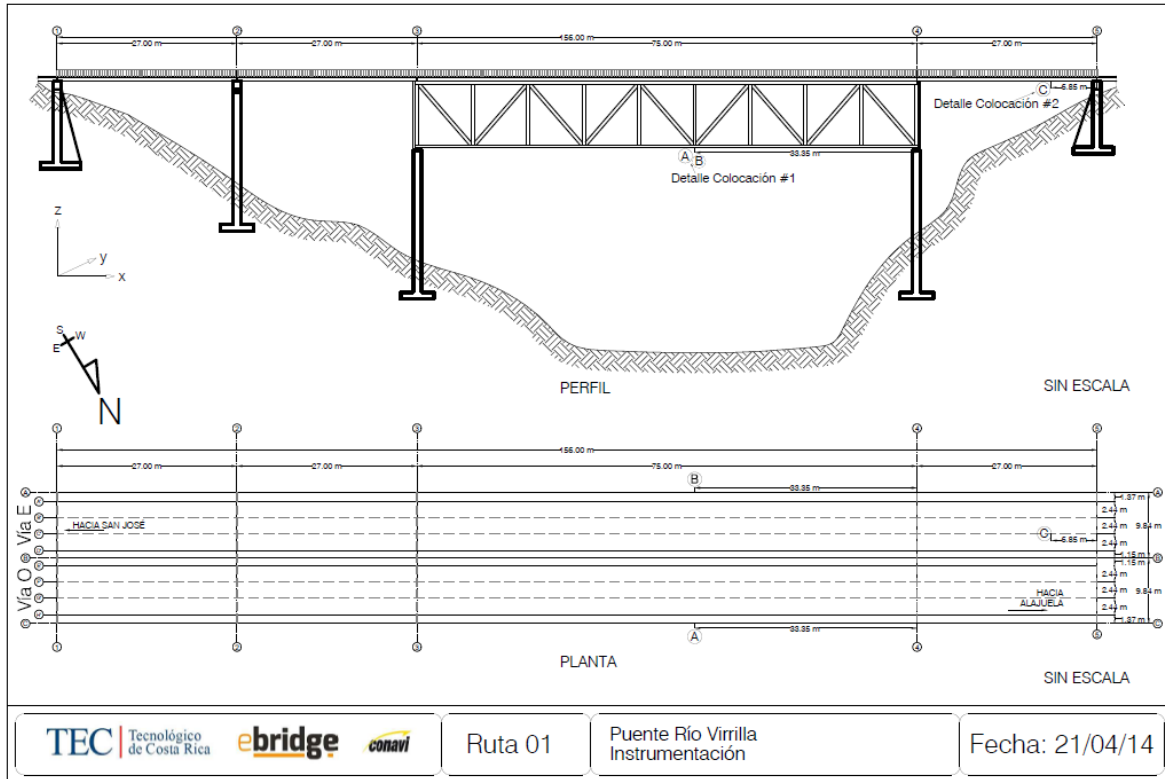


Figura 31. Vista en Planta y Lateral del puente. Ubicación puntos de medición A, B y C.

INSPECCIÓN INICIAL

La estructura actualmente se encuentra en proceso de intervención para su reforzamiento, por esta razón el análisis se orientará únicamente de los elementos de acero de la superestructura. Las vigas principales en las seis superestructuras presentan problemas de oxidación, especialmente cercano a los apoyos, la pintura se encuentra en mal estado. La vigas diafragmas en su mayoría presentan oxidación y alguna corrosión.

La cercha del puente presenta un mayor nivel de deterioro, encontrándose corrosión en muchos puntos y una falta de mantenimiento básico, presenta vibraciones y sonidos fuertes. Los apoyos tienen un nivel de deterioro alto.

El puente presenta un incremento significativo en la carga vehicular de diseño. El registro de tránsito promedio diario del año 2013 realizado por la Dirección de Planificación Sectorial de la Unidad de Estudios de Tráfico e Investigación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) indica que el Tránsito promedio Diario (TPD) en el puente es de 87,407 vehículos.

Cuadro 9. Desglose por tipo de vehículo y su participación respecto al total.

TIPO DE VEHICULO	% del TPD	# Vehículos diarios
Particular	75.22	65748
Carga Liviana	11.02	9632
Buses*	4.43	3872
2 ejes	5.73	5008
3 ejes*	1.2	1049
4 ejes*	0	0
5 ejes*	2.4	2098
TOTALES	100	87407

El número promedio diario de camiones en un sentido por carril es aproximadamente 3,100 unidades (Ortiz, *et al.* 2014).

MODELO ANALÍTICO DE PUENTE

Se construye un modelo estructural del puente con apoyo de la herramienta de software de análisis estructural SAP 2000.

Los planos consultados para la elaboración del modelo corresponden a los planos originales de construcción de la estructura que representan la configuración bajo la cual ha funcionado el puente durante la mayor parte de su vida útil.

La figura 32 muestra la vista superior tridimensional del modelo estructural elaborado con SAP 2000.

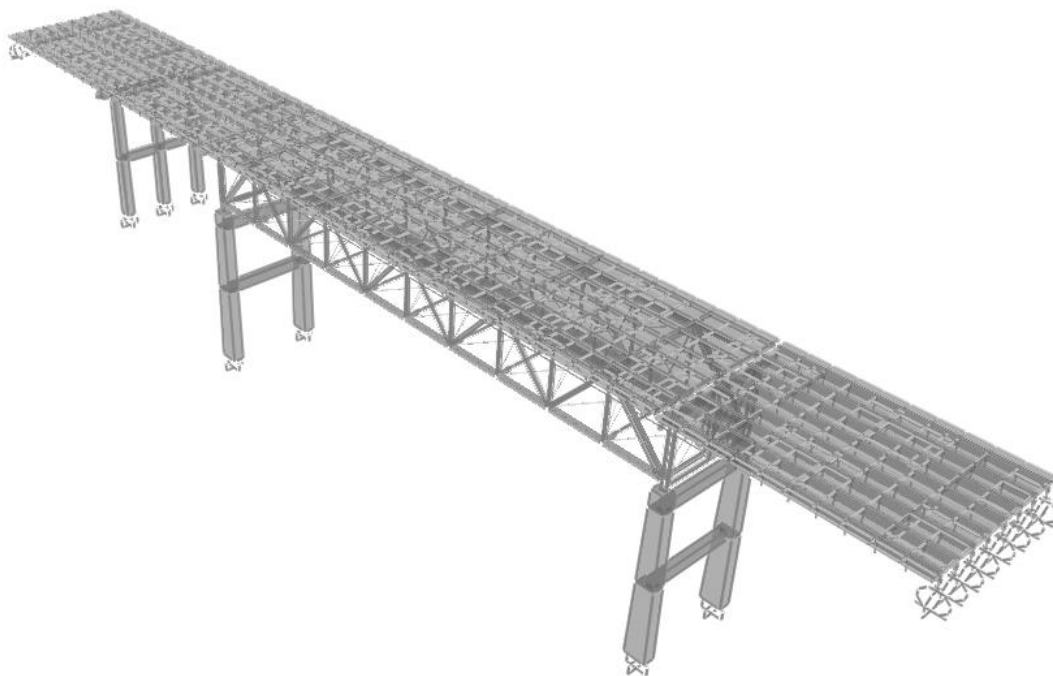


Figura 32. Vista superior tridimensional del modelo computacional.

La figura 33 muestra el modelo estructural del puente con la forma modal 9 cuya frecuencia natural de vibración teórica corresponde a 3.23HZ. Esta frecuencia tiene participación en las direcciones Y (transversal) y Z (vertical).

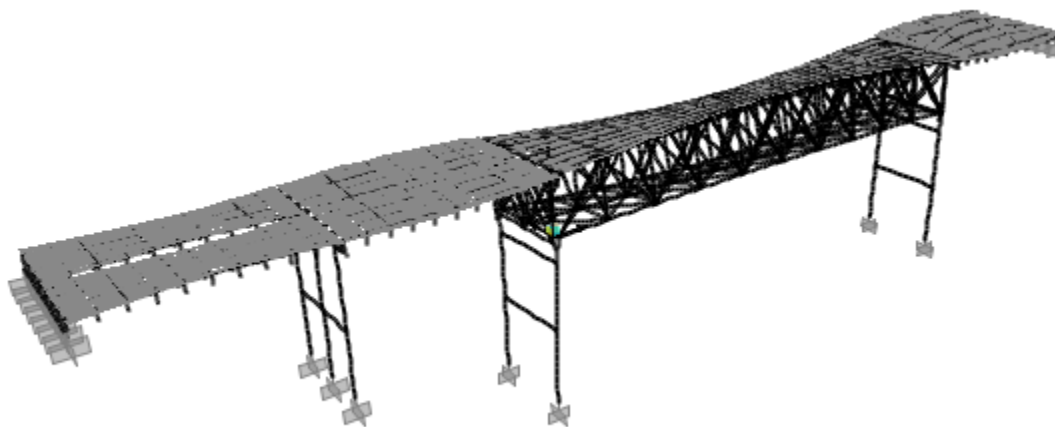


Figura 33. Modelo analítico. Modo de vibración y frecuencia.

ESTUDIO DE VIBRACIONES Y ESFUERZOS DINÁMICOS

Las mediciones experimentales de vibración y esfuerzo dinámico se llevaron a cabo durante el mes de abril del 2014, permitiendo la circulación vehicular normal en servicio sobre el puente en ambas direcciones (comportamiento ambiental).

Se establecieron tres puntos de medición en el puente, correspondientes a A, B y C como se puede apreciar en la figura #2. En cada punto de medición se cuantificaron las magnitudes vibratorias y deformación (esfuerzo dinámico) por medio de la tecnología de sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) (Kumar & Madhav, 2010).

Las mediciones de las aceleraciones, se realizaron para cada punto en sentido longitudinal, transversal y vertical, que respectivamente corresponde con las coordenadas del modelo estructural, x, y, z. En todos los casos el tiempo de medición fue de 30 minutos, capturando 1000 datos por segundo de cada sensor.

La instrumentación utilizada estuvo compuesta de un Interrogador óptico sm130 de 4 canales, 1KHZ, un computador portátil con software para el registro de los datos ENLIGHT v1.5.59, un acelerómetro óptico de 3 ejes como sensor de vibraciones, os7103, un medidor de deformación os3610 y un sensor de temperatura absoluta os4230 (Micron Optics, 2012).

En la figura 34 se muestra el esquema de instrumentación.

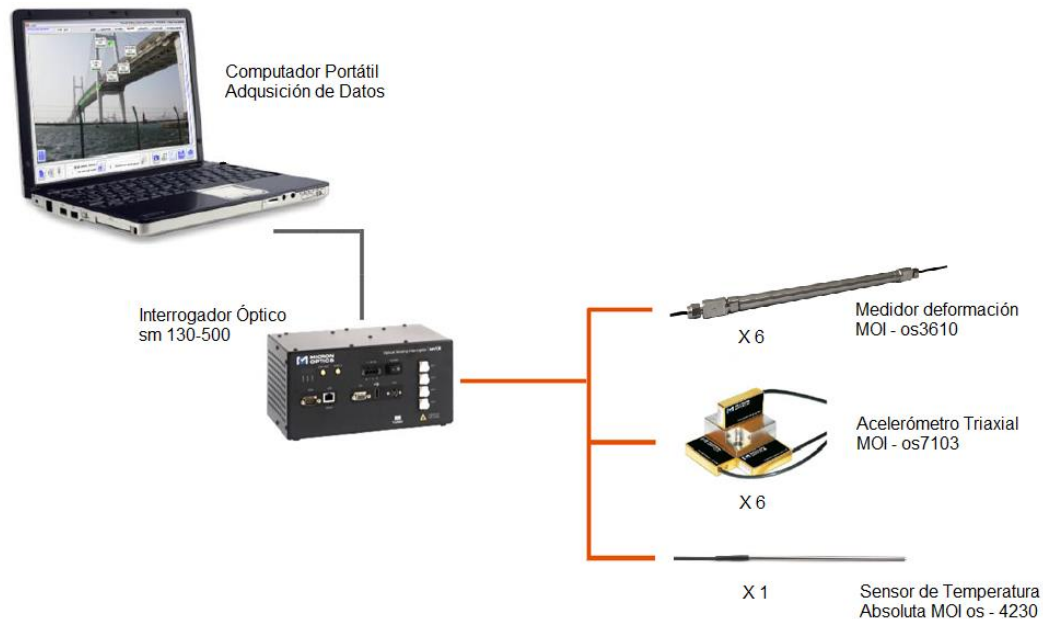


Figura 34. Esquema de instrumentación.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PUENTE PATRÓN

El denominado puente patrón, se localiza en el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Tecnológico de Costa Rica, fue construido junio del 2014 como componente de estudio del proyecto de investigación “*eBridge 2.0: sistema integrado para el desempeño de puentes*”.

El puente patrón está constituido de una única sección de 2 metros de longitud por 1.09 metros de ancho, su alineación es recta. La superestructura se compone de tres vigas de acero en I, cuyas dimensiones son 4” x 4” x 1/4”. La losa de concreto sobre las vigas de acero tiene una altura de 8 centímetros, con dos carriles llamados VIA O y VIO E. La subestructura se compone de cuatro columnas de acero en I verticales de 4” x 4” x 3/4” y dos vigas de acero de canal U transversales con dimensiones 7” x 2 3/4” x 3/8”.

La figura 35 muestra una fotografía con la vista del puente y en la figura #2 puede observarse un diagrama con la vista en planta y lateral del puente patrón.



Figura 35. Vista del puente patrón, Agosto 2014.

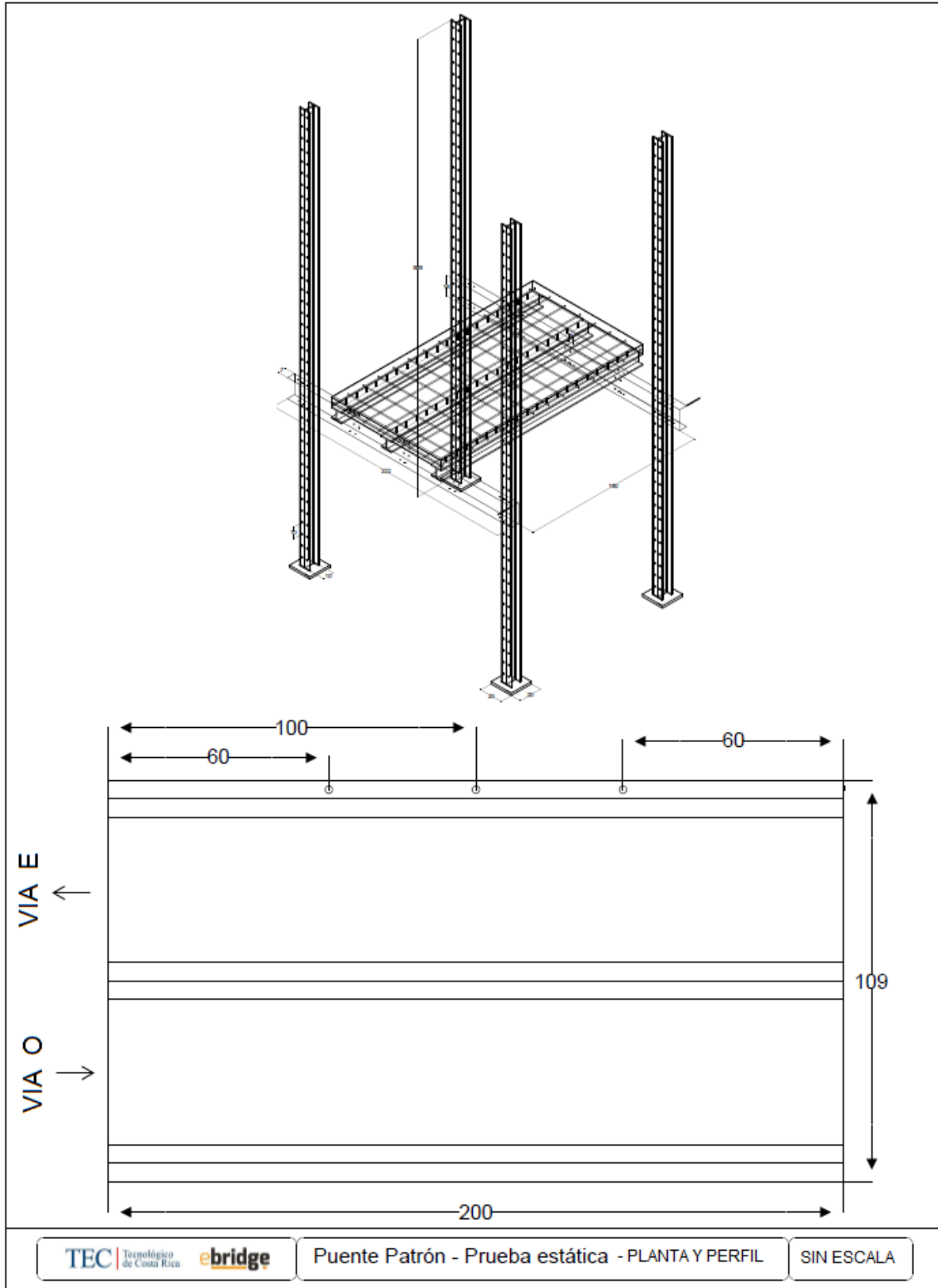


Figura 36. Vista en planta y perfil del puente patrón.

ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Para realizar las mediciones de deformación y deflexión requeridas en la prueba estática, el sistema de instrumentación estuvo compuesto de un “datalogger” modelo CR1000 del fabricante Campbell Scientific Inc., un computador portátil con software RTDAQ para el registro y visualización de los datos, tres transductores de deformación modelo ST350 de Bridge Diagnostics Inc., y cuatro medidores de desplazamiento de cuerda vibrante Modelo 4420 de la empresa Geokon.

La Figura 37 muestra el esquema de instrumentación del sistema de medición.

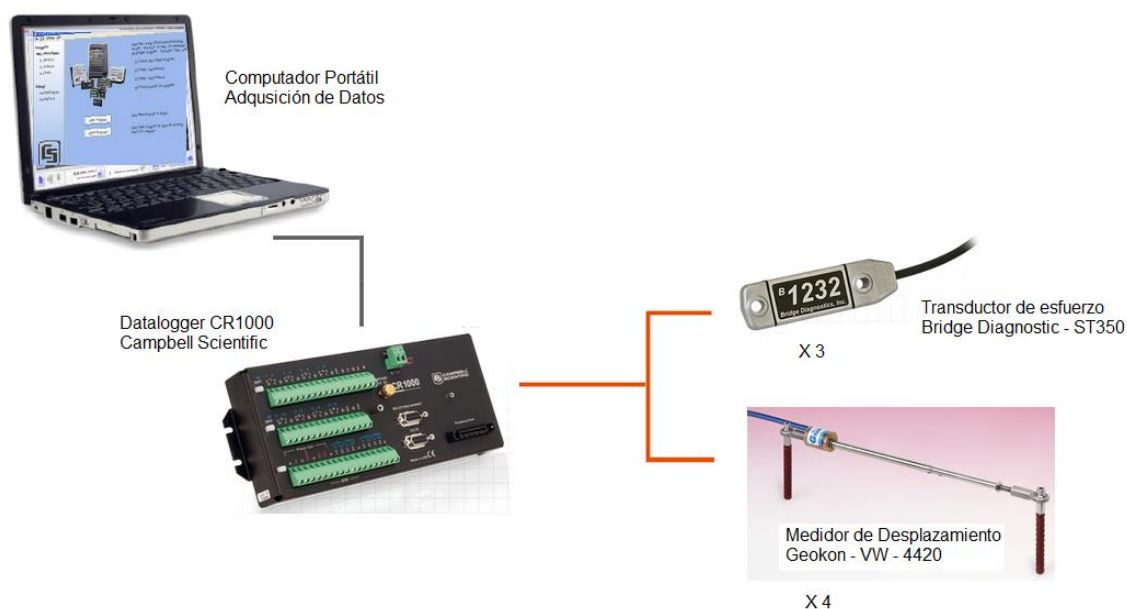


Figura 37. Esquema de Instrumentación.

Se establecieron tres puntos de medición en el puente patrón para los transductores de deformación ST350, correspondientes a las ubicaciones denominadas ST1, ST2 y ST3 como se puede apreciar en el plano de la figura #4. La localización de los cuatro sensores de deflexión se asignó de acuerdo a las cuerdas longitudinales A, B, C y D como se observa en el plano de la figura 38. En cada punto de medición se cuantificaron las magnitudes de deflexión (mm) y deformación (esfuerzo estático en microstrains). En todos los casos el tiempo de medición fue de 10 minutos, con un periodo de muestreo de 6 segundos.

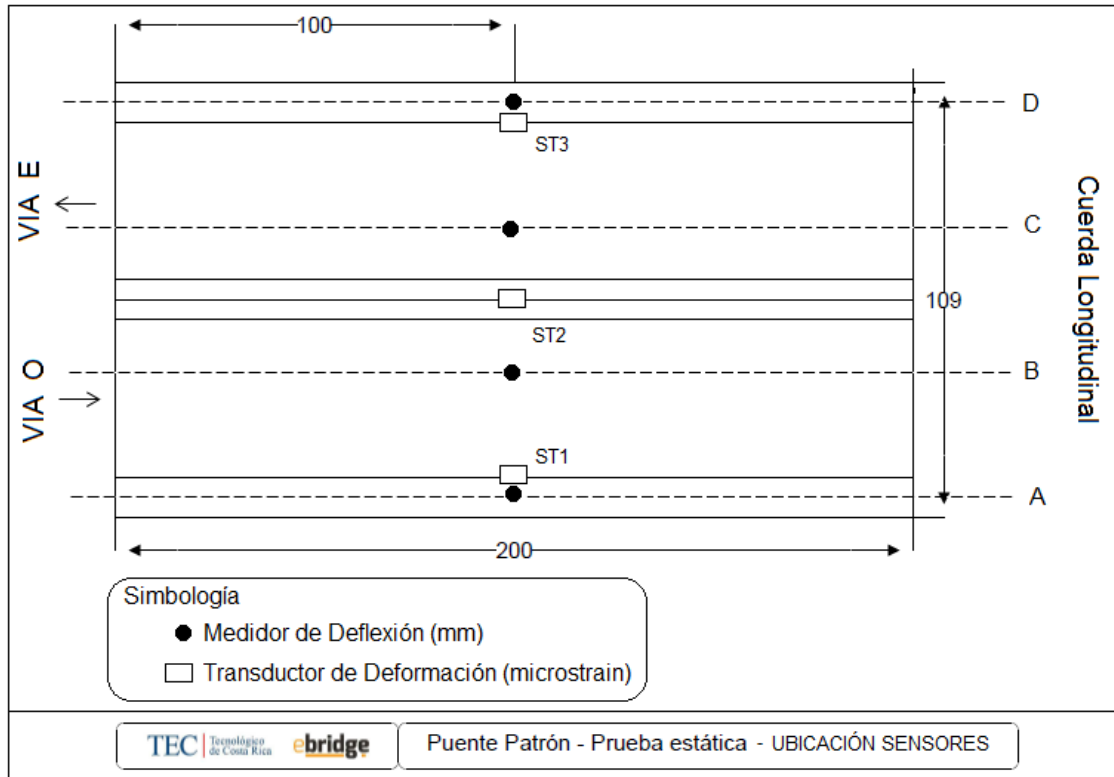


Figura 38. Puntos de medición sensores de deformación y deflexión.

La figura 39 muestra una fotografía con la instalación de los transductores de deformación BDI-ST350.



Figura 39. Instrumentación deformímetros en las vigas de acero I.

La figura 40 muestra una fotografía con la ubicación de dos medidores de desplazamiento de cuerda vibrante Geokon – 4420 (crackmeters) y cuatro puntos adicionales de medición de la deflexión como comprobación visual métrica.



Figura 40. Instrumentación medidores de desplazamiento.

En la prueba se utilizan tres condiciones de carga con pesos aproximados para cada uno de los casos de: Baja (300 Kg), Media (600 Kg) y Alta (1000 Kg). La prueba estática realizada se considera una Prueba de Carga No Destructiva (NDT – Prueba Diagnóstica). La carga de prueba se ubica de forma que su centro de masa coincida con el centro geométrico de la sección. (Carrion, *et al.* 1999).

La ubicación de la carga de prueba utilizada se muestra en la Figura 41.

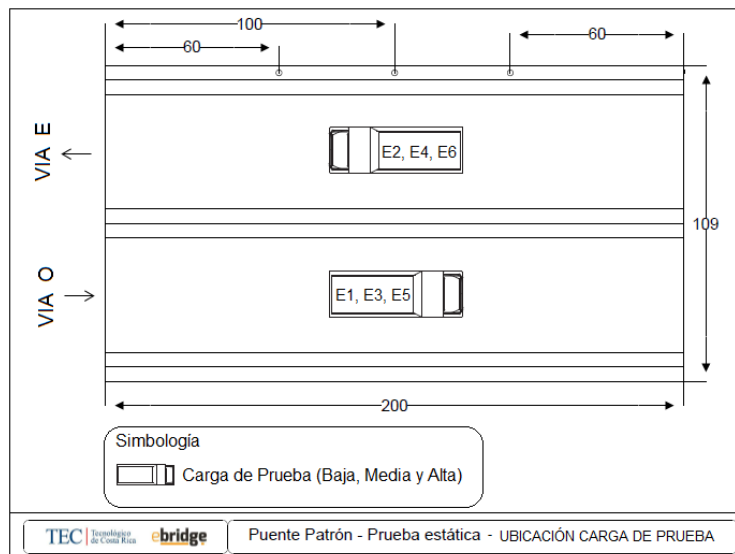


Figura 41. Ubicación Carga de Prueba.

PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA

Se medirá en el puente patrón la Deflexión y Deformación en una Prueba de Carga No Destructiva (NDT – Prueba Diagnóstica) siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación:

- a. El ensayo utiliza tres (3) cargas de prueba con un peso bruto aproximado para cada caso de: Baja (300 kg), Media (600 kg) y Alta (1000 kg).
- b. Se suspende la colocación de la carga de prueba sobre el puente patrón y se espera un estado estable de la estructura libre de oscilación por carga.
- c. Puesta a punto de sensores para medir deflexión (mm) y deformación por esfuerzo ($\mu\epsilon$).
- d. Se ubica la carga de prueba para cada uno de los casos Baja, Media y Alta, de forma que su centro de masa coincida con el centro geométrico de la sección, de acuerdo a la Tabla ES-1 y Plano de Prueba Estática: Ubicación carga de prueba, Figura 41.

Tabla ES-1 Configuración Carga de Prueba		
Caso No.	Carga de Prueba	VIA
E1	Baja (300 Kg)	O
E2		E
E3	Media (600 Kg)	O
E4		E
E5	Alta (1000 Kg)	O
E6		E

- e. Para cada uno de los casos de la Tabla ES-1, una vez colocada la carga de prueba, se espera un estado estable de la estructura libre de oscilación por carga de prueba.
- f. Para cada uno de los casos de la Tabla ES-1, se inicia el registro de los datos en forma simultánea de **deflexión (mm)** y **deformación por esfuerzo ($\mu\epsilon$)** en los puntos de medición designados.

La figura 42 muestra una imagen para uno de los casos de medición en el puente patrón con la carga de prueba baja, de aproximadamente 335 kilogramos en la ubicación sobre la VIA E.



Figura 42. Puente patrón con Carga de Prueba Baja (335 Kgs).

La figura 43 presenta uno de los casos de medición con la carga de prueba media, de aproximadamente 712 kilogramos colocados sobre la VIA O.



Figura 43. Puente patrón con Carga de Prueba Media (712 Kgs).

La figura 44 muestra un imagen para uno de los casos de medición con la carga de prueba alta, de aproximadamente 1030 kilogramos colocados sobre la VIA E.



Figura 44. Puente patrón con Carga de Prueba Alta (1030 Kgs).

7.4. RESULTADOS

MEDIDAS DE VIBRACIÓN

Para cada una de las mediciones de vibración, dado que se tienen los valores de aceleraciones en función del tiempo, se procedió a aplicar filtros de paso de banda entre los 0.1 Hz a los 25 Hz. Una vez aplicados dichos filtros con el fin de evitar vibraciones por ruido, se procedió a realizar la FFT (transformada rápida de Fourier) con el fin de determinar las frecuencias predominantes, las cuales se definen como frecuencias "in situ". (Davis, *et al.* 1996). La figura 45 muestra el registro de los datos de vibración y su correspondiente Espectro de Frecuencia en el punto de medición A.

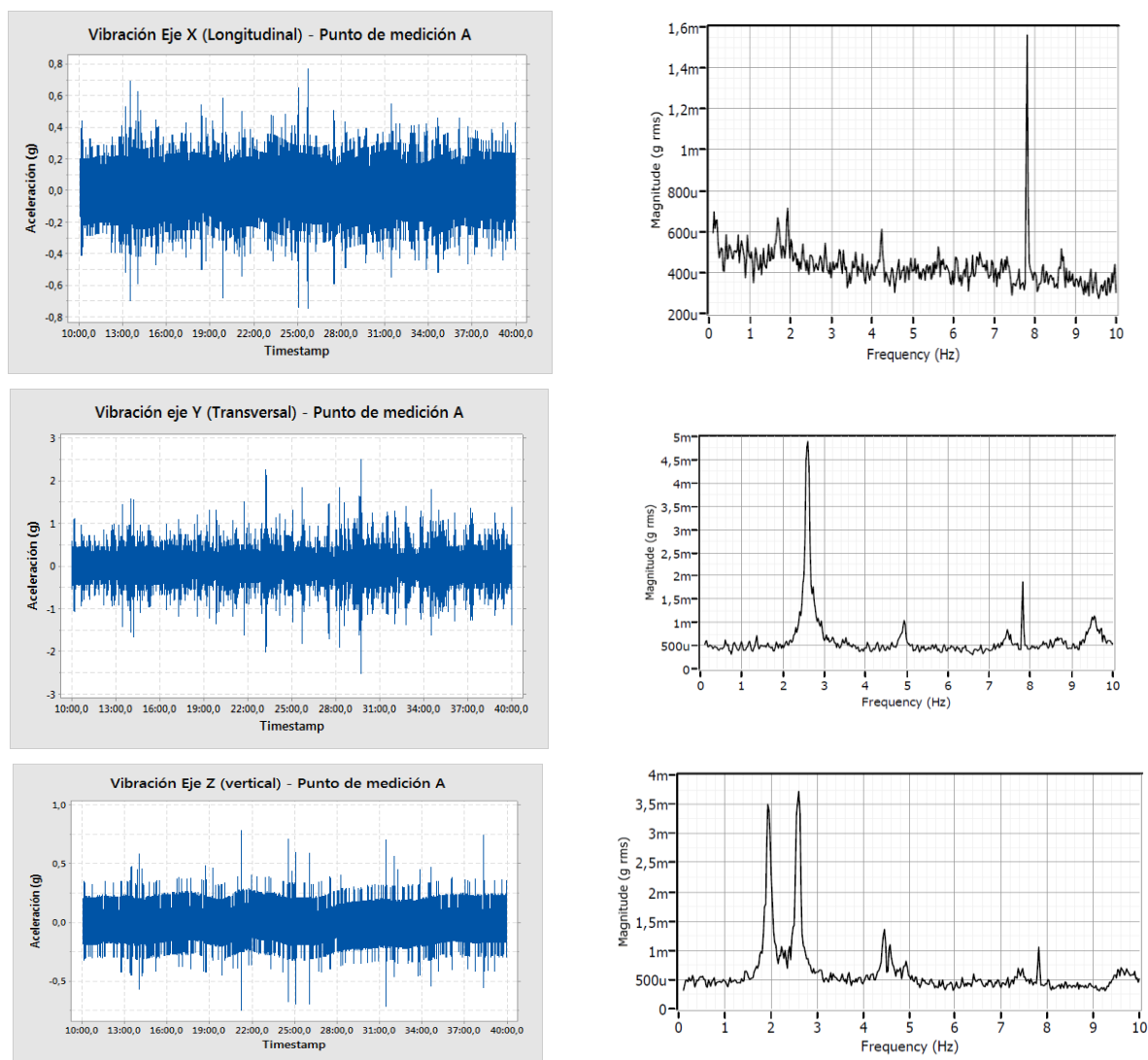


Figura 45. Señales de vibración y espectro de frecuencia, punto de medición A.

Una vez obtenidas las frecuencias “in situ”, se procedió a compararlas con las frecuencias del modelo estructural computacional. Inicialmente se determinó la participación modal en cada una de las direcciones x, y, z.

Del modelo analítico se obtuvieron los primeros 96 modos de vibración, sus participaciones en cada una de las tres direcciones y el porcentaje de participación con respecto al número de modo y a la frecuencia.

La figura 46 muestra una gráfica con la participación Modal versus la frecuencia, obtenida por medio de la herramienta de software de análisis estructural SAP 2000.

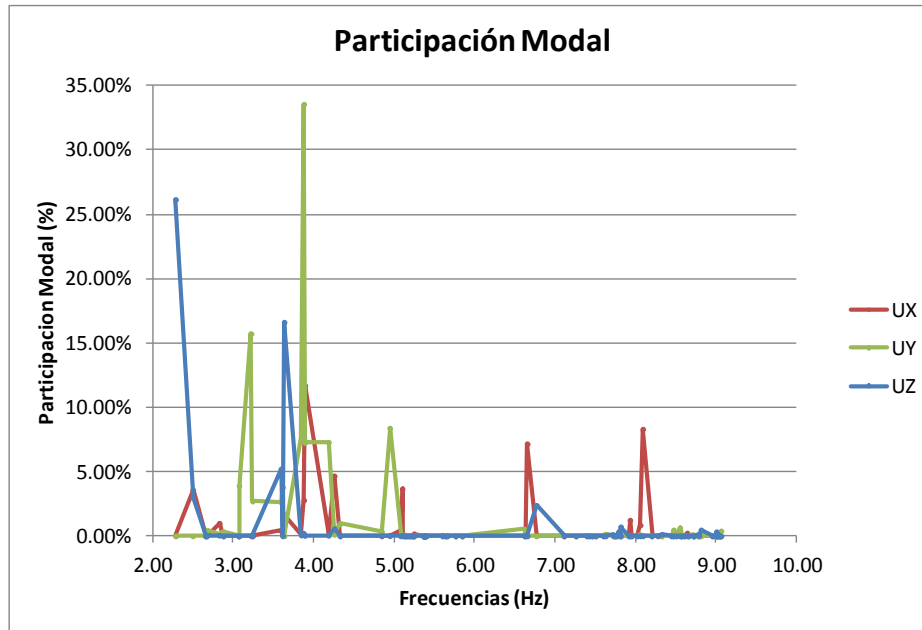


Figura 46. Participación Modal vs Frecuencia

Para cada uno de los puntos de medición en el puente, se determinó su correspondiente nodo en el modelo. Luego, para cada uno de los nodos, se determinó el desplazamiento máximo modal, para cada uno de los modos, y posteriormente se compara con su respectivo punto de medición experimental.

La figura 47 presenta la comparación de frecuencias experimentales con las del modelo estructural computacional en el punto de medición A correspondiente al nodo 7.

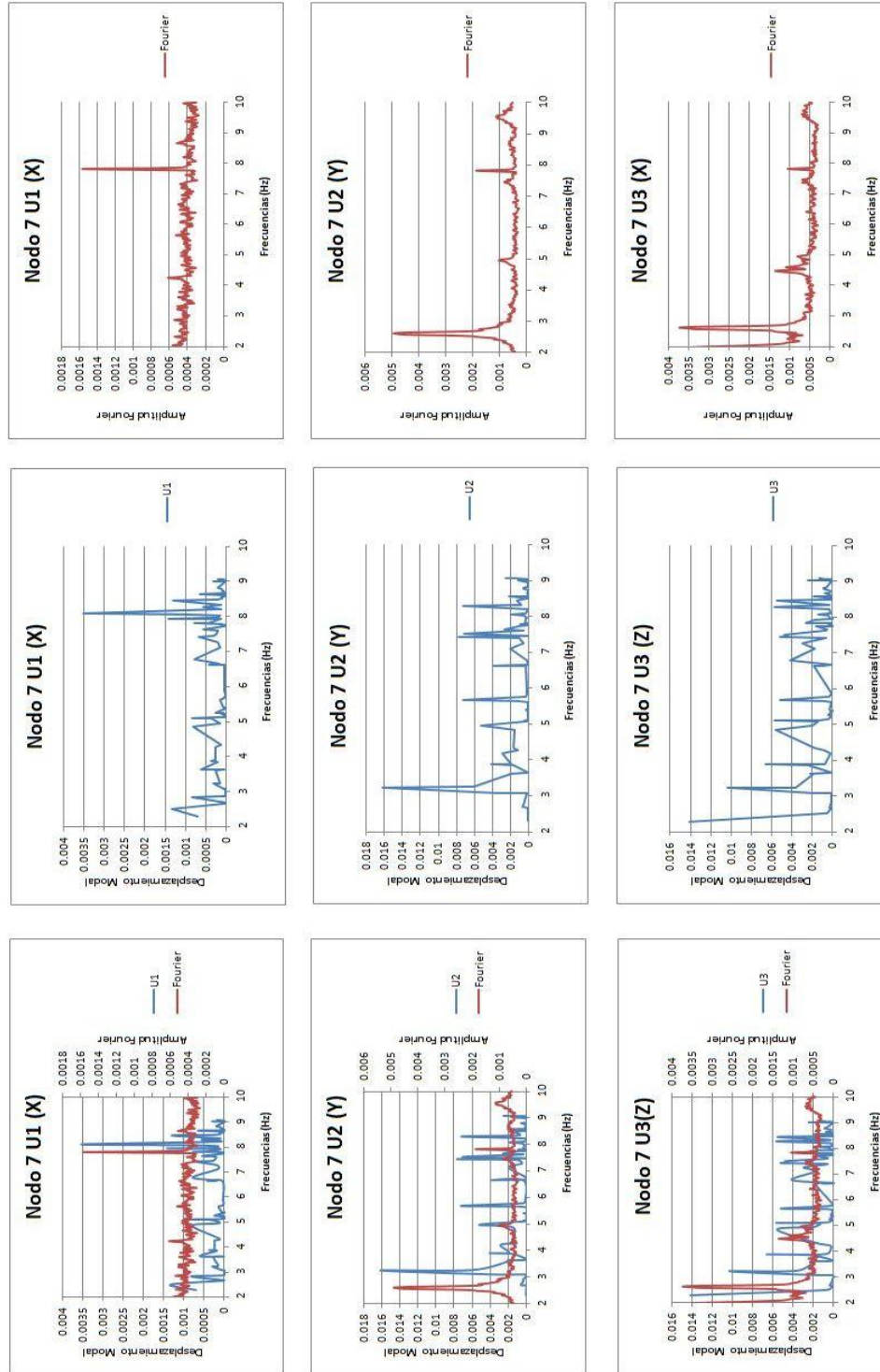


Figura 47. Comparación de frecuencias mediciones experimentales versus modelo analítico. Punto de medición A – nodo 7.

En el cuadro 10 y la figura 49 se presenta para los puntos de medición A y B los valores de las frecuencias identificadas experimentalmente y las del modelo estructural computacional. Los porcentajes de diferencia varían de un 4 a un 20 %. Dicha diferencia se debe a factores tales como que el modelo tiene una rigidez mayor a la que realmente tiene la estructura, los materiales se están considerando isotrópicos y con características mecánicas iguales, además los nodos pueden tener una rigidez diferente a la que se está considerando en el modelo, también podría deberse a respuesta no lineales en los materiales.

Cuadro 10. Frecuencias obtenidas para nodos A y B

Eje/Frec.	"In Situ"	Mod. Est.	% Dif
X	7.81	8.1	4%
Y, Z	2.6	3.23	20%
Z	1.96	2.23	12%

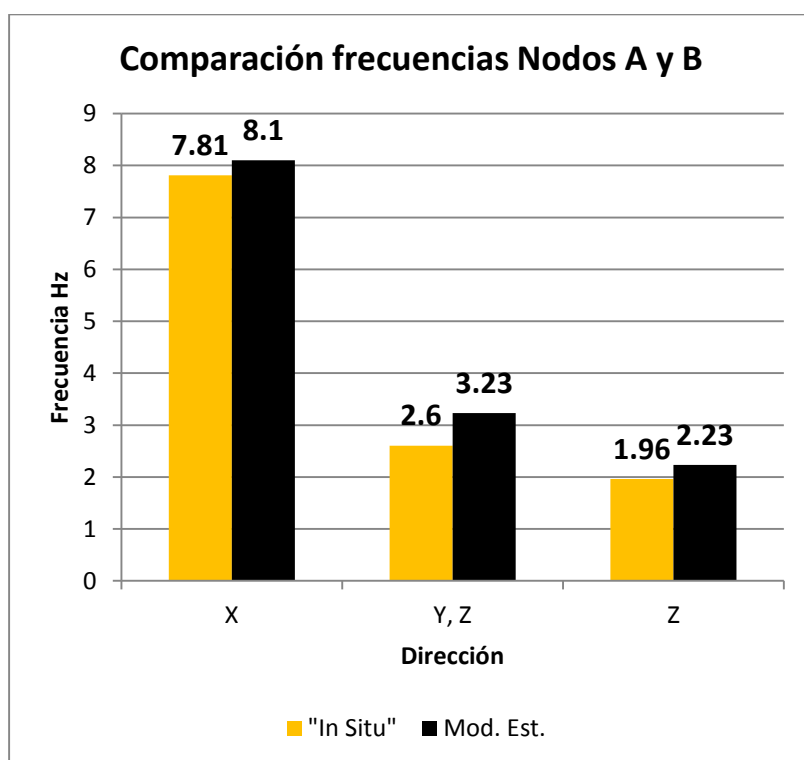


Figura 49. Comparación de frecuencias nodos A y B

El cuadro 11 resume la estadística descriptiva en los puntos de medición para observar las magnitudes de los valores mínimos, máximos y rangos de las mediciones de vibración obtenidas.

Cuadro 11. Resumen mediciones de vibración en puntos A, B y C.

Pto. Medición	Vibración	Mínimo	Máximo	Rango
A	eje X	-0,747	0,767	1,514
	eje Y	-2,52	2,512	5,032
	eje Z	-0,752	0,783	1,535
B	eje X	-0,847	0,769	1,616
	eje Y	-2,195	2,044	4,239
	eje Z	-0,959	0,889	1,848
C	eje X	-9,496	9,621	19,117
	eje Y	-10,002	9,996	19,998
	eje Z	-5,691	7,208	12,899

Se determinaron las aceleraciones máximas en los lapsos de los gráficos en donde los picos máximos y mínimos son estables y no hay variaciones mayores a un 5%. (Wenzel, 2009). La tabla #4 resume los resultados obtenidos.

Cuadro 12. Aceleraciones máximas y mínimas en tramo cercha.

Eje	Aceleración	Nodo A	Nodo B
Vertical (z)	Máxima	0.27 g	0.33 g
	Mínima	0.30 g	0.35 g
Longitudinal (x)	Máxima	0.37 g	0.39 g
	Mínima	0.38 g	0.37 g
Transversal (y)	Máxima	0.55 g	0.57 g
	Mínima	0.56 g	0.62 g

Los datos de las frecuencias de vibración medidas en sitio y la amplitud de las aceleraciones se introducen en gráficos de referencia que contienen diversos criterios de aceptación. La figura 50 muestra el caso de confort, en el cual para una aceleración máxima vertical de 0,35 g, con una frecuencia natural de vibración de 1,96 Hz (punto rojo), se ubica en la zona de intolerable a partir de 5-20 minutos. (Wenzel, 2009).

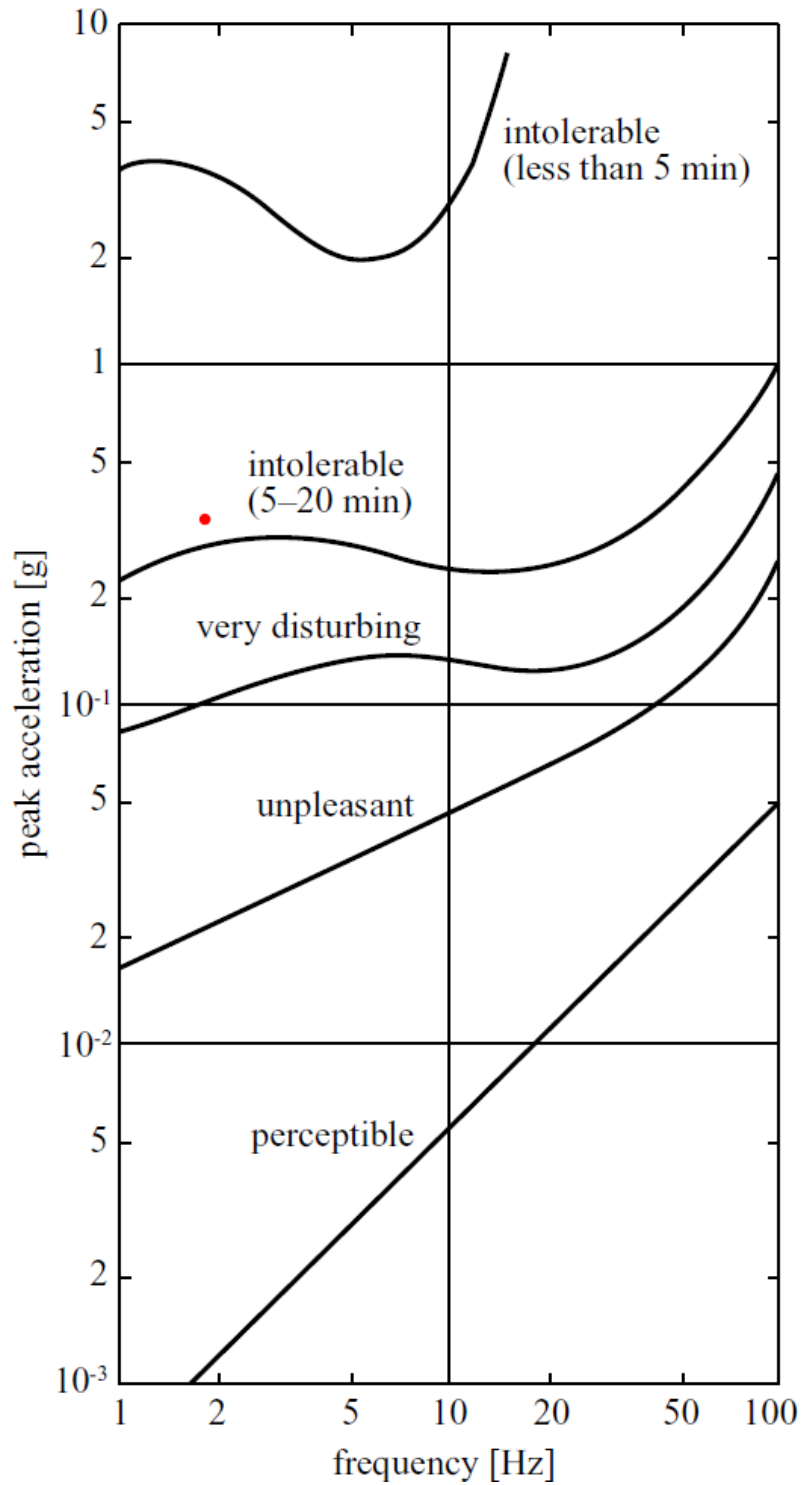
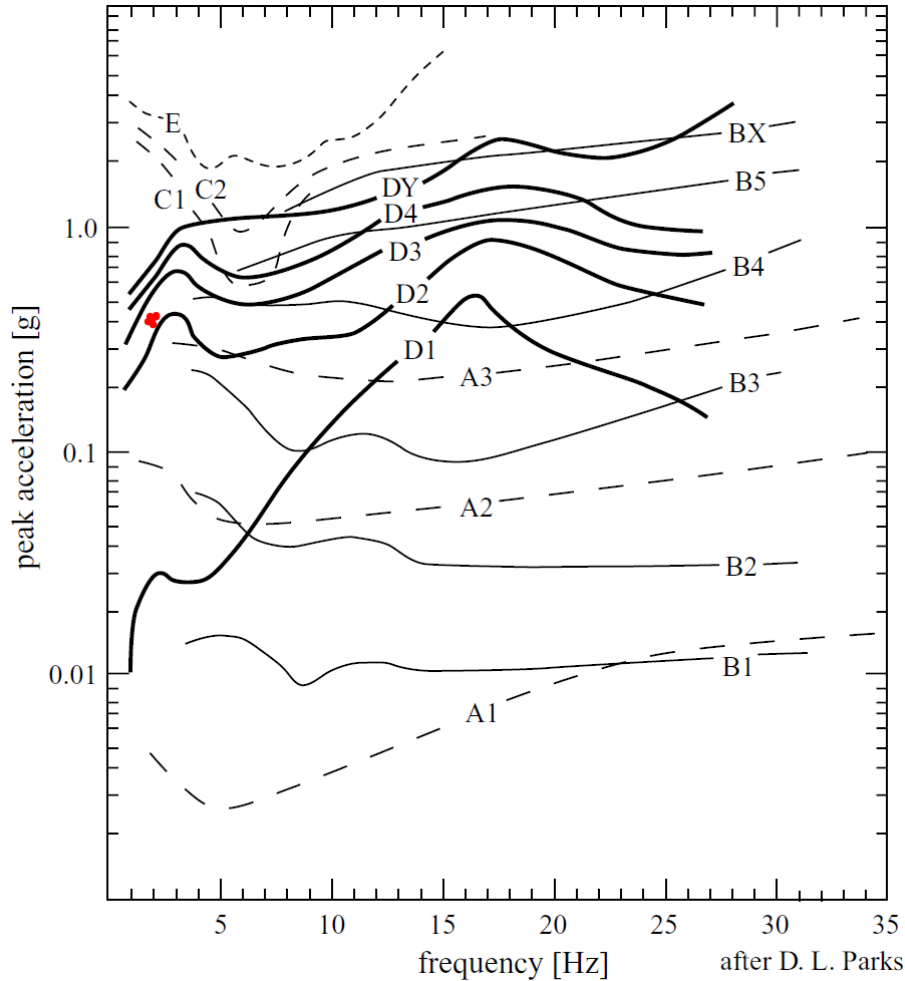


Figura 50. Tolerancias Confort para aceleraciones pico

La figura 51 presenta otro criterio de revisión, corresponde al presentado por Chang (1973), en donde para la misma aceleración máxima vertical 0,35 g, con la frecuencias natural de vibración de 1,96 Hz, se tiene un nivel entre D2 y D3, lo cual está entre ligeramente incómodo y extremadamente incómodo. Evidentemente es perceptible y la situación que se corroboró en sitio.



- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A Goldman (1948) | C Magid & Coeman (1960) |
| A1 Perceptible | C1 3 min tolerance limit |
| A2 Unpleasant | C2 1 min tolerance limit |
| A3 Intolerable | |
| B Gorill & Snyder | D Parks (1961) |
| B1 Threshold of perception | D1 Definitely perceptible |
| B2 Definitely or easily perceptible | D2 Mildly annoying |
| B3 Irritating or annoying | D3 Extremely annoying |
| B4 Max tolerable for cont. operation | D4 Alarming |
| B5 Intolerable | DY Highest intensity called alarming |
| BX Highest intensity endured | E Zeigenruecker & Magid (1959) |
| | Short time tolerance |

Figura 51. Estudio de percepción de las aceleraciones (Chang 1973)

La figura 52 es una propuesta tentativa como resumen general de criterios que proporciona un indicador crudo pero simple, que por supuesto, no se puede aplicar a ciegas a todas las estructuras. En términos generales los criterios de aceptación de confort son mucho más estrictos que los criterios estructurales y por lo tanto se vuelven más críticos para fines de diseño estructural. (Wenzel, 2009).

En el punto de medición A, con una aceleración pico vertical de 0,783 g y una frecuencia natural de 1,96 Hz (punto rojo), el valor pico de la vibración registrada en eje z se localiza en una zona de percepción pero lejos del criterio estructural.

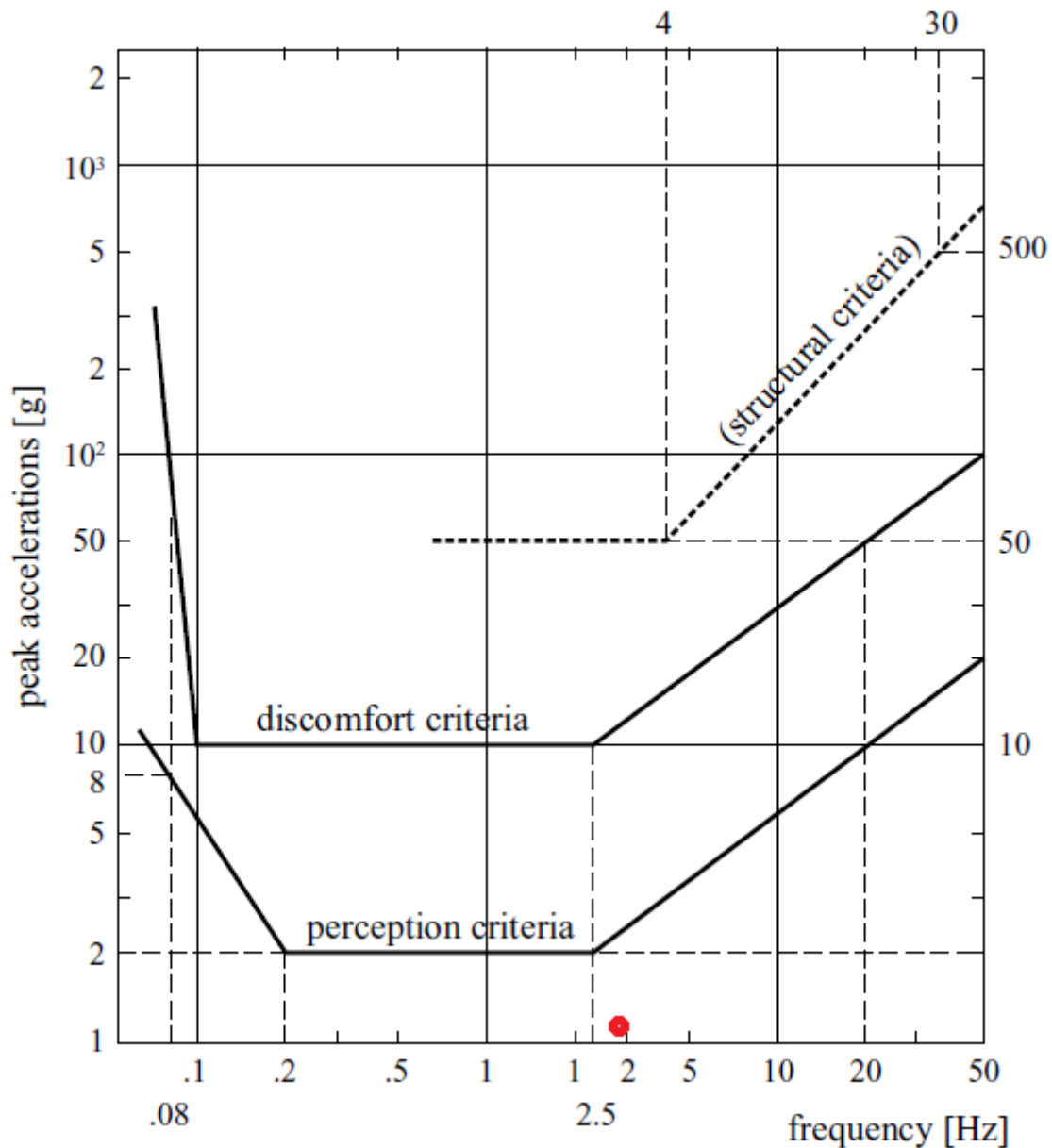


Figura 52. Criterio de aceleración pico.

MEDIDAS DE ESFUERZOS DINÁMICOS

La figura 53 muestra el registro de los datos de deformación dinámica en el punto de medición A. Se obtiene para este caso una deformación media de 1,27 $\mu\epsilon$ con un valor mínimo de $-11,12 \mu\epsilon$ y un valor máximo de $38,15 \mu\epsilon$. El valor de percentil 95 para el esfuerzo de tensión dinámica es de $7,6 \mu\epsilon$ (microstrain).

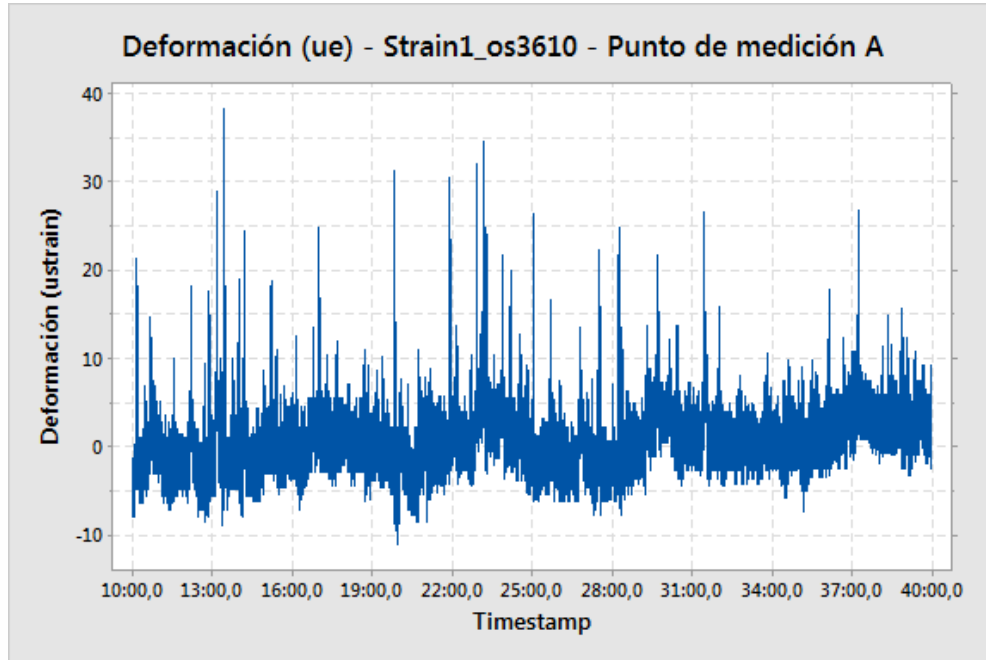


Figura 53. Deformación dinámica el punto de medición A

El cuadro 13, muestra los esfuerzos máximos calculados según las mediciones de deformación unitaria dada por los sensores, y los esfuerzos máximos en los mismos puntos provenientes del modelo teórico para fatiga.

Cuadro 13. Esfuerzos máximos en los puntos A, B y C

PUNTO	ϵ ($\mu\epsilon$)	σ	σ_{Modelo}
	Percentil 95%	kg/cm ²	kg/cm ²
A	7,6	15,96	85,4
B	104,27	218,97	89,3
C	128,4	269,64	197,1
E=	2.10E+06	kg/cm ²	

Aunque los esfuerzos mostrados en la tabla se obtuvieron para cargas distintas, ya que en el modelo teórico la carga es la de un vehículo de prueba de diseño y la deducida de los datos es una carga no cuantificada, se tiene que el orden de magnitud es similar y ratifica la validez del modelo teórico.

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA

A continuación se presentan las tablas y gráficos obtenidos durante las mediciones en forma simultánea de la deflexión y los esfuerzos de tensión estáticos en los siete puntos centrales designados en el puente patrón, para las tres condiciones de carga (Baja, Media y Alta) de la prueba diagnóstica.

Cuadro 14. Deflexión para las tres condiciones de la carga de prueba estática.

Tabla ES-1 Configuración Carga de Prueba			Deflexión (mm) Cuerda Longitudinal: Ubicación puntos			
Caso No.	Carga de Prueba	VIA	A	B	C	D
E1	Baja (335 Kg)	O	-0,075	-0,075	0	0,15
E2		E	0,15	0,05	-0,05	-0,1
E3	Media (712 Kg)	O	-0,125	-0,075	-0,025	0,075
E4		E	0,15	0,025	-0,1	-0,125
E5	Alta (1030 Kg)	O	-0,25	-0,1	0,025	0,175
E6		E	0,25	0,075	-0,15	-0,2

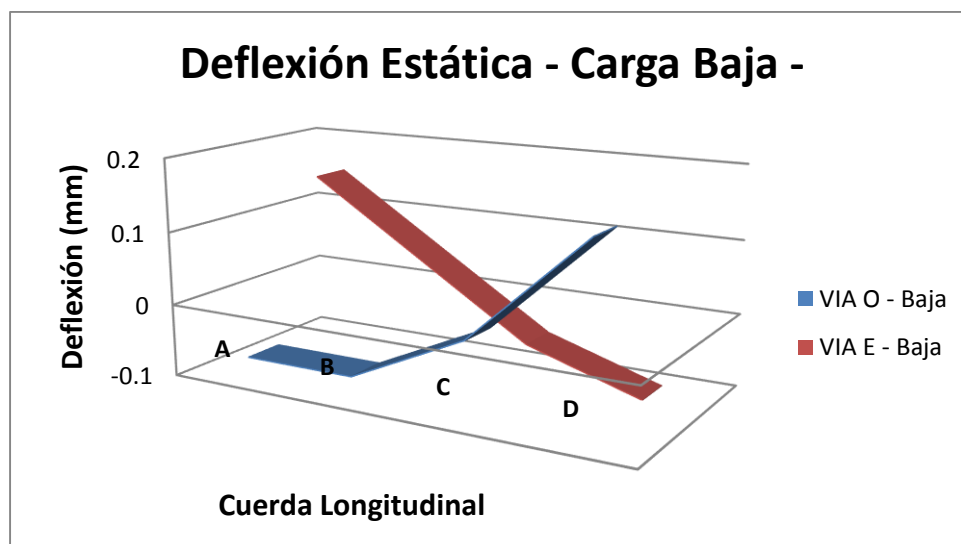


Figura 54. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Baja.

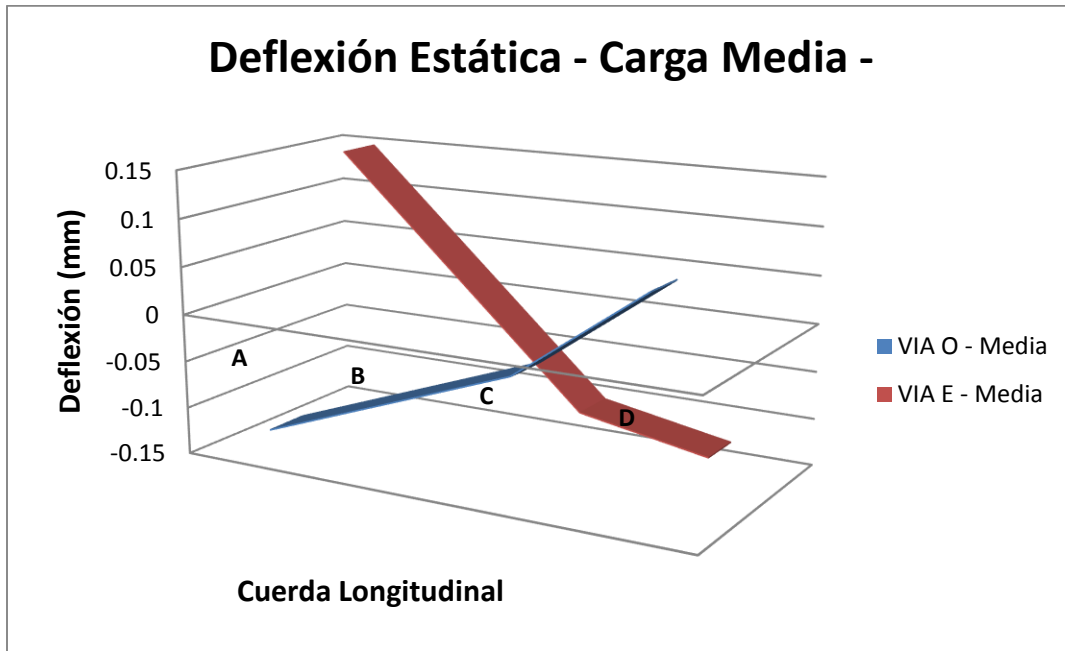


Figura 55. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Media.

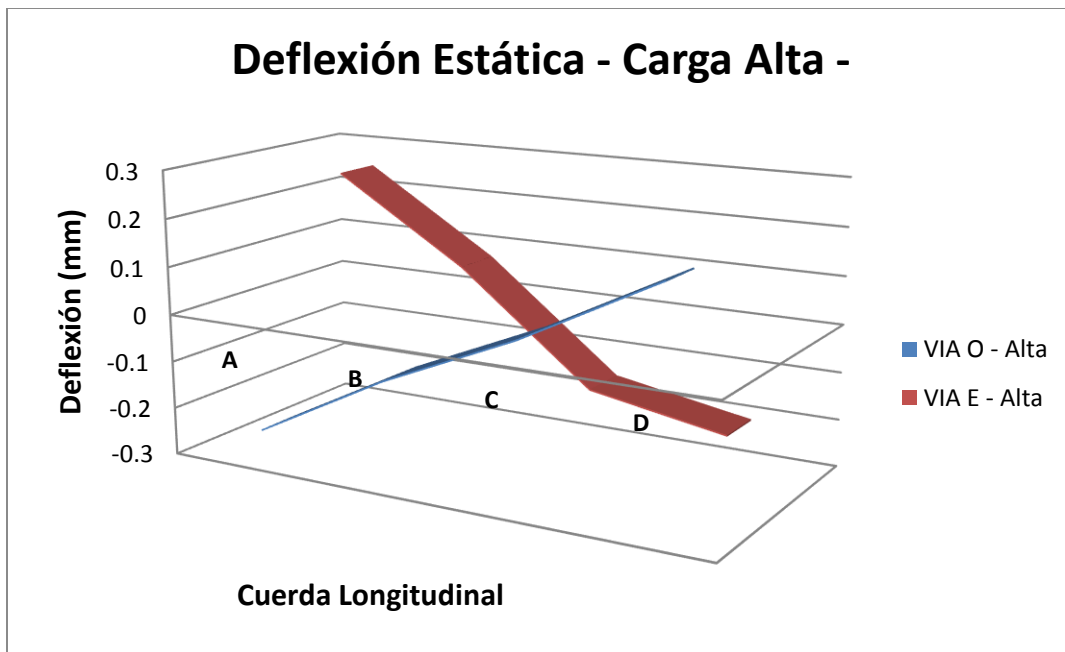


Figura 56. Gráfico de Deflexión con Carga de Prueba Alta.

El cuadro 15 presenta los resultados en cuanto a las mediciones de deformación, ϵ , en microstrain ($\mu\epsilon$) para las ubicaciones ST1, ST2 y ST3 correspondientes a los transductores de deformación.

Cuadro 15. Deformación para las tres condiciones de la carga de prueba estática.

Caso No.	Carga de Prueba	VIA	Deformación ϵ ($\mu\epsilon$) Ubicación Sensores		
			ST1	ST2	ST3
E1	Baja (335 Kg)	O	6,19	3,04	-2,43
E2		E	-3,67	1,39	4,42
E3	Media (712 Kg)	O	12,65	5,08	-4,62
E4		E	-6,22	3,67	9,24
E5	Alta (1030 Kg)	O	22,17	10,71	-8,12
E6		E	-8,39	7,94	17,73

El cuadro 16 presenta los resultados de los esfuerzos de tensión estáticos, σ , en kg/cm^2 , calculados a partir de los datos de los sensores de deformación en las ubicaciones ST1, ST2 y ST3 respectivamente, considerando el valor del módulo de elasticidad longitudinal del acero como $2,100,000 \text{ Kp/cm}^2$.

Cuadro 16. Esfuerzos de tensión estáticos para las tres condiciones de la carga de prueba estática.

Caso No.	Carga de Prueba	VIA	Esfuerzo σ (Kg/cm^2) Ubicación Sensores		
			ST1	ST2	ST3
E1	Baja (335 Kg)	O	13,00	6,38	-5,10
E2		E	-7,71	2,92	9,28
E3	Media (712 Kg)	O	26,57	10,67	-9,70
E4		E	-13,06	7,71	19,40
E5	Alta (1030 Kg)	O	46,56	22,49	-17,05
E6		E	-17,62	16,67	37,23

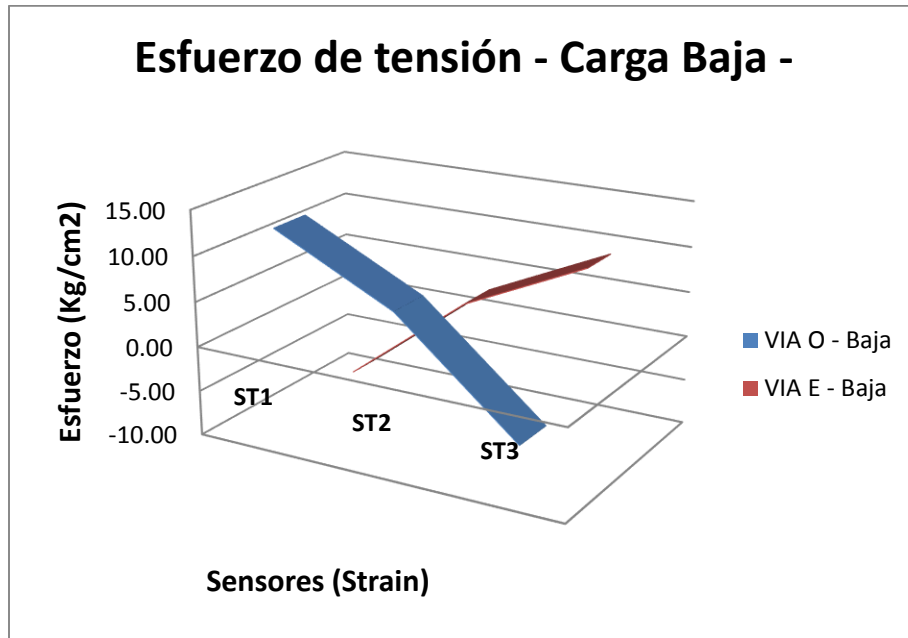


Figura 57. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Baja.

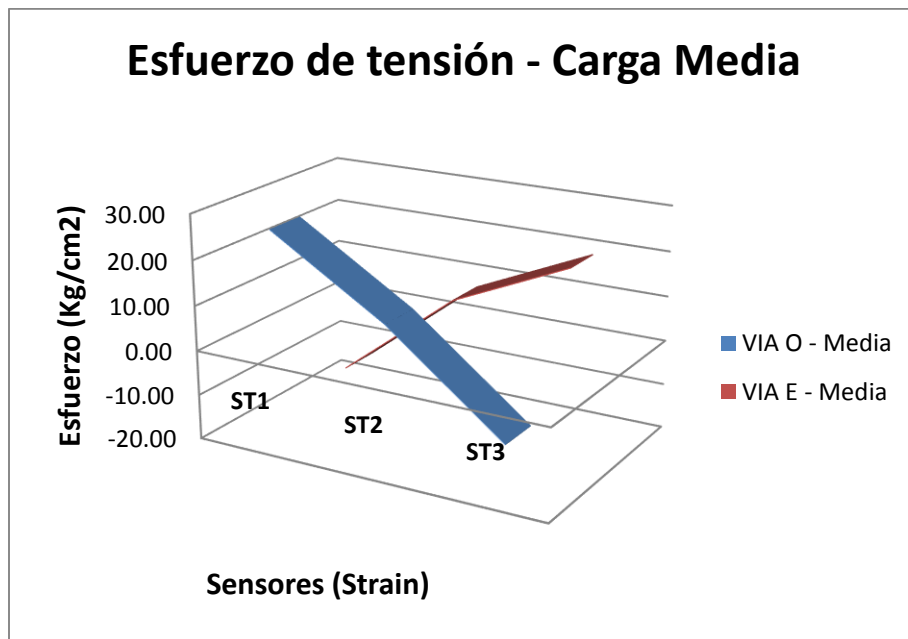


Figura 58. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Media.

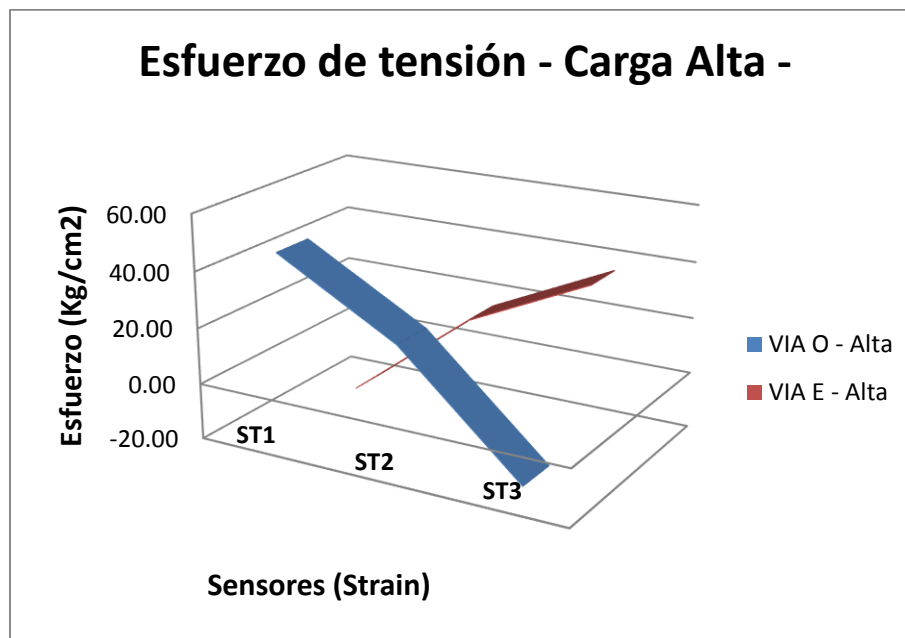


Figura 59. Esfuerzos de tensión estáticos con Carga de Prueba Alta.

8. Resumen de principales resultados

Con base en las contribuciones de cada objetivo, se presenta el siguiente resumen de los principales resultados globales.

- El análisis de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con monitoreo de salud estructural (Structural Health Monitoring – SHM, por sus siglas en inglés) de puentes. Ha permitido el análisis de enfoques relacionados con integración de información en e-Bridge se ha dividido en las siguientes áreas principales: a) Monitoreo de Salud Estructural de Puentes; b) Sistemas de monitoreo de puentes; c) Administración de información en SHM; d) Integración con componentes específicos; e) Integración de información en redes colaborativas.
- Se identificaron las posibles consultas estratégicas que resultan importantes en diferente medida para diferentes audiencias de usuarios. Además, como parte del análisis de requerimientos para integración de información, se realizó un estudio detallado de herramientas de administración de flujos de trabajo y de procesos de negocios que llevó a la selección de una herramienta particular para futuras fases de diseño y desarrollo.
- Se diseñaron modelos y protocolos para la integración de información que incluyen:
 - Modelo de Arquitectura General para Integración de Información.
 - Protocolo de integración de aplicaciones existentes con Suite Taverna.
 - Protocolo de integración de web services con BD e-Bridge 2.0.
 - Protocolo de integración de aplicaciones web con servidor Taverna.
 - Protocolo de interacción de usuarios con Taverna Workbench.
- Se diseñó un prototipo para el sistema de integración de información, que incluye:

- Prototipo de Flujo de Trabajo de Análisis de Modelo Real.
- Prototipo de Red Inalámbrica para Monitoreo de Puentes.
- Prototipo de Análisis de Información usando Inteligencia de Negocios.
- Prototipo de Portal e-Bridge y Aplicaciones Web / Móvil.
- Se mejoró la metodología de evaluación de puentes, aplicándola en 344 estructuras a nivel de la red vial nacional, generando procedimientos estandarizados para la inspección de inventario y visual de daños. Además de aplicó la metodología de evaluación detallada en 2 puentes piloto y un puente patrón.
- Se generaron los requerimientos necesarios para la creación de un geoportal que administre la información de los puentes en rutas nacionales.
- Se generaron una serie de prototipos posibles de geoportales para la administración de la información de puentes en rutas nacionales.
- Se comparó y analizó la tecnología disponible para la instrumentación de estructuras de puentes de acuerdo a su posibilidad de aplicación.

9. Resumen de principales conclusiones

A continuación se resumen y discuten las principales conclusiones y recomendaciones:

- El área de SHM es un campo extenso, complejo y muy rico en cuanto a su potencial para desarrollo de aplicaciones computacionales novedosas. A pesar de que existen muchos sistemas y tecnologías para SHM, aún existen retos importantes con respecto al manejo del flujo de grandes cantidades de información en tiempo real, así como en la interpretación, análisis y predicción de las condiciones de los puentes.
- SHM de puentes es un dominio que está actualmente muy poco estandarizado en cuanto a modelos y enfoques de administración de datos. Esto lleva por un lado a la definición de modelos propios o basados en prácticas “de facto” así como a la promoción y participación en actividades e iniciativas de estandarización.
- Los componentes específicos de e-Bridge que deben integrarse, presentan enfoques y tecnologías muy heterogéneos desde el punto de vista computacional (base de datos, lenguajes de programación, ambientes de desarrollo, etc.). La integración de información de estos componentes debe realizarse mediante un mecanismo lo más general posible, tomando en cuenta los altos niveles de heterogeneidad, distribución física y autonomía en el manejo de información, que presentan estos sistemas.
- El paradigma de redes colaborativas es perfectamente aplicable al área de SHM de puentes, vista como una alianza de entidades (universidades, municipalidades, centros de investigación, ministerios, ingenieros, científicos, etc.) que deben colaborar y compartir información con el fin de alcanzar objetivos comunes, en este caso monitoreo integral de salud de puentes, con base en sistemas computacionales.
- Se puede concluir que ninguno de los enfoques y proyectos revisados aplica la disciplina de redes colaborativas y en particular, ninguno aplica administración de procesos de negocios con el fin de integrar información entre entidades o componentes, por lo que esto podría convertirse eventualmente en un elemento

diferenciador en siguientes etapas (análisis / diseño) del proyecto e-Bridge 2.0. Se recomienda analizar en detalle la posibilidad concreta de utilizar modelos y herramientas BPM / Workflow en las siguientes fases del proyecto.

- El método seleccionado para analizar los requerimientos mediante talleres guiados por cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas, permitieron obtener información valiosa y realista con respecto a las verdaderas expectativas de usuarios potenciales de e-Bridge 2.0.
- Se trabajó en la selección de la herramienta que permita atender los requerimientos analizados. Esta selección se realizó mediante un proceso de comparación y evaluación entre todas las herramientas. La herramienta finalmente seleccionada fue Taverna.
- La arquitectura general propuesta está compuesta básicamente de: una capa de aplicaciones web, una capa de servidor de aplicaciones basada en el suite de Taverna (Workbench y Server) y servicios web, y una capa de administración de datos. La solución así diseñada se caracteriza por su interoperabilidad y escalabilidad.
- El sistema de integración de información diseñado está en capacidad de integrar diversas fuentes de datos sin importar en qué fueron desarrolladas o dónde se encuentran ubicadas.
- Los flujos de trabajo científicos son una herramienta muy poderosa para promover la interoperabilidad y la integración de información generada por sistemas heterogéneos asociados a monitoreo de salud de puentes.
- Las técnicas de inteligencia de negocios son completamente aplicables al área de monitoreo de salud de estructuras.
- Los prototipos asociados al sistema de integración de información de e-Bridge 2.0 apoyan directamente los procesos de toma de decisiones estratégicas en el ámbito de monitoreo de salud de puentes pues permiten integrar y sintetizar la información distribuida en sistemas heterogéneos. El uso de flujos de trabajo científicos y la aplicación de técnicas de inteligencia de negocios resultan clave en este sentido y representan un elemento diferenciador de esta investigación.
- Se mejoró la metodología de evaluación de puentes y se generaron procedimientos estandarizados para la inspección de inventario y visual de daños. Se generaron los requerimientos necesarios para la creación de un geoportal que administre la información de los puentes en rutas nacionales.
- Se generaron una serie de prototipos posibles de geoportales para la administración de la información de puentes en rutas nacionales.
- Se comparó y analizó la tecnología disponible para la instrumentación de estructuras de puentes de acuerdo a su posibilidad de aplicación.

Finalmente, se concluye que se cumplieron satisfactoriamente todas las tareas y entregables indicadas en el plan de acción del proyecto.

10. Resumen de discusiones y recomendaciones

Las recomendaciones principales se incluyen en los siguientes puntos:

- Existen muchas tecnologías computacionales relacionadas con administración de información en SHM que podrían aplicarse en este proyecto, incluyendo: big data, cloud computing, minería de datos, inteligencia de negocios, etc. Sin embargo, su aplicación debe evaluarse con cuidado considerando que el alcance u objetivo principal del proyecto en esta fase es integración de información con miras a un futuro enfoque de sistema experto. Se recomienda que estas tecnologías potenciales sean evaluadas en función del alcance, recursos y calendario del proyecto antes de ser consideradas para implementación.
- Se recomienda fuertemente el uso de herramienta Taverna como base de la integración de información en e-Bridge así como en proyectos con requerimientos similares en ese sentido.
- Se puede planificar en el futuro un programa de capacitación sobre la creación de flujos de trabajo en Taverna Workbench dirigido a todos aquellos usuarios que podrían diseñar flujos de trabajo.
- A partir del análisis y la investigación desarrollada alrededor del diseño de red inalámbrica, se puede considerar diseñar en el futuro un sistema inteligente de monitoreo de bajo costo basado en estándares abiertos.
- Se recomienda seguir adelante en futuras propuestas de investigación basadas en la utilización de flujos de trabajo y de herramientas de inteligencia de negocios tales como Taverna y Pentaho. Estos elementos representan puntos importantes de diferenciación con respecto a otros proyectos y sistemas de monitoreo de salud de puentes en el ámbito internacional.
- En cuanto al modelo de confiabilidad se recomienda analizar el comportamiento no normal de algunas variables y determinar una metodología para el manejo de variables continuas no normales.
- Se debe aplicar la metodología empleada para determinar el índice de confiabilidad a otros puentes que tengan los datos de pruebas estáticas y análisis estructural ya obtenidos.
- Debe continuarse el análisis del puente piloto.
- Aplicar el modelo de confiabilidad nuevamente en la superestructura del puente sobre el Río Virilla una vez que la rehabilitación se haya realizado.
- Con el fin de validar las metodologías de evaluación de puentes, es necesario continuar con su aplicación siguiendo los procedimientos recomendados con el fin de garantizar la homogeneidad en los resultados, también se recomienda incluir estos procedimientos dentro del alcance de la acreditación con la ya cuenta el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción, esto con el fin de potenciar la aplicación de los mismos a nivel nacional.
- También se recomienda la documentación y adaptación al medio nacional de las evaluaciones detalladas y cuantitativas y documentar sus usos, de forma tal que se extienda su aplicación y beneficios a nivel nacional.
- Por otra parte es necesario trabajar en generar herramientas móviles que permitan una toma de datos y procesamiento más ágil y con resultados en menor tiempo.

- Para que el proyecto eBridge pueda mantener su enfoque en infraestructuras de puentes, se recomienda utilizar alguna plataforma existente, alquilarla y contratar la personalización.
- No se recomienda utilizar tecnologías para las que no se ofrezca el servicio de personalización, porque esto limitaría la usabilidad del servicio.
- Se recomienda aplicar la metodología para desarrollo de usabilidad Hernández-Castro (Hernández-Castro, 2015), esta metodología genera insumos validados con los usuarios, para el diseño e implementación de los sistemas que simplifican y hacen menos costosa la etapa de desarrollo e implementación.
- Es necesario además iniciar propuestas de investigación enfocadas en propuestas de mejora de las estructuras de acuerdo a su valoración y la experimentación de nuevos métodos constructivos y nuevos materiales.
- Toda la información geoespacial generada puede vincularse con el proyecto de Atlas Digital de Costa Rica.
- Es necesario continuar con la investigación de sensores de bajo costo con el fin de promover la instrumentación como herramienta de evaluación de estructuras en Costa Rica.
- Toda la información y herramientas generadas deben aprovecharse para la creación de un sistema nacional de monitoreo de puentes a nivel nacional, extensible a la red cantonal.

11. Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington, DC: AASHTO.
- Deelman, E., Gannon, D., Shields, M., & Taylor, I. (2008). An overview of workflow system features and capabilities. *Workflows and e-Science*.
- Federal Highway Administration. (2006). *Bridge Inspector's Reference Manual*. Virginia: National Highway Institute, USA.
- García, P. C. (1 de Mayo de 2007). *Capítulo 1 - Conceptos de Workflow*. Obtenido de <http://blogs.msdn.com/b/pcgarcia/archive/2007/05/02/capitulo-1-conceptos-de-workflow.aspx>
- Green Eye. (s.f.). *Green Eye Data: Publishing, Exchanging & Standardizing*. Obtenido de Green Eye: http://www.green-eye-data.com/default_en.htm
- Macherla, P. (2012). *Types of Web Services - Big and Restful*. Obtenido de <http://theopentutorials.com/tutorials/web-services/types-of-web-services-big-and-restful/>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2007). *Manual de Inspección de Puentes*. San José: MOPT.
- Ortiz, A. M. (s.f.). *Bases de datos: Modelos de datos*. Obtenido de <http://elies.rediris.es/elies9/4-2.htm>
- Saffirio, M. (2006). *¿Qué son los Web Services?* Obtenido de <http://msaffirio.wordpress.com/2006/02/05/%C2%BFque-son-los-web-services/>

- Sonntag, M., Dimka, K., & Deelman, E. (2010). *Bridging the gap Between Business and Scientific Workflow*. Stuttgart: Universidad Stuttgart.
- Soto, B. (2012). *¿Qué es workflow o flujo de trabajo?* Obtenido de <http://www.gestion.org/economia-empresa/gestion-administrativa/29867/que-es-workflow-o-flujo-de-trabajo/>
- Talia, D. (2013). *Workflow Systems for Science: Concepts and Tools*. *ISRN Software Engineering*.
- Taverna. (2010). *Taverna features*. Obtenido de Taverna.org: <http://www.taverna.org.uk/introduction/taverna-features/>
- tutorialspoint. (2014). *What are Web Services*. Obtenido de http://www.tutorialspoint.com/webservices/what_are_web_services.htm
- van der Aalst, W., ter Hofstede, A., & Weske, M. (s.f.). *Business Process Management: A Survey*.
- w3schools. (2014). *Introduction to WSDL*. Obtenido de http://www.w3schools.com/Webservices/ws_wsdl_intro.asp
- Wenzel, H. (2009). *Health Monitorin of Bridges*. Austria: John Wiley & Sons, Ltda.
- Yildiz, U., Guabtnei, A., & Ngu, A. H. (2009). *Business versus Scientific Workflow: A Comparative Study*. Davis: University of California.
- Ebeling, Charles E. 2010. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Second Edition. Waveland Press, Inc. USA.
- O'Connor, Patrick. Kleyner, Andre. 2012. *Practical Reliability Engineering*. Fifth Edition. Wiley. USA.
- Nowak, A.S. *System Reliability Models for Bridge Structures*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. Vol. 52, No.4, 2004.
- Estes Allen C. et al. *Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach*. Journal of Structural Engineering. July 1999.
- Nowak, A.S. et al. *Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of Eurocode, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD*. 8th Annual ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. 2000.
- Nowak, A.S. et al. *System Reliability Models for Bridges*. Structural Safety, 7 (1990) 247-254. 1990. Elsevier.
- Frangopol, D. M. et al. *Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges*. Journal of Computing in Civil Engineering. January 2001.
- Estes, Allen C. 1997. *A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges*. PhD Thesis. University of Colorado, USA.
- Muñoz, Edgar. Et al. *Confiabilidad Estructural apoyada en monitoreo e instrumentación: aplicación en un puente de acero*. Revista Ingeniería en Construcción, Vol. 21, No.2, Agosto. 2006. Colombia.
- Ortiz Quesada, Giannina. Et al. Documento I. Informe técnico de los resultados del Proyecto. ebridge: Predicción remota de fallas en puentes. VIE-Tec. 2013.

- Carvajal, Johan. Pruebas Carga. Proyecto de investigación ebridge. Protocolo. Puente sobre el Río Purires.Tec. 2012
- Atlas Digital de Tenerife. Consultado 27 Oct. 2013. Disponible en: http://atlastenerife.es/portalweb/index.php?option=com_content&view=article&id=106&Itemid=79&lang=es.
- Bernabé, M; López, C. (2012). Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales. (IDE). Universidad Politécnica de Madrid. Consultado 10 Ene. 2015. Disponible en: http://www.lactapamba.com/libro/libro_fundamento_ide.pdf.
- Bolivar Leyva, M. Á. (2008). Desarrollo e implantación de un Geoportal y de servicios de Infraestructura de Datos Espaciales en el Ayuntamiento de Barcelona. Recuperado el 26 de Setiembre de 2014, de Infraestructura de Datos Espaciales de España: <http://www.idee.es/>.
- Bolivar. (2008). Desarrollo e implantación de un Geoportal y de servicios de Infraestructura de Datos Espaciales en el Ayuntamiento de Barcelona. Consultado 10 Dic 2013. Disponible en: http://www.idee.es/resources/presentaciones/JIDEE08/ARTICULOS_JIDEE2008/articulo9.pdf.
- Calbido de Tenerife. (2010). Mundo IDE: Geoportal. Recuperado el 27 de Octubre de 2013, de Atlas Digital de Tenerife: <http://atlastenerife.es/portalweb/>.
- Colaboradores de OpenStreetMap. (14 de Octubre de 2014). Derechos de autor y licencia. Obtenido de OpenStreetMap: <http://www.openstreetmap.org>.
- ESRI. (2013). Consultado 13 dic 2013. ArcGIS for Server 101. 2013. Disponible en: <http://www.esri.com/esri-news/arcuser/spring2013/~media/Files/Pdfs/news/arcuser/0313/arcgis101.pdf>.
- Fundecor. (07 de Octubre de 2014). Sobre nosotros: FUNDECOR. Obtenido de FUNDECOR: <http://www.fundecor.org>.
- Gobierno Bolivariano de Venezuela. (07 de Octubre de 2014). Visualizador Geográfico. Obtenido de Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar: <http://visor.ide.igvsb.gob.ve/>.
- Hernández-Castro, F. (2015). Usability Cook Book. Documento de apoyo académico. Consultado en mayo del 2014. Obtenido de: <http://skizata.com/projects.html>.
- Mancosu, E. (2009). Desarrollo de un prototipo para el Geoportal del Centro Temático Europeo de Usos del Suelo e Información Espacial de la Agencia Europea del Medio Ambiente. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona.
- Municipalidad de Palmares. (07 de Octubre de 2014). Visor Cartográfico. Obtenido de Municipalidad de Palmares: <http://www.municipalmares.go.cr/>.
- Moreno, M. (s.f.). Modelos de proceso del software Presentación Tema 2. Departamento de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.
- Nieto, A., Fernández, A., Hernández, A., & Gurría, J. (2010). DISEÑO DE UN GEOPORTAL PARA ANALIZAR LAS INICIATIVAS DE DESARROLLO RURAL LEADER EN EXTREMADURA. Revista Geográfica de América Central(Especial), 169-192.

- OVSICORI. (07 de Octubre de 2014). Mapa de estaciones. Obtenido de OVSICORI-UNA: <http://www.ovsicori.una.ac.cr>.
- RECOPE. (07 de Octubre de 2014). Ubicación de Oficina Centrales y Planteles. Obtenido de RECOPE: <https://www.recope.go.cr/>.
- Rujano, M. A. (2012). EL USO DE SERVIDORES DE MAPAS COMO INSTRUMENTO PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN VENEZUELA. *ecodiseño & sostenibilidad*, 4(1), 194-204.
- Sancho, M; Callejo, M. (2012). Los Geoportales. Perspectiva desde la usabilidad. . Recuperado el 26 de Setiembre de 2014, de Infraestructura de Datos Espaciales de España: <http://www.idee.es/>.
- Sistema Nacional de Información Territorial de Costa Rica (SNIT). (2016). Consultado 20 Ene. 2016. Disonible en: <http://www.snitcr.go.cr/>.
- Tait, M. (2005). Implementing geoportals: applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29, 33-47. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.011.
- UNA. (07 de Octubre de 2014). Sedes, facultades y centros. Obtenido de Universidad Nacional Costa Rica: <http://www.una.ac.cr/>.
- Xu, C., Yang, C., Li, J., Jizhe, X., Qu, X., Sun, M., . . . Bambacus, M. (2011). A Service Visualization Tool for Spatial Web Portal. In proceedings of the 2nd International Conference on Computing for Geospatial & Applications (pág. 6). ACM.

12. Apéndices

Apéndice 12-1. Revisión de Trabajo Relacionado sobre Integración de Información para Monitoreo de Salud de Puentes

Apéndice 12-2. Análisis de Requerimientos de Integración de Información.

Apéndice 12-3. Diseño de Modelos y Protocolos para Prototipo de Sistema de Integración de Información

Apéndice 12-4. Prototipo de Sistema Integrado

Apéndice 13-5. Procedimientos propuestos evaluación visual de puentes

Apéndice 13-6. Resultados obtenidos para el inventario nacional de puentes

Apéndice 13-7. Informe puente sobre río Virilla

Apéndice 13-8. Informe puente sobre río Aguacaliente