

Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación

Genetic algorithms and instrumentation determination of dynamic loads of heavy trucks over a bridge

Edgar Muñoz^{*1}, David Gómez*, Federico Núñez** y Carlos Florez*

* Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. COLOMBIA

** Illinois Institute of Technology. USA

Fecha de recepción: 14/ 03/ 2011
Fecha de aceptación: 14/ 07/ 2011
PAG. 321 - 352

Resumen

Esta investigación determina las cargas por eje de los camiones que circulan por un puente ubicado en una de las vías principales de Colombia, utilizando la técnica de control BWIM (Bridge Weight in Motion), no empleada antes en el País. Nuestro grupo de investigación implementó la Metodología de los Algoritmos genéticos, instrumentación y monitoreo, para el Puente denominado Boquerón en la vía Bogotá – Villavicencio, Colombia. Para ese fin, se instrumentaron cuatro vigas con un sistema electrónico de medición de tráfico en cada carril, además de un sistema de adquisición de datos y ensayos de laboratorio. Desarrollamos la calibración de su modelo estructural y la generación de funciones matemáticas para hacer converger líneas de influencias de cargas con pruebas experimentales y así determinar las cargas en movimiento de los camiones. En adición, se desarrolló una herramienta computacional, capaz de representar con aceptable precisión las cargas en movimiento.

Palabras Clave: Puentes, algoritmo genético, cargas en movimiento, instrumentación, monitoreo, medición de tránsito y modelación estructural

Abstract

This research determines the axle loads of trucks traveling on a bridge located in one of the most important corridors of Colombia, using the technique of control BWIM (Bridge Weight in Motion), not used before in the country. Our research group developed a Genetic Algorithm based in a trial test, implementation and monitoring to the bridge called Boquerón of Colombian Highways (Bogota – Villavicencio). For such an effort, four girders were monitored by data acquisition electronics joined by an electronic traffic log device by lane accompanied of laboratory testing for materials. Model calibration was performed by mathematical approach of in-situ influence lines compared to those obtained by modeling, giving as outcome loads of moving trucks over the bridge. In addition, we developed a computational tool, able to represent with reasonable accuracy the moving loads.

Keywords: Bridges, genetic algorithm, moving loads, instrumentation, monitoring, transit estimation, structural models

1. Introducción

Los puentes de la Red Vial Nacional de Colombia son estructuras esenciales para el País y son en mayoría estructuras antiguas, con deficiencias en mantenimiento durante su vida útil, y en consecuencia, vulnerables por sus condiciones de deterioro. Una de las razones de ese deterioro es el sobrepeso que pueden causar los camiones que circulan por las vías troncales y transversales de la Red, que acelera los fenómenos de daños y disminuye apreciablemente su durabilidad.

1. Introduction

Bridges in the National Road Network of Colombia are the most important structures for the Country; they are mainly old structures lacking of proper maintenance during their operating life and, consequently they are vulnerable to deterioration due to their current conditions. One of the main reasons for such deterioration is overload caused by trucks travelling on trunk roads and cross roads of the network, which accelerates damage phenomena and considerably diminishes their durability.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: edgar.munoz@javeriana.edu.co



El aumento de estas cargas han sido detectados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y las Concesiones, mediante estaciones de control de peso, fijas y móviles, encontrándose sobrepesos de camiones entre 1% á 10% en la estaciones fijas y entre 4% á 16% en estaciones móviles. Los daños en puentes causados por este sobrepeso exigen del País la inversión de recursos adicionales para su rehabilitación, que se podrían evitar si se mejorara y complementara el sistema de control de pesos en las vías.

Una de las líneas de investigación de nuestro grupo de investigación está referida a la Ingeniería de puentes y confiabilidad estructural y está relacionada desde hace 5 años con el estudio estadístico de las cargas reales (pesajes, conteo, entre otros) para lo cual emplea técnicas de confiabilidad estructural para la evaluación de puentes existentes (a la fecha hemos monitoreado e instrumentado tres (3) puentes de la Red Vial Nacional encontrándose resultados importantes). En particular, en el proyecto de investigación denominado: Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación, realizamos la evaluación del puente Puerto Salgar (localizado en la carretera Honda – Río Ermitaño), Colombia, con instrumentación, y se encontró que el sobrepeso de los camiones que circulan por el puente varía entre 10 á 15%, además de comprobar que la carga de diseño C40-95 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) no incorpora en forma suficiente lo que producen los camiones reales que transitan por esta estructura.

Lo más crítico para la ingeniería nacional es que se han presentado colapsos parciales o totales en algunos de los puentes vehiculares de la Red Vial Nacional; donde la sobrecarga es considerada una de las probables causas. Esta afirmación, es comprobada también en otras investigaciones del Grupo de Investigación, particularmente en: Causas del colapso de algunos puentes en Colombia (E, Muñoz, 2002). Por lo anteriormente expuesto, las obras de infraestructura vial, nuevas y antiguas, deben tener planes muy claros de mantenimiento que certifiquen su funcionamiento adecuado, estabilidad y vida útil (entre ellas, el control de pesos de los tracto camiones que circulan por las carreteras principales. Por tanto, es urgente complementar los sistemas de control de pesaje convencionales que actualmente están funcionando en el País e implementar nuevos sistemas, con mayores alcances, mayor cobertura y que tengan un costo relativamente bajo, es decir económicamente viables con el presupuesto asignado por la Nación. Basado en esta necesidad, se propone en este documento un sistema de pesaje en movimiento que determine el peso bruto,

The overloads increase has been detected by the National Institute of Roads Network (INVIAS) and Road Concessionaires by means of weighing control stations, static and mobiles, determining trucks overloads ranging from 1% to 10% by static weighing stations and, from 4% to 16% by mobile stations. Damages caused by surcharge demand an extra investment of resources from the government for rehabilitation purposes, which could be saved if an improved and complementary road-weight control system might be implemented.

One of the research strands in our research team is referred to Bridges Engineering and Structural Reliability and, from five years now, it is related to the statistic study of actual load conditions (weighing system, traffic counting, among others) by employing structural reliability techniques for the evaluation on existing bridges (so far (3) three bridges in the National Road Network have been monitored and implemented thus obtaining relevant outcomes). Particularly, the research project named: Evaluation by structural reliability on steel bridges based on monitoring and instrumentation conducted an instrumented evaluation on Puerto Salgar bridge (located in the Honda – Río Ermitaño highway), Colombia, finding that surcharge due to trucks travelling on the bridge ranges from 10 to 15%. Furthermore, it was proved that design capacity C40-95 in the Colombian Code for Bridges Seismic Design (CCDSP) does not entirely include the surcharge provoked by actual trucks travelling on such structure.

The most critical issue for national engineering is the fact that partial or total collapses have taken place in some vehicular bridges of National Roads Network, where overload is considered as one of the main causes. Such statement is also supported by other researches in the Research Team, particularly by: Collapse Causes of some bridges in Colombia (E, Muñoz, 2002). Consequently, road infrastructure works, both new and old ones, shall have quite clear maintenance schedules to certify their proper working condition, stability and operational lifetime (among them: weighing control of trucks-tractor travelling on main highways). Therefore, it becomes urgent to complement conventional weighing control systems currently available in the Country and to implement new systems providing wide range, higher coverage and, relatively low cost, i.e., economically practical for the national budget. Based on such requirements, this paper proposes a weigh-in motion system to determine the total gross load, load per axle,

peso por eje, tipo, conteo, entre otros, de los camiones que circulan por un puente, a través de instrumentación y el desarrollo de un algoritmo genético para su estado dinámico.

2. Marco teórico y estado del arte

Los puentes nuevos y existentes de la Red Vial Nacional de Colombia se diseñan y revisan empleando el camión de diseño C40-95, del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP). Esta carga la determinó la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) y fue ratificada por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) en el año de 1997 en el estudio: Definición de las cargas de diseño para puentes en Colombia.

Actualmente, el control y estudio de las cargas de los tracto camiones que circulan por la Red Vial Nacional de Colombia, se realiza a través de sistemas de pesajes estáticos y en movimiento, que son administrados por parte del INVIAS, Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y las Concesiones.

Por otro lado, en el mundo existen dos (2) sistemas de pesaje en movimiento basados en las especificaciones internacionales de la norma ASTM E 1318-02:

El primero, es denominado WIM (Weight in motion), que consiste en medir las fuerzas estáticas y dinámicas de los ejes de un vehículo en movimiento permitiendo almacenar datos sobre el peso de los vehículos, el volumen de tráfico, su clasificación y velocidad. Por su forma y manera de instalación tiene la ventaja que los conductores no están enterados de la operación de pesaje y no intentan evitarla, generalmente se encuentran después de un peaje y cuando detectan un camión sobrecargado, lo dirigen a una estación fija (estática), de tal forma que se compruebe la sobrecarga y eventual sanción. Este sistema ha servido para supervisar los vehículos sobrecargados que intentan evadir la normativa de un País, habiéndose implementado en el mundo como fruto del crecimiento de tráfico durante las últimas décadas y buscando la protección de las obras de infraestructura vial, especialmente los puentes.

El segundo sistema de pesaje en movimiento consiste en un pesaje a través de un puente instrumentado y se denomina BWIM (Bridge Weight in motion), permite determinar el peso dinámico (total y por ejes, entre otros) de los camiones pesados que circulan sobre un puente, basados en su instrumentación y en desarrollos matemáticos denominados Algoritmos genéticos.

type, counting, among others factors for trucks travelling on a bridge, by means of instrumentation and development of a genetic algorithm for dynamic conditions.

2. Theoretical framework and state of the art

Brand new and existing bridges in the National Roads Network in Colombia are designed and reviewed by using the C40-95 truck type, in the Colombian Code for Bridges Seismic Design (CCDSP). Such overload was established by the Colombian Association of Seismic Engineering (AIS) and was confirmed by the National University of Colombia (Bogota Head Office) in 1997 in the research: Definition of design capacity for Bridges in Colombia.

Nowadays, the overloads control and study of trucks-tractor travelling on the National Road Network of Colombia is carried out by means of static weighing and weigh-in motion systems, managed by INVIAS, National Concession Institute (INCO) and Concessionaires.

On the other side, there are two (2) weigh-in motion systems available worldwide, both based on international specifications of Regulation ASTM E 1318-02:

The first is the so called WIM (weight in motion), which consist in measuring static and dynamic strengths on a vehicle axles in motion, thus being able to store data on vehicles weight, traffic volume, classification and speed. Due to its shape and practical installation, it has the advantage of being unnoticed by drivers who do not try to avoid it. It is generally installed behind a toll gate and after detecting an overloaded truck, the latter is addressed to a fixed (static) station, so that the overload is proved and the eventual sanction is taken. This system has been useful to supervise overloaded vehicles trying to avoid the national traffic regulation and, it has been implemented as the result of traffic increase during last decades to provide protection for infrastructure road works, mainly for bridges.

The second weigh-in motion system by means of an instrumented bridge, called BWIM (Bridge Weight in motion), which enables the determination of dynamic weight (total and per axles, among others) for heavy trucks travelling on a bridge, based on its instrumentation and mathematical developments called genetic algorithms.



Este sistema proporciona la información sobre factor de impacto, el factor de distribución lateral y los registros de esfuerzos que se utilizan para el análisis adicional del puente. Pueden adecuarse para tener las mismas aplicaciones del sistema WIM, con precisión razonable, y ventajas tales como: ser portátil y económica, tener instalación rápida, y facilidad de mantenimiento. El BWIM fue creado y utilizado en el mundo en los años 70 por la administración federal de carreteras de Estados Unidos (FHWA), denominándolo inicialmente B-WIM. Por otro lado, Moses (1979) introdujo un algoritmo para determinar la carga móvil sobre un puente instrumentado empleando el método de las líneas de influencia. En los años 80, se desarrolló el sistema B-WIM denominado AXWAY en Australia, el cual se basó en el mismo concepto de las líneas de la influencia, adicionalmente en 1986, desarrolló un sistema con mayor eficacia usando alcantarillas, lo cual lo denominó CULWAY. Asimismo, la empresa Bridge Weighing Systems Inc. de Estados Unidos, desarrolló uno de los primeros sistemas comerciales de B-WIM en 1989, basándose en Algoritmos genéticos Moses. En los años 90, se desarrollaron tres nuevos sistemas, en Irlanda, Eslovenia y Japón. En Europa, este sistema se utilizó extensamente a partir de 1999, cuando se encontraron mejoras significativas basadas en recientes investigaciones (Ver [Quilligan, M, 2003]). Actualmente, en el mundo se está investigando nuevos algoritmos dinámicos para este sistema, empleando técnicas de optimización que buscan mejorar su alcance, exactitud y confiabilidad. En Eslovenia se empleó este sistema, especialmente como parte de la elaboración de la norma para la evaluación de la capacidad de carga de puentes existentes (Znidaric, Jas, 1994).

Los Algoritmos genéticos, según Goldberg (1989), son algoritmos de búsqueda que se utilizan ampliamente para resolver u obtener soluciones parciales a problemas de optimización. Estos algoritmos, parten de un conjunto de posibles soluciones al problema en cuestión, las cuales se van mejorando por medio de la simulación de procesos de evolución, en los cuales se incluyen selección natural y de intercambio de información genética, tal y como ocurre en la evolución natural (a lo cual se debe su alusión genética en el análisis estructural). Una de las características principales de este tipo de procedimientos corresponde al hecho que trabajan sobre una población de soluciones y no con una sola como hacen los procedimientos tradicionales. Con los algoritmos genéticos se pueda explorar diferentes regiones del espacio de soluciones al mismo tiempo, con lo cual la posibilidad de quedar atrapado en un mínimo local se reduce.

This system provides information on the impact value, lateral distribution factor and stress recordings employed for an additional bridge analysis. It can be adjusted to obtain the same application as from WIM system, with a reasonable accuracy and advantages such as: portability and cost-effectiveness, easy installation and simple maintenance program. The BWIM was created and employed in the world in the 70's by the federal highway administration of the United States (FHWA), previously named B-WIM. On the other hand, Moses (1979) introduced an algorithm to determine live load on an instrumented bridge by using the method of influence lines. In the 80's, the B-WIM system was developed, which was named AXWAY in Australia and, it was based on the same concept of influence lines. Additionally, in 1986 a new system was developed counting with higher effectiveness by employing sewages, which was named CULWAY. Similarly, in the United States, Bridge Weighing Systems Inc. developed one of the first B-WIM commercial systems in 1989, based on genetic algorithms by Moses. In the 90's, three new systems were developed in Ireland, Slovenia and Japan. In Europe, this system was widely used as from 1999, when significant improvements were achieved by recent researchers (See [Quilligan, M, 2003]). Nowadays, in the world new dynamic algorithms are under research for this system by employing optimization techniques aimed to improve its performance, accuracy and reliability. In Slovenia this system was used, mainly for the elaboration of a regulation to evaluate load capacity for existing bridges (Znidaric, Jas, 1994).

Genetic Algorithms, according to Goldberg (1989), are algorithms-in-search widely used to solve problems or to achieve partial optimization solutions. These algorithms are developed from a set of possible solutions for a given problem, which are progressively improving by means of evolutionary simulation processes, that include natural selection and genetic information exchanges the same as in a natural evolution process (which is referred as genetic in structural analysis). One of the main characteristics of such procedures is the fact that they work on a solution population; not only for one kind of solution, as traditional procedures do. Genetic algorithms enable the exploration of different regions of a solutions space at the same time, therefore the chances of getting limited to a local minimum space is reduced.

Según [Quilligan, M, 2003], se está investigando en diferentes países métodos de algoritmos genéticos para la evaluación de las cargas en movimiento, los cuales se han basado en diferentes aspectos y criterios tales como: líneas de influencia, modelos estructurales avanzados en elementos finitos, superficies de influencia en modelos de elementos finitos, entre otros. También en simulaciones numéricas avanzadas que incluyen la presencia múltiple de vehículos y algoritmos dinámicos desarrollados por: [Chan et al., 2006], [Law et al., 1997] [Zhu et al., 2000], entre otros.

Experiencia nacional en el tema

El sistema B-WIM no ha sido empleado en Colombia, ni por INVIAS, INCO, las concesiones o las Universidades. No obstante, en un trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana (Acevedo, A. et al., 2006), se estudió el sistema a través de un prototipo a escala del puente Puerto Salgar (Ver Figura 1), constituyéndose en la primera experiencia nacional en este tema; se basa en simulaciones y pruebas a nivel de laboratorio incluyendo el desarrollo de un algoritmo genético y la instrumentación del prototipo, lográndose resultados muy importantes por lo que sirven como insumo para este proyecto y futuras investigaciones relacionadas.

According to [Quilligan, M, 2003] different genetic algorithms methods are under study for the evaluation of live loads, which are based on different aspects and criteria such as: lines of influence, advanced structural models on fine elements, influence surfaces on finite element models, among others. Also based on advanced numerical simulations, which include a multiple flow of vehicles and dynamic algorithms developed by [Chan et al., 2006], [Law et al., 1997], [Zhu et al., 2000], among others.

National experience on the subject

The B-WIM system has not been implemented in Colombia either by INVIAS or by INCO, Concessionaires or Universities. However, a PhD thesis work developed at Pontificia Universidad Javeriana (Acevedo, A. et al. 2006), studied the system by means of a prototype to scale on Puerto Salgar bridge (see Figure 1), thus becoming the first local experience on this subject. It was based on simulations and laboratory tests including the development of a genetic algorithm and the prototype instrumentation, thus achieving significant outcomes used as data input for this project and future related research studies.

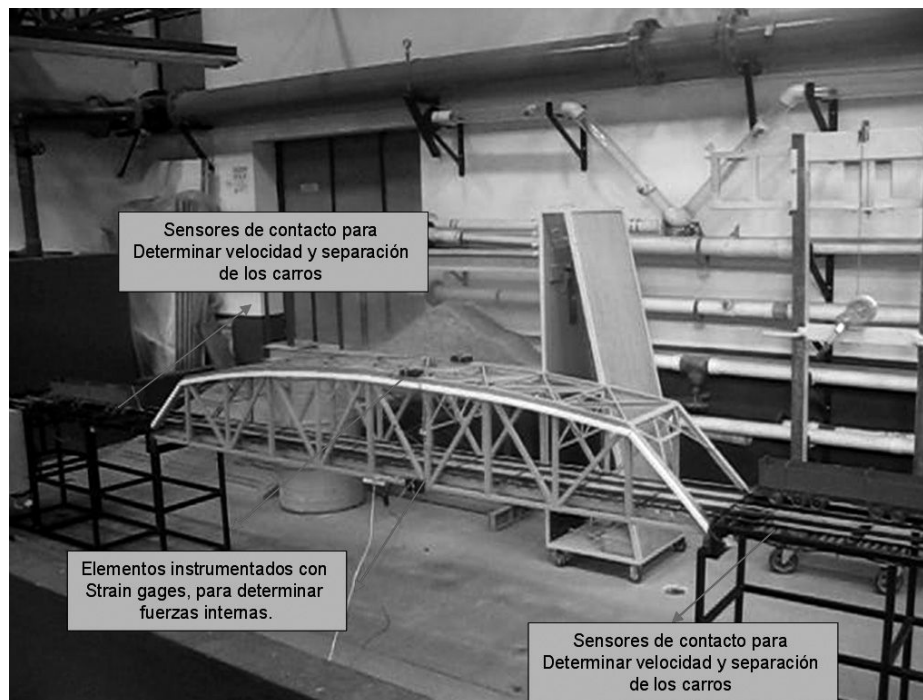


Figura 1. Prototipo a escala del puente Puerto Salgar, con su respectivo sistema de instrumentación
 Figure 1. Prototype to scale on Puerto Salgar Bridge with its instrumentation system

3. Metodología

A continuación se presenta cada una de las etapas que implementamos para la ejecución de este proyecto de investigación, con su correspondiente descripción.

3. Methodology

Following a detailed description of each stage implemented for the execution of this research project.

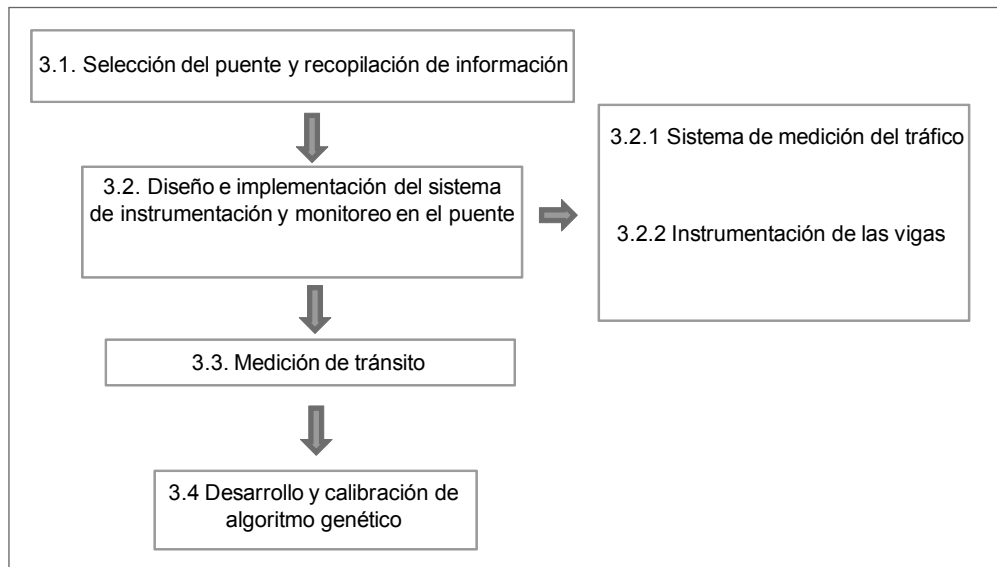


Figura 2. Etapas del estudio
Figure 2. Research Study Stages

3.1 Selección del puente y recopilación de información

Esta etapa consistió en la selección de un puente vehicular que sirvió para la adecuación del sistema de pesaje en movimiento, de manera que cumpla los siguientes requisitos: ser una estructura de una sola luz, localizado en vía principal y donde no exista curva horizontal, además con una superficie de pavimento en buen estado. Para ello, nuestro grupo de investigación de “Estructuras” se contactó con la concesión COVIANDES, que tiene a su cargo la administración de la carretera Bogotá – Villavicencio, Colombia, a quienes presentamos los alcances de este proyecto de investigación y decidieron autorizar su implementación en el puente Boquerón. Este puente está compuesto estructuralmente de vigas pos tensadas y losa en concreto reforzado, simplemente apoyada y luz de 20 metros (entre ejes); el ancho del tablero es de 14.50 metros (Ver Figura 3 y Figura 4).

3.1 Bridge selection and data collection

This stage consisted in the selection of a vehicular bridge which was adapted for the implementation of a weigh-in motion system, so that the bridge would meet the following requirements: being a single-span structure, being part of a main road with no horizontal curves and, having a pavement surface in good conditions. For such an effort, our “Structures” research team contacted COVIANDES Concessionaire that administrates Bogota – Villavicencio highway, Colombia, to introduce the research project scope and they decided to authorize the implementation on Boquerón Bridge. The structure of this bridge is composed of post-tensioned beams; reinforced concrete slab, simple bearing slab; 20 meters span (between axles); deck 14.50 meters wide (see Figure 3 and Figure 4).



Figura 3. Vista en perfil del puente Boquerón simplemente apoyado de viga postensada y losa en concreto reforzado
Figure 3. Cross section view for Boquerón Bridge, which is simply supported by a post-tensioned beam and reinforced concrete slab



Figura 4. Vista en planta del puente Boquerón
Figure 4. Plan view on Boquerón Bridge

Adicionalmente para el trabajo de investigación sobre este puente, la Concesión Coviandes nos suministró los planos de construcción y apoyo logístico para las labores de su instrumentación y monitoreo, asimismo, para la información sobre las características del tráfico que pasa sobre el puente, la Concesión nos proporcionó registros de las cargas por eje de los camiones en la carretera Bogotá- Villavicencio, en los mismos días en que se realizó la instrumentación.

Additionally, for this research work, COVIANDES Concessionaire delivered construction drawings and logistic support for instrumentation and monitoring tasks on this bridge. Besides for information about traffic features crossing the bridge, the company also provided load per axle records of trucks travelling on the Bogota-Villavicencio Highway, on the very same dates when instrumentation was carried out.

3.2 Diseño e implementación del sistema de instrumentación y monitoreo en el puente

Esta labor de campo se dividió en dos (2) partes y que se explican a continuación:

3.2.1 Sistema de medición del tránsito

Para esta etapa el Grupo de investigación adquirió el sistema TRS fabricado por la empresa Canadiense IRD - International Road Dynamics Inc., el cual permite tener conocimiento en tiempo real de: La velocidad, el número de ejes, distancia entre ejes de los vehículos de todo tipo que circulan en cada calzada por el puente (Ver Figura 6). Para su instalación y puesta en marcha se contrató a la empresa nacional CONTELEC, especialistas en la adaptación de los sistemas de pesajes estáticos y en movimiento (fabricados por IRD) con quienes realizamos cortes del pavimento y embebimos dos (2) Loop inductivos y cuatro (4) piezoeléctricos en cada calzada como se observa en la Figura 5 y Figura 7.

3.2. Design and implementation of instrumental and monitoring system on the bridge

This field task was divided into (2) stages which are detailed below:

3.2.1 Traffic measurement system

For this stage, the research group purchased the TRS System manufactured by Canadian Company IRD – International Road Dynamics Inc., which provides real-time information on: speed, axle number, distances between axles for any kind of vehicle travelling on each bridge’s carriageway (See Figure 6). For installation and start up, the local company CONTELEC was hired, who are specialists in the adjustment of static weighing systems and weigh-in motion systems (manufactured by IRD). Pavement cutting were developed, two (2) inductive loops and (4) piezoelectric wires were embedded inside each carriage way, as observed in Figure 5 and Figure 7.



Figura 5. Cortes en el pavimento para la instalación de los Loop inductivos y cables piezoeléctricos
Figure 5. Pavement cutting for the installation of inductive loop and piezoelectric wires



Figura 6. Gabinete con las conexiones electrónicas, el sistema suministrado por la empresa Canadiense IRD - International Road Dynamics Inc. y un computador para la adquisición de los datos de conteos y medición de los vehículos que circulan por el puente.
Figure 6. Electric connection cabinet of the system supplied by Canadian IRD – International Roads Dynamics Inc; computer for data collection of counting and measurements on vehicles travelling on the bridge

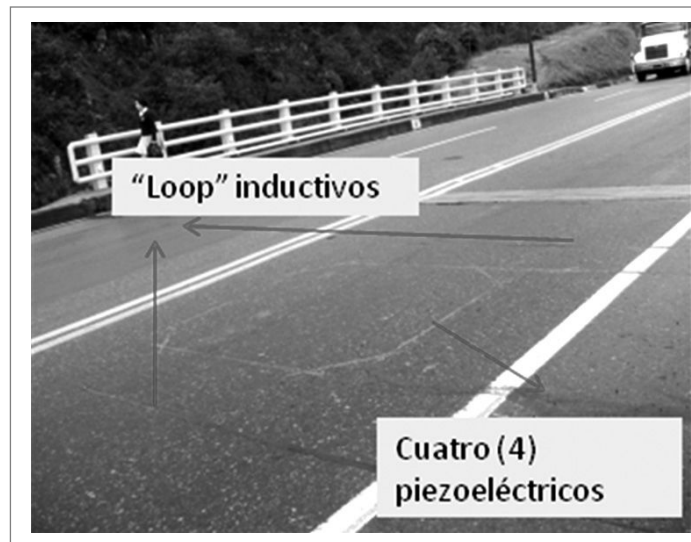


Figura 7. Dos (2) Loop inductivos y cuatro (4) piezoeléctricos instalados en la calzada Bogotá - Villavicencio
Figure 7. Two (2) Inductive loops and four (4) piezoelectric wires installed in the Bogota-Villavicencio carriageway

3.2.2 Instrumentación de las vigas

Cuatro (4) de las cinco vigas preesforzadas del puente se instrumentaron mediante la instalación de LVDT, que permitieron medir sus desplazamientos verticales a tiempo real, sincronizados con el sistema de medición del tráfico anteriormente explicado. Para ello se diseñaron cerchas apoyadas en andamios, que permitieron instalar en forma vertical los LVDT a la mitad de la luz del puente, como se observa en la Figura 8 y Figura 9.

3.2.2 Beams Instrumentation

Four (4) out of the five pre-stressed bridge beams were instrumented by means of a LVDT installation, which enabled the measurement of vertical displacements on real time, synchronized with the traffic measurement system explained above. For such an effort, screed rails were supported on scaffoldings which allowed the vertical installation of LVDT at the bridge mid-span, as observed in Figure 8 and 9.

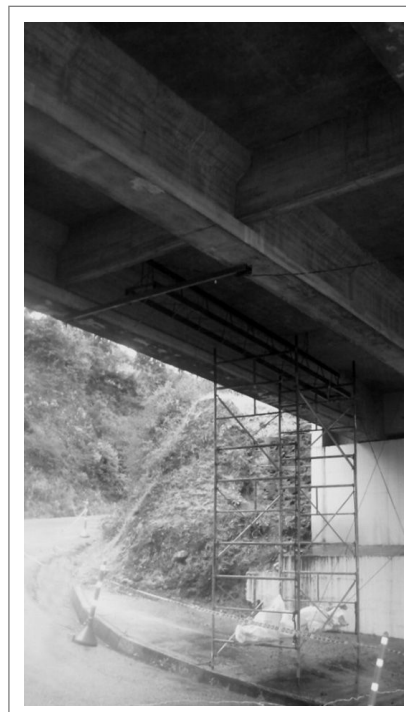


Figura 8. Instalación de los LVDT en el centro de las cuatro vigas preesforzadas principales del puente que permiten medir deformaciones verticales por el paso del tráfico sobre el puente

Figura 8. LVDT installation in the center of the main four pre-stressed beams, which allow the measurement of vertical deformations due to the traffic travelling on the bridge

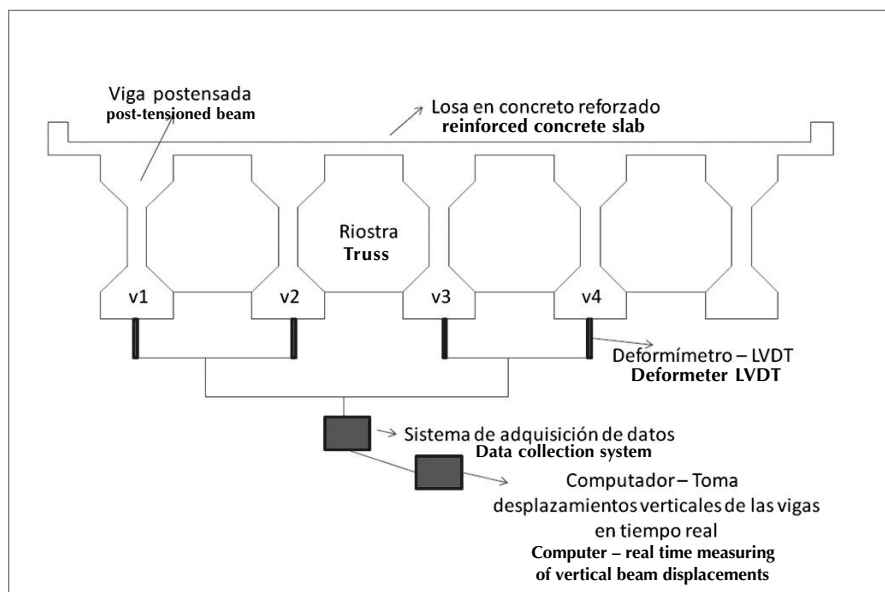


Figura 9. Esquema con la localización de los LVDT en las vigas del puente y el sistema de toma de datos
Figure 9. Layout of LVDT allocation on bridge beams and, data collection system

3.3 Medición de Tránsito

Otra aplicación del sistema de instrumentación, es la automatización de medición del tránsito discriminado en la vía. Al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes de tránsito que presenta el INVIAS, se comprueba la precisión del dispositivo para medir tránsito, lo cual genera un gran potencial de investigación desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito y transporte.

El TPD de camiones obtenido en la presente prueba piloto fue de 5858; el TPD de camiones reportado por el INVIAS para el 2008 fue de 5153, que con un crecimiento moderado podría estar del orden de 5500 a 5800 para el 2010; demostrando la consistencia que tienen las mediciones automatizadas de tránsito mediante los sensores de piso instalados. En cuanto al análisis comparativo de la distribución porcentual obtenida en la prueba piloto y la suministrada por el INVIAS, se encuentra también una gran similitud; en la prueba piloto de la presente investigación se obtuvo una distribución porcentual de pesados de 76%, 5%, 11% y 8%, para C2, C3-4, C5 y >C5; en los volúmenes del INVIAS la distribución porcentual de pesados es de 64%, 10%, 10% y 16%, para C2, C3-4, C5 y >C5, respectivamente. De otra parte, la prueba piloto realizada también permitió capturar información de las velocidades de los vehículos con gran consistencia.

3.3 Traffic measurement

Another application from the instrumentation system is the automatic measurement of differentiated traffic travelling on the carriage way. By comparing the obtained results to the traffic volumes presented by INVIAS, the accuracy of the device measuring traffic is confirmed, thus generating a great research potential from traffic and transportation engineering point of view.

Trucks TDP obtained from the current pilot test was 5858; trucks TDP reported by INVIAS for year 2008 was 5153, which with a moderate growth could achieve approximately from 5500 to 5800 for year 2010; thus demonstrating the soundness of automatic traffic measurements by means of installed ground sensors. From comparative analysis of percentage distribution obtained from pilot test and the one provided by INVIAS a great similarity is found. The pilot test of the current research delivered weights percentage distribution of 76%, 5%, 11% and 8%, for C2, C3-4, C5 and >C5; the volumes delivered by INVIAS have weights percent distribution of 64%, 10%, 10% and 16%, for C2, C3-4, C5 and >C5, respectively. On the other hand, the pilot test also enabled gathering information about vehicles speed on a sound basis.

3.4 Desarrollo y calibración de algoritmo genético

A continuación se presentan las etapas llevadas a cabo para el desarrollo del algoritmo genético, mediante un aplicativo computacional implementado en MATLAB. Este, permite estimar las cargas por eje de los camiones detectados por el sistema electrónico explicado en el numeral 3.2.1, de tal forma que se acerque a la magnitud de las deformaciones verticales que sufren las cuatro (4) vigas instrumentadas mediante los sistemas electrónicos explicados en el numeral 2.3.2 (Ver Figura 10).

3.4. Development and calibration of genetic algorithm

The stages carried out to develop a genetic algorithm are presented below, by means of a computer application implemented in MATLAB. It is able to estimate load per trucks axles sensed by the electronic system explained in number 3.2.1, so that it can approximate to magnitude vertical deformations undergone by four (4) beams instrumented by means of electronic systems explained in number 2.3.2 (See figure 10).

3.4.1 Desarrollo de modelo estructural

Basados en los planos de diseño del puente se elaboró el modelo estructural de su tablero tipo “parrilla” o “entramado” que está compuesto por elementos finitos discretos tipo barra o frame en el programa SAP-2000. Este modelo contiene las propiedades geométricas de los elementos de dicho entrespaño (Ver Figura 11), tales como: vigas principales, losa, riostras y bordillos.

3.4.1 Model Structural Development

Based on the bridge’s design drawings, a structural model was developed for its deck, which is a “grillage” or “full framed” deck type that is composed by discrete finite elements of frame re-bar or frame in SAP-2000 software. This model contains geometrical properties of aforementioned slab elements (See Figure 11), such as: structure beams, slabs, trusses and kerbs.

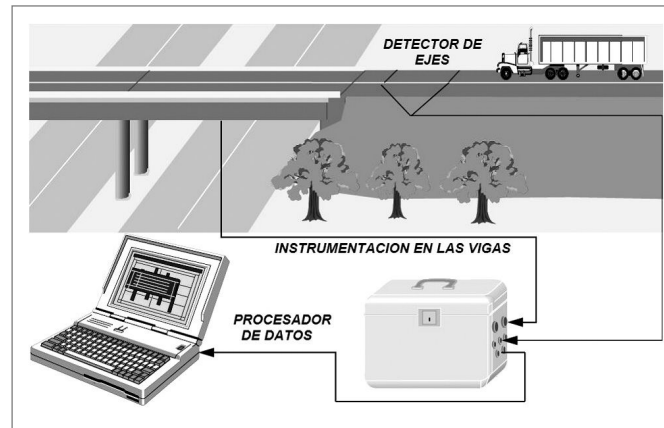


Figura 10. Esquema del sistema de pesaje en movimiento de puentes (Tomado de Znidaric, et al.)

Figure 10. Scheme of weigh-in motion system on bridges (reference from Znidaric, et.al)

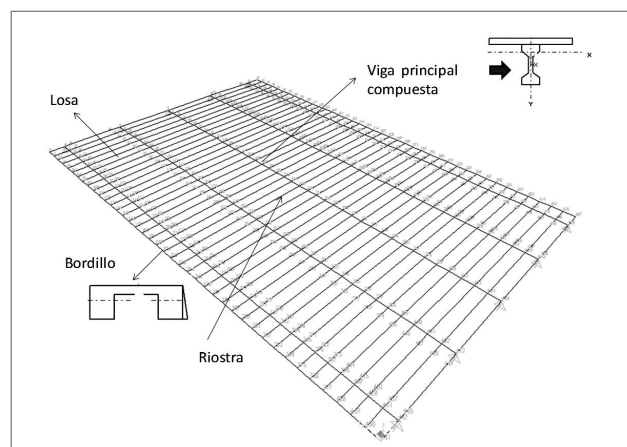


Figura 11. Modelo estructural del tablero del puente desarrollado en SAP-2000

Figure 11. Structural model for the bridge deck developed by SAP-2000

3.4.2 Calibración de modelo estructural

Para la calibración del modelo estructural del tablero de puente y su matriz de rigidez, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

3.4.2 Calibration of structural model

So as to calibrate the structural model of the bridge deck and its corresponding stiffness matrix, the following stages were carried out.

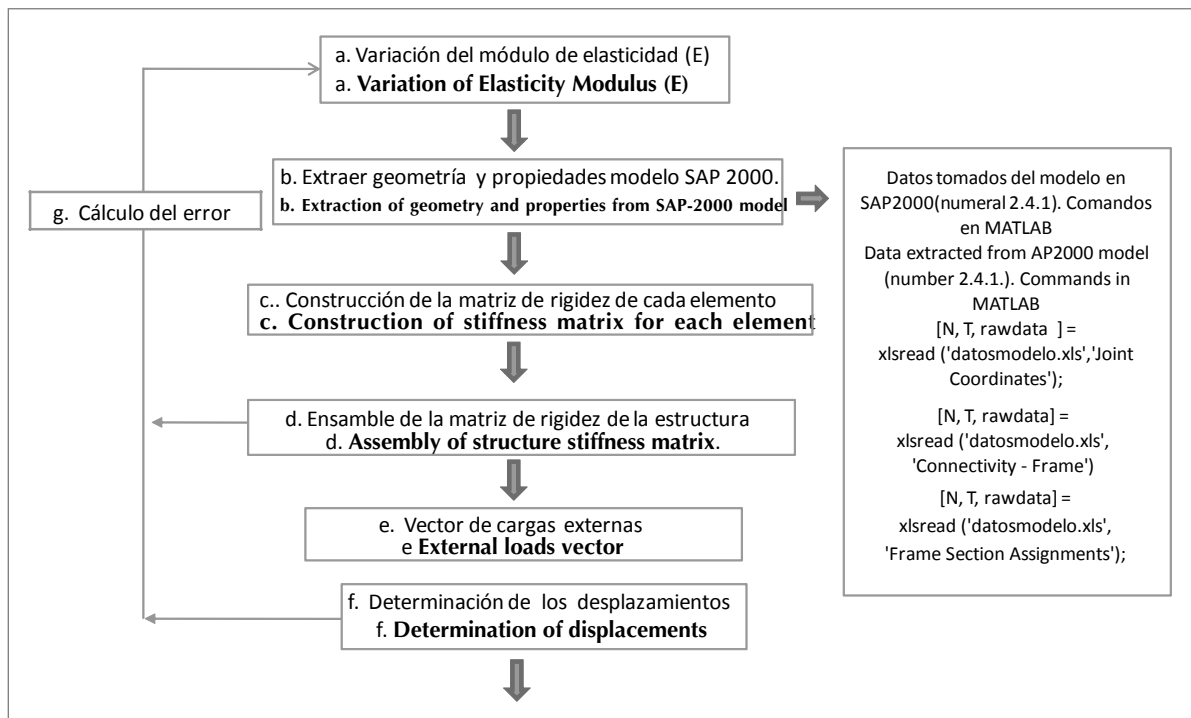


Figura 12. Procedimiento de calibración de modelo estructural de puente

Figure 12. Calibration process for the bridge structural model

- a) Variación del módulo de elasticidad: Se investigó el módulo de elasticidad del concreto del tablero del puente, mediante la extracción de cuatro (4) núcleos como se observa en la
- b) Figura 8 y Figura 13. Estos núcleos se ensayaron en la maquina universal del laboratorio de materiales del Departamento de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana, encontrándose que tienen un desviación estándar y un coeficiente de variación de 14143.8 Mpa. (141.438 Kg/cm²) y 39% respectivamente, es decir valores altos y que pueden tener origen en variaciones de la calidad del concreto durante los procesos constructivos del puente. Dicho módulo varía de 27.076 á 62.026 Mpa. (270.760 á 620.260 Kg/cm²) y una media de 35.636,5 Mpa. (356.365 Kg/cm²). Para el proceso de calibración del modelo estructural, se emplearon estas características estadísticas y variaciones.

- a) Variation of elasticity modulus: The elasticity modulus of concrete bridge deck was investigated by means of the extraction or four (4) cores as observed in
- b) Figure 8 and Figure 13. Such cores were tested by the universal machine at materials laboratory in the Civil Engineering Department of the Pontificia Universidad Javeriana, finding that they have a standard variation and variation coefficient of 14143.8 Mpa (141,438 Kg/cm²) and 39%, respectively. Those are quite high values that may be caused by concrete quality variations during the bridge constructive processes. Such modulus ranges from 27,076 to 62,026 Mpa (270,760 to 620,260 Kg/cm²) and have an average variation of 35,636.5 Mpa (356,365 Kg/cm²). For the calibration of structural model, such characteristic statistics and variations were used.

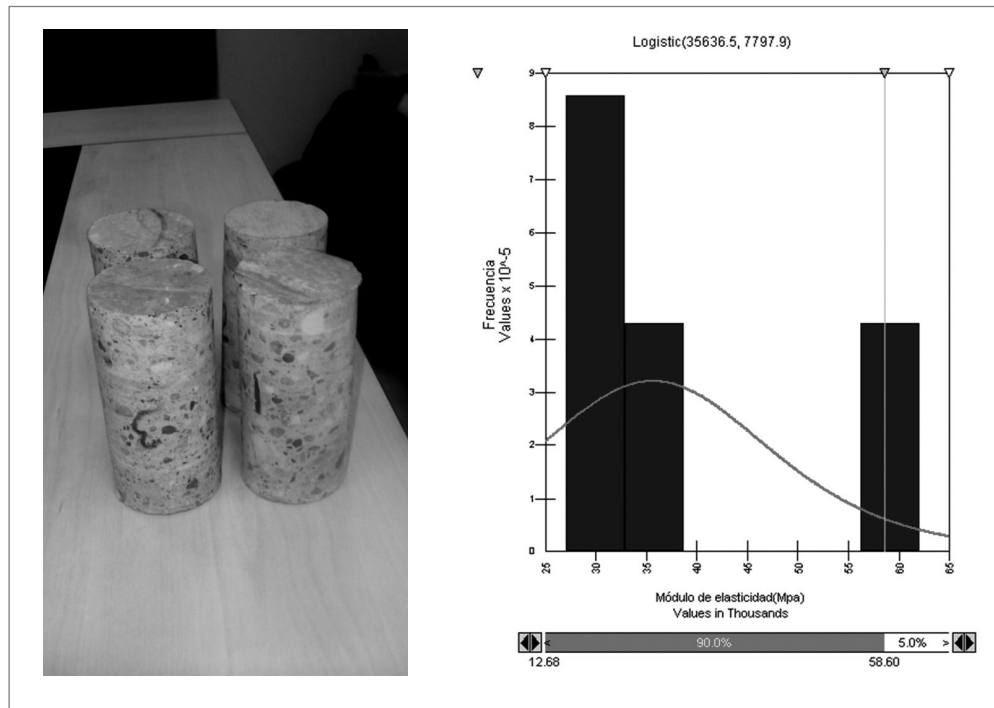


Figura 13. (a) Núcleos extraídos de la vigas del puente para la evaluación del modulo de elasticidad.
(b) Curva de probabilidad del módulo de elasticidad del concreto

Figura 13. (a) Cores extracted from deck beams for the evaluation of elasticity modulus.
(b) Probability curve for concrete elasticity modulus

c) Geometría y propiedades del modelo SAP-2000. El aplicativo computacional desarrollado en MATLAB se diseñó para extraer información del modelo estructural en SAP-2000 y poder trabajar en los procesos de calibración y desarrollo del algoritmo genético solamente en MATLAB (Ver Figura 14). La información obtenida corresponde a:

- Número de nudos y coordenadas en el espacio de los nudos (x, y, z).
- Número de elementos e incidencia de cada uno.
- Propiedades geométricas de cada elemento.
- Número e identificación de los grados de libertad y restringidos.

c) Geometry and properties of SAP-2000 model. The software application developed in MATLAB was designed to collect data on SAP-2000 structural model and being able to work on calibration processes and genetic algorithm only in the MATLAB application (Figure 14). The information collected is:

- Number of nudes and coordinates in nudes spaces (x, y, z)
- Number of elements and the incidence of each one of them
- Geometrical properties of each element
- Number and identification of degrees of freedom and restricted degrees.

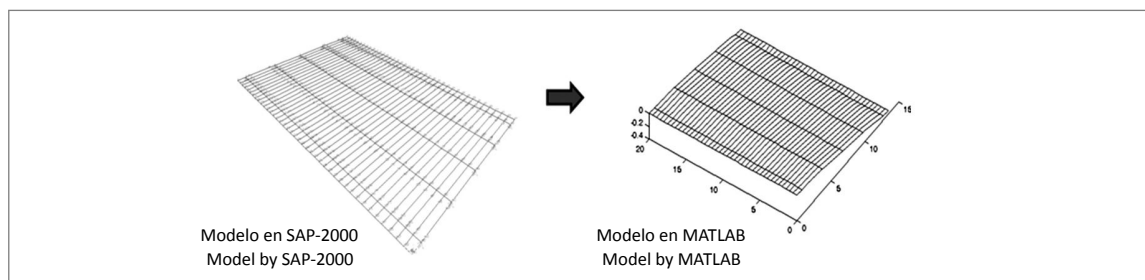


Figura 14. Transferencia de datos del modelo estructural en SAP-2000 al aplicativo computacional en MATLAB
Figure 14. Data-transfer from SAP-2000 structural model into MATLAB software application

e) **Ensamble de la matriz de rigidez de la estructura:** Basados en los aportes de rigidez de cada elemento se determina la matriz de rigidez de la estructura del modelo estructural a través de un proceso matemático de ensamblaje desarrollado en MATLAB.

e) **Assembly of structure stiffness matrix.** Based on stiffness results for each element, the structural model matrix is determined by means of an assembly mathematical process developed in MATLAB.

f) **Vector de cargas externas:** El sistema computacional tiene la capacidad de construir un vector con las cargas conocidas por eje de los camiones pesados (obtenidos de las pruebas de carga estáticas y dinámicas), teniendo en cuenta su localización y la correspondiente aplicación en los nudos considerando la geometría de los camiones (Ver Figura 15). Se diseñó esta subrutina para tener la capacidad de generar un vector de trenes de carga dinámica o en movimiento que transiten por una calzada o por las dos (2) calzadas.

f) **External loads vector:** The software is able to build up a vector from available loads per axle on heavy trucks (obtained from static and dynamic load tests), taking into account location and the corresponding application of nodes, by considering trucks geometry (See Figure 15). This sub-routine was designed so as to generate a vector for dynamic load or moving load travelling on a carriage way or (2) double carriage way.

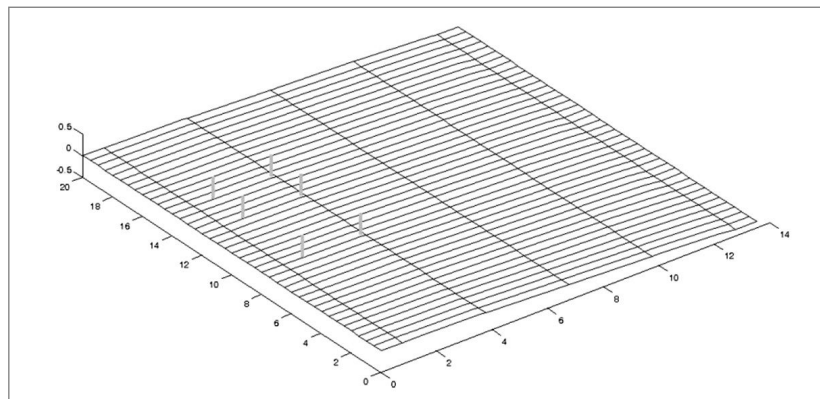


Figura 15. Aplicativo computacional en MATLAB de modelo estructural con una hipótesis de carga, cuyos datos se construyen en un vector

Figure 15. MATLAB application software for the structural model with a hypothetical load, which data turn into a vector

g) **Determinación de los desplazamientos:** Empleando el método de análisis matricial se encontraron estos valores para cada prueba de carga estática, y dentro del proceso de calibración los desplazamientos teóricos verticales en la mitad de las vigas V1, V2, V3 y V4.

g) **Determination of displacements:** By employing the method of matrix analysis, values were achieved for each static load test and from calibration process theoretical vertical displacements at mid-beams V1, V2, V3 and V4 were achieved.

h) **Calculo del error de calibración:** Se determinan los errores basados en la comparación entre los resultados de los desplazamientos en las vigas V1,V2,V3 y V4 experimental y teórica, como se expresa a continuación:

h) **Calibration of error calculation:** Determination of errors based on the comparison results between beams displacements V1, V2, V3 and V4, both experimental and theoretical, as expressed below:

$$ERRORV_i = \frac{ABS(dVit - dVite)}{dVite} * 100$$

$dVit$: Desplazamiento/displacement _teorico/theoretical _viga/beam _i
 $dVite$: Desplazamiento/displacement _experimental _viga/beam _i
 $ERRORV_i$: Error _de _viga/beam _i

(5)

El error acumulado promedio, teniendo en cuenta la combinación del error individual en cada viga se determinó como:

$$ERRORAPV_i = \frac{\sum ERRORV_i}{N}$$

ERRORV_i : Error _en/in_ cada/each_Viga/beam
N : Número _de_ errores _en_ vigas _tenidos_ en _cuenta/Number of beams errors accounted

En el proceso anterior se obtuvieron diferentes alternativas analíticas de solución, lo que permitió seleccionar la que tiene el menor error y la de mayor confiabilidad al comportamiento real del puente. Se procedió a seleccionar una de las pruebas estáticas realizadas en campo, que consistió en colocar en uno de los carriles del puente, un camión C3 (suministrado por la concesión), del cual conocíamos previamente su geometría y las cargas por eje. Este camión produjo desplazamientos verticales obtenidos registrados por los equipos de monitoreo cuya localización y magnitud se observa en la Figura 16.

The average cumulative error, taking into account the combination of individual error in each beam, was determined as follows:

From above process different analytical solution alternatives were obtained, which allowed the selection of the lowest error and most reliable alternative for the bridge real behavior. One in-situ static test was developed by placing a C3 truck (supplied by the concessionaire) on a bridge lane, which geometry and loads per axle were previously known. This truck produced vertical displacements recorded by monitoring equipment, which location and magnitude is observed in Figure 16.

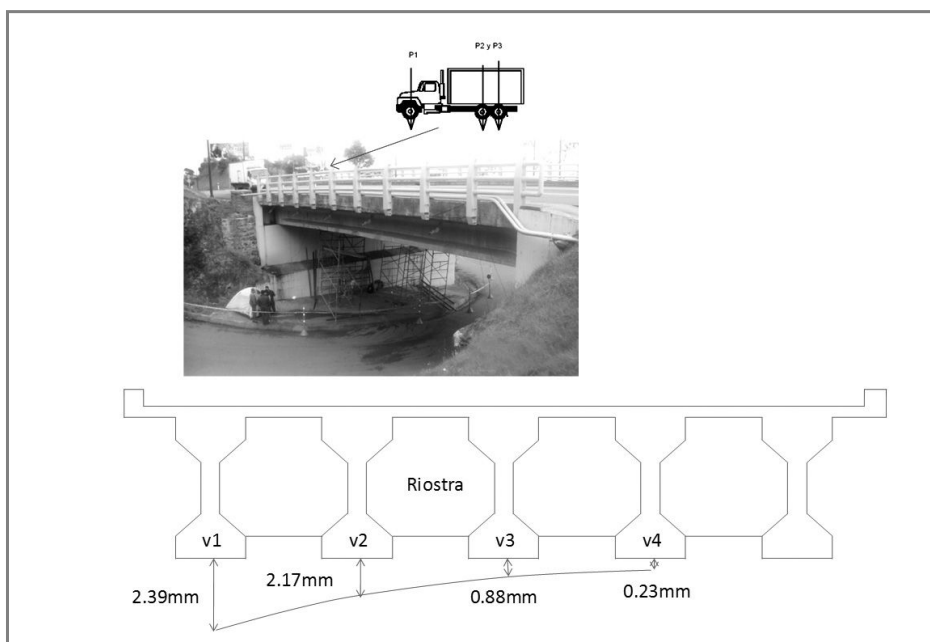


Figura 16. Prueba estática del camión C3 sobre un carril del puente Villavicencio-Bogotá, previamente pesado. Deformaciones registradas en la instrumentación

Figura 16. Static test on C3 truck placed on a Villavicencio-Bogota Bridge lane, previously weighed. Deformations recorded by instruments

Basados en esta prueba estática y empleando las etapas que se mencionaron anteriormente(Ver Figura 12), se encontraron los siguientes resultados para cada una de las pruebas llevadas a cabo:

Based on the static test and by using the information from abovementioned stages (See Figure 12), the following results were obtained for each test:

Número de prueba Number of Tests	Módulo de elasticidad (ton/mm2) Elasticity Modulus	Error acumulado promedio(%) average cumulative error	Comentario/Commentary
1	4.36	8.355	Rigidez de las vigas 2,3 y 4 sin aumentar. Considerando los errores de las vigas V1, V2, V3 y V4 Beams stiffness 2, 3, and 4, without increases. Considering beams errors V1, V2; V3 and V4
2	4.36	7.3525	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m4. Considerando los errores de las vigas V1, V2, V3 y V4 Decrease of beams stiffness 2, 3 and 4 in 5% up to 0.1507 m4. Considering beam errors V1, V2; V3 and V4
3	4.4	6.83	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m4. Variación del módulo de elasticidad hasta detectar E=4.4 Ton/mm2-Considerando los errores de las vigas V1, V2, V3 y V4 Decrease of beams stiffness 2, 3 and 4 in 5% up to 0.15704 m4. Variation of elasticity modulus until detecting E=4.4 Ton/mm2. Considering beams errors V1, V2; V3 and V4.
4	4.4	8.145	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m4, aumento de la rigidez de las vigas 1 y 4 hasta 0.1613 m4. Considerando los errores de las vigas V1, V2, V3 y V4 Decrease of beams stiffness 2, 3 and 4 in 5% up to 0.15704 m4. Increase of beams stiffness 1 and 4 up to 0.1613 m4. Considering beams errors V1, V2; V3 and V4.
5	4.4	4.65	Desplazando las cargas del camión C310cm más cerca de la viga V2, comparando con las anteriores pruebas. Inercia de las vigas V2, V3 y V4 de 0.1586 m4 y módulo de elasticidad de 4.4 Ton/mm2 Displacement of loads on C3 truck, 10 cm close to beam V2 in comparison to previous tests. Beams inertia V2, V3 and V4 of 0.1586 m4 and elasticity modulus of 4.4 Ton/mm2.

Nota: En la prueba 3, los errores de cada viga fueon 1.2%, 14.24% y 0.12% respectivamente.
Note: Test Nr. 3 delivered beams errors of 1.2%, 14.24%, 11.74 and 0.12%, respectively)

Figura 17. Tipos de pruebas de calibración realizadas
Figure 17. Type of developed calibration tests

Después del análisis de las diferentes pruebas, se encontró que la 5 es la más cercana al comportamiento real del puente, con la cual se obtuvo una matriz de rigidez calibrada de 2676x2676 que tiene un módulo de elasticidad de 44.000 Mpa (440.000 Kg/cm2) y que fue la que se utilizó para el desarrollo del algoritmo genético (Ver Figura 18).

After completing the analysis on different tests, it was concluded that test number 5 is the closest to the bridge real behavior, which delivered a calibrated stiffness matrix of 2676x2676 having an elasticity modulus of 44.000 Mpa (440.000 Kg/cm2), which was used to develop a genetic algorithm (See Figure 18).

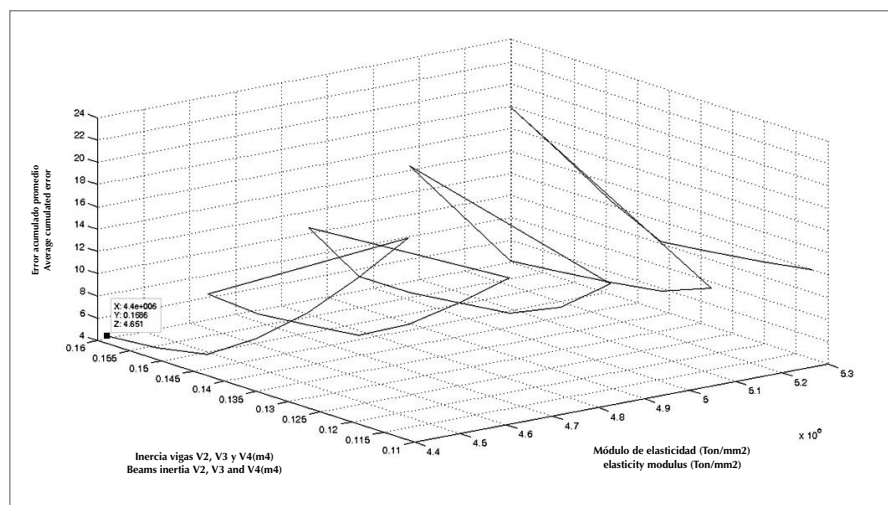


Figura 18. Resultados de la prueba de calibración número 5
Figure 18. Results from calibration test number 5

3.4.3 Fundamentos y validación del algoritmo genético

Utilizando los resultados anteriores se implementó el algoritmo genético, con el cual se puede estimar las cargas por eje de los camiones que circulan por el puente, empleando el siguiente procedimiento:

3.4.3 Fundamentals and validation of genetic algorithm

By using above mentioned results a genetic algorithm was implemented, which enables the estimation of loads per axle travelling on the bridge by employing the following procedure:

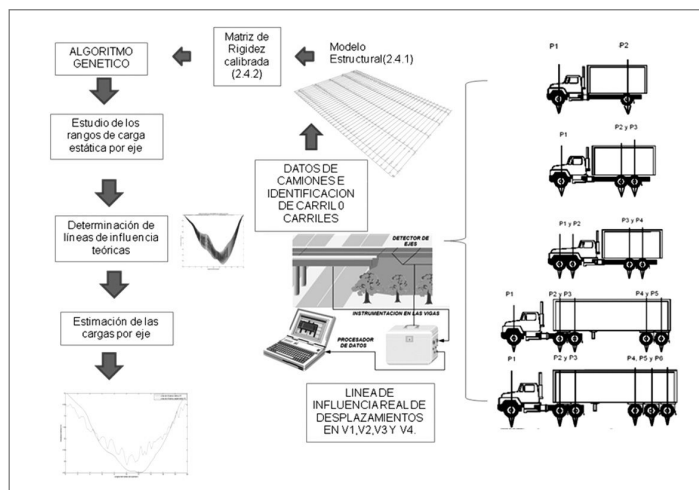


Figura 19. Procedimiento para la determinación de las cargas por eje y total de los camiones que circulan por el puente
 Figura 19. Procedure for the determination load per axle and total loads of trucks travelling on the bridge

a) Estudio de los rangos de carga estática por eje. La Concesión unos proporcionó el registro de los pesajes de los camiones que circularon las fechas en que el puente de este estudio estuvo instrumentado. Esta información sirvió para realizar un análisis de las características estadísticas de cada uno de los ejes de los diferentes camiones, con lo cual se determinaron los rangos de cargas que se incluyeron para el diseño del algoritmo (Ver Tabla 1).

a) Ranges study on static load per axle. The Concessionaire provided a weight record of trucks that travelled on the bridge on the dates the bridge was instrumented. The information enabled an analysis of statistical characteristics for each axle on different trucks, thus determining load ranges to be included in the algorithm design (See Table 1).

Tabla 1. Variación de los pesos por eje de diferentes tipos de camiones
 Table 1. Variation of weights per axle in different trucks types

Tipo de camiones Trucks Type	Eje 1/Axle 1					Eje 2/Axle 2					Eje 3/Axle 3					Eje 4/Axle 4				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
C2	3,878	12,6	1,1	1,1	29%	8,976	20,5	1,1	3,32	37%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
C3	5,526	23,6	1,1	1,4	26%	18,25	25,5	1,3	6,09	33%	18,25	25,5	1,32	6,09	33%	NA	NA	NA	NA	NA
C4	11,51	17,1	4,2	4,5	39%	11,51	17,1	4,2	4,5	39%	18,179	25,4	4,52	7,4	41%	18,18	25,4	4,52	7,4	41%
C3-S2	5,386	30,7	1,6	2,6	49%	11,72	34,3	1,6	5,89	50%	11,721	34,3	5,89	5,89	50%	11,13	20	1,02	6,6	59%
C3-S3	5,6	37,7	1,6	3,1	55%	17,9	39,6	1,0	5,73	32%	17,854	39,6	5,73	5,73	32%	20,8	42,3	1,4	6,7	32%

Tipo de camiones Trucks Type	Eje 5 /Axle 5					Eje 6/Axle 6					Peso total/Total weight				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
C2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	12,854	23,9	4,34	3,65	28%
C3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	23,769	29,2	8,07	6,35	27%
C4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	29,689	36,2	12,9	9,62	32%
C3-S2	11,13	20	1	6,6	0,59	11,13	20	1	6,61	0,59	28,233	48,9	12	12,4	44%
C3-S3	20,82	42,3	1,4	6,7	32%	20,82	42,3	1,4	6,71	32%	44,294	54,6	11,5	12,4	28%

(a)	Promedio Average
(b)	Máximo Maximum
(c)	Mínimo Minimum
(d)	Desviación estandar Standard variation
(e)	Coefficiente de variación Variation coefficient)



b) **Determinación de líneas de influencia teóricas:** Se desarrolló en MATLAB un aplicativo computacional que permiten determinar las líneas de influencia del desplazamiento vertical en el centro de la luz de las vigas V1, V2, V3 y V4 que producen el paso de un camión en cualquier carril. En otras palabras, el aplicativo se encarga de simular el paso de cualquier tipo de camión variando la magnitud de las cargas por eje a través de un proceso interactivo. Uno de los casos utilizados para el desarrollo y la validación de este algoritmo fue el paso de un camión C3-S3 del cual se consultó su geometría, peso por ejes y el peso total. La separación entre ejes y su velocidad se obtuvo a través del equipo de medición de tráfico explicado en el numeral 2.3.1. En la Figura 24 se presenta algunas de las posiciones de carga de este camión en el modelo estructural calibrado y en la Figura 25 diferentes líneas de influencia de las cuatro (4) vigas, producto de 6424 simulaciones en el aplicativo computacional en MATLAB, donde se varió la magnitud de las cargas de los seis (6) ejes del camión.

c) **Estimación de las cargas por eje:** A través de un proceso de convergencia dentro del algoritmo genético basado en un proceso de comparación de las diferentes líneas de influencia teóricas con respecto a la línea de influencia experimental del desplazamiento (en el centro de las cuatro vigas obtenidas mediante instrumentación), se estimaron las magnitudes de las cargas (por eje) de cada camión que circula por el puente.

Para ello se presenta a continuación las líneas de influencia experimental de las cuatro vigas instrumentadas producto del paso por el puente del camión C3-S3 que se mencionó en el literal anterior.

b) **Determination of theoretical lines of influence.** A software application developed in MATLAB enables the determination of influence lines on vertical displacement at the mid-span on beams V1, V2, V3 and V4 provoked by a truck travelling on any lane. In other words, the application is able to simulate the passing of any truck type by varying the magnitude of loads per axle by means on an interactive process. A simulation used for the execution and validation of this algorithm was the passing of a C3-S3 truck, which geometry, weight per axle and total weight were consulted. The space between axles and speed were obtained by means of a traffic measurement device explained in number 2.3.1. Figure 20 shows some locations of load positions of this truck in the calibrated structural model and, Figure 21 shows different influence lines for four (4) beams resulting from 6424 simulations executed by the MATLAB software application, where load magnitude was modified for the six (6) truck axles.

c) **Calculation of loads per axle:** By means of a convergence process in the genetic algorithm, which is based on a comparison process among different theoretical lines of influence regarding to displacement experimental line of influence (at mid-span of the four implemented beams), loads magnitudes (per axle) were calculated on each truck travelling on the bridge.

For such purpose, the experimental lines of influence of four implemented beams, resulting from C3-S3 truck passing along the bridge (as above mentioned), are presented below.

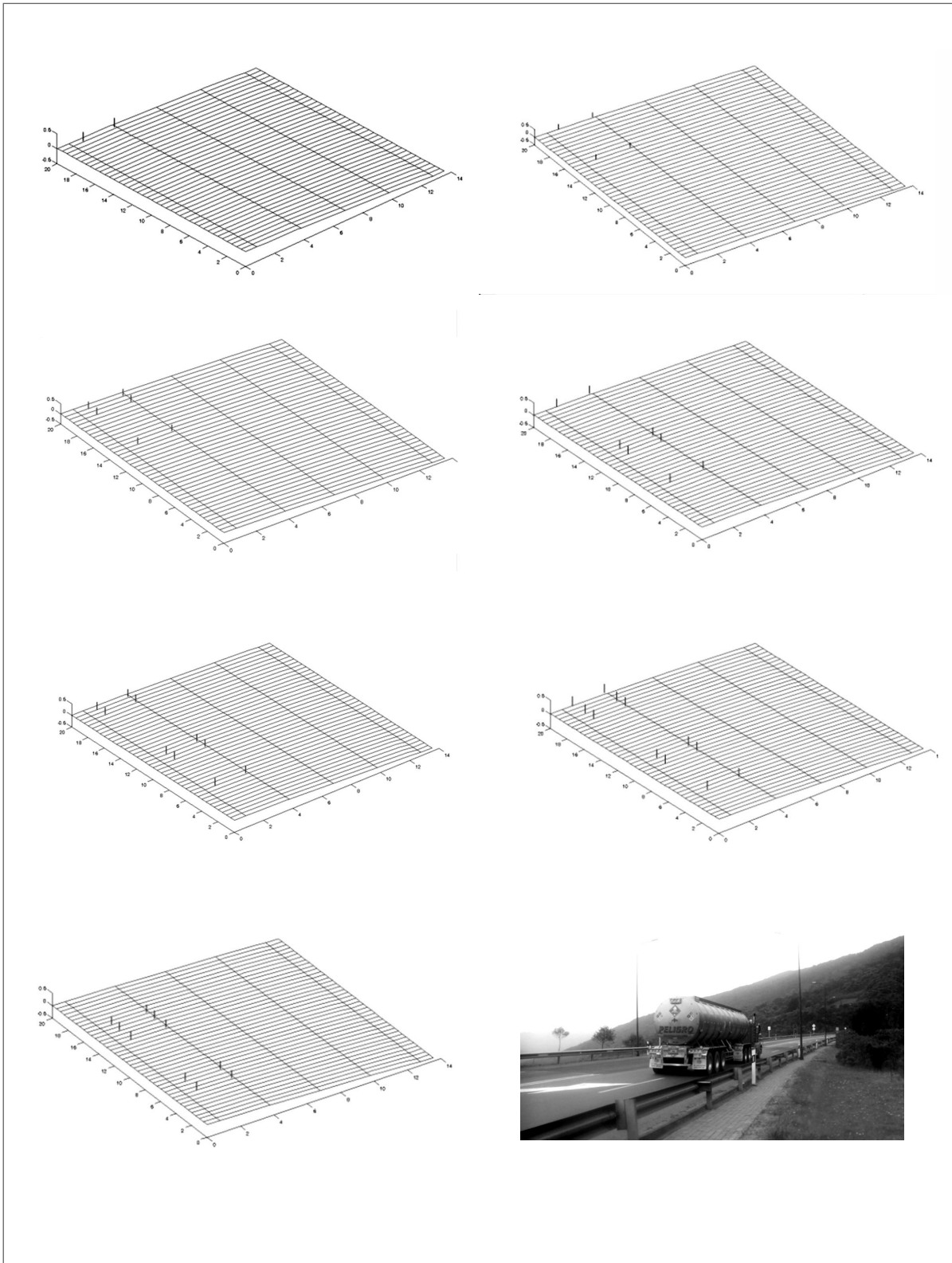


Figura 20. Algunas posiciones de carga generadas por el camión C3-S3 cuando circula por el carril de la vía Villavicencio-Bogotá para su simulación en el modelo estructural calibrado en MATLAB. Registra datos desde que el camión entra hasta que sale del puente

Figure 20. Some load positions generated by C3-S3 trucks when travelling on Villavicencio-Bogota lane for its simulation in calibrated structural model by MATLAB. It registers data from the moment the truck enters the bridge until leaving the bridge

