**EVALUACIÓN Y AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO DEL PUENTE JOROBAS IZQUIERDO POR MEDIO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.**

*Gilbert Francisco Torres Morales (1), Laura Landa Ruiz**(2), Guillermo Fox Rivera (2), Saúl Castillo Aguilar (2), Miguel Ángel Baltazar Zamora**(2), Patricia Elizabeth Morales Mapel (2), Raymundo Dávalos Sotelo(3)*

1 Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver., 91090, gitorres@uv.mx

2 Facultad de Ingeniería Civil, Zona Xalapa, Universidad Veracruzana, Calle de la Pérgola, s/n, 91000, Xalapa, Ver., lalanda@uv.mx

3 Instituto de Ecología A.C., Carretera antigua a Coatepec No. 351, El Haya, Xalapa, Ver, raymundo.davalos@inecol.mx

 **Instrumentación, salud estructural y comportamiento experimental de sistemas o**

**componentes.**

**RESUMEN**

Esta investigación aborda la "Evaluación y ajuste de modelo matemático del puente Jorobas Izquierdo por medio de vibración ambiental y pruebas no destructivas". Este puente, de importancia crucial en Veracruz, México, conecta la carretera Costera del Golfo y la Transístmica sobre las vías del tren interoceánico. Construido en 1950, sufrió asentamientos imprevistos que requirieron una reconstrucción en 1989. Dada la falta de planos y memorias de cálculo originales, este estudio es fundamental para entender su estado actual.

En el estudio se emplearon pruebas de vibración ambiental con sismógrafos de banda ancha para obtener el periodo fundamental de la estructura, un indicador vital de su condición. Este método no invasivo identifica el comportamiento del puente ante agentes externos como viento, tráfico y sismos, y sus datos fueron analizados con Geopsy. Complementariamente, se realizaron ensayos no destructivos (inspección visual, esclerometría según NMX-C-192-ONNCCE-2018 y detección de aceros en columnas) para documentar sus características y calibrar el modelo, lo que proveyó información esencial ante la ausencia de documentación original.

El objetivo principal fue analizar la estabilidad y la condición estructural del puente tras 36 años desde su última reconstrucción. Los datos recolectados se integraron en un modelo matemático en CSI BRIDGE 2025 para simular el comportamiento del puente y compararlo con los resultados de vibración. El modelo incluyó ejes, carriles, propiedades de materiales, secciones y elementos estructurales. Los resultados validaron las hipótesis al mostrar una notable similitud entre los periodos de vibración medidos y calculados, con errores mínimos. Esto confirma la eficacia de la metodología combinada (pruebas in situ y modelado avanzado) para evaluar y ajustar la representación numérica de la estructura, lo que es vital para una gestión y mantenimiento óptimos.

**ABSTRACT**

This research addresses the "Evaluation and Adjustment of the Mathematical Model of the Jorobas Izquierdo Bridge through Ambient Vibration and Non-Destructive Testing." This bridge, of crucial importance in Veracruz, Mexico, connects the Costera del Golfo and Transístmica highways over the Interoceanic Train railway tracks. Built in 1950, it suffered unforeseen settlements that required a reconstruction in 1989. Given the lack of original blueprints and design calculations, this study is fundamental to understanding its current condition.

The study employed ambient vibration tests using broadband seismographs to obtain the structure's fundamental period, a vital indicator of its condition. This non-invasive method identifies the bridge's behavior under external agents such as wind, traffic, and seismic events, and the resulting data were analyzed with Geopsy. Complementarily, non-destructive tests (visual inspection, sclerometry according to NMX-C-192-ONNCCE-2018, and reinforcement detection in columns) were performed to document its characteristics and calibrate the model, providing essential information in the absence of original documentation.

The main objective was to analyze the stability and structural condition of the bridge 36 years after its last reconstruction. The collected data were integrated into a mathematical model in CSI BRIDGE 2025 to simulate the bridge's behavior and compare it with the vibration results. The model included axes, lanes, material properties, cross-sections, and structural elements. The results validated the hypotheses by showing a notable similarity between the measured and calculated vibration periods, with minimal errors. This confirms the effectiveness of the combined methodology (in-situ testing and advanced modeling) for evaluating and adjusting the structure's numerical representation, which is vital for optimal management and maintenance.

**Metodología y Enfoque:**

La investigación empleó una metodología combinada, integrando **pruebas de vibración ambiental** y **ensayos no destructivos (END)** para obtener una caracterización robusta del puente.

1. **Pruebas de Vibración Ambiental:** Se utilizaron sismógrafos de banda ancha para capturar el comportamiento dinámico del puente bajo efectos naturales y operacionales (viento, tráfico, sismos). El análisis de estos datos con el software Geopsy permitió identificar el periodo fundamental de la estructura, un indicador crucial de su condición actual y un insumo esencial para la calibración del modelo matemático. Este método es no invasivo y ofrece una visión realista de la respuesta estructural.
2. **Ensayos No Destructivos (END):** Complementariamente, se realizaron diversas pruebas no destructivas para documentar las características físicas del puente. Estas incluyeron:
	* **Inspección visual:** Para detectar daños superficiales o anomalías evidentes.
	* **Esclerometría (según NMX-C-192-ONNCCE-2018):** Para estimar la resistencia a la compresión del concreto.
	* **Detección de aceros en columnas:** Para determinar la configuración y el estado del refuerzo interno.
	Estas pruebas proporcionaron información vital para calibrar y validar el modelo ante la falta de documentación original, permitiendo una representación más precisa de la geometría y propiedades de los materiales.

**Modelado Matemático y Ajuste:**

El objetivo principal fue analizar la estabilidad y la condición estructural del puente tras 36 años desde su última reconstrucción. Los datos recopilados de las pruebas in situ se integraron cuidadosamente en un **modelo matemático desarrollado en CSI BRIDGE 2025**. Este software permitió simular el comportamiento del puente, incorporando detalles como ejes, carriles, propiedades de materiales (obtenidas de los END), secciones transversales y elementos estructurales. La capacidad de ajustar este modelo con información física real es clave para optimizar su precisión.

**Resultados y Conclusiones:**

Los resultados de la investigación validaron las hipótesis planteadas al demostrar una **notable similitud entre los periodos de vibración medidos experimentalmente y los calculados a través del modelo matemático**, con errores mínimos. Este hallazgo confirma la eficacia de la metodología combinada, que integra pruebas in situ y modelado avanzado, para evaluar y ajustar la representación numérica de la estructura.

**Impacto y Proyección (Prólogo e Introducción):**

La evaluación estructural de puentes es un pilar fundamental de la ingeniería moderna, garantizando la seguridad pública y la durabilidad de infraestructuras críticas. Este estudio resalta la importancia de considerar parámetros como el estado de la estructura, su comportamiento dinámico, la resistencia de sus materiales y su estabilidad general. La capacidad de ajustar la información de pruebas reales a modelos matemáticos ya sea mediante métodos paramétricos (basados en propiedades físicas) o no paramétricos (basados en algoritmos), optimiza significativamente el análisis, permitiendo una toma de decisiones más precisa y apegada a la realidad.

La integración del análisis de vibración ambiental es un factor clave, ya que proporciona una comprensión del comportamiento dinámico bajo condiciones reales. En definitiva, una evaluación robusta como la realizada en este estudio es indispensable para la toma de decisiones informadas sobre mantenimiento, rehabilitación y prevención, priorizando la seguridad y el uso eficiente de la infraestructura a largo plazo.

Este trabajo no solo proporciona una evaluación actualizada del puente Jorobas Izquierdo, sino que también establece un precedente metodológico para la evaluación y gestión de otras infraestructuras antiguas con documentación incompleta, asegurando su operatividad y seguridad futuras.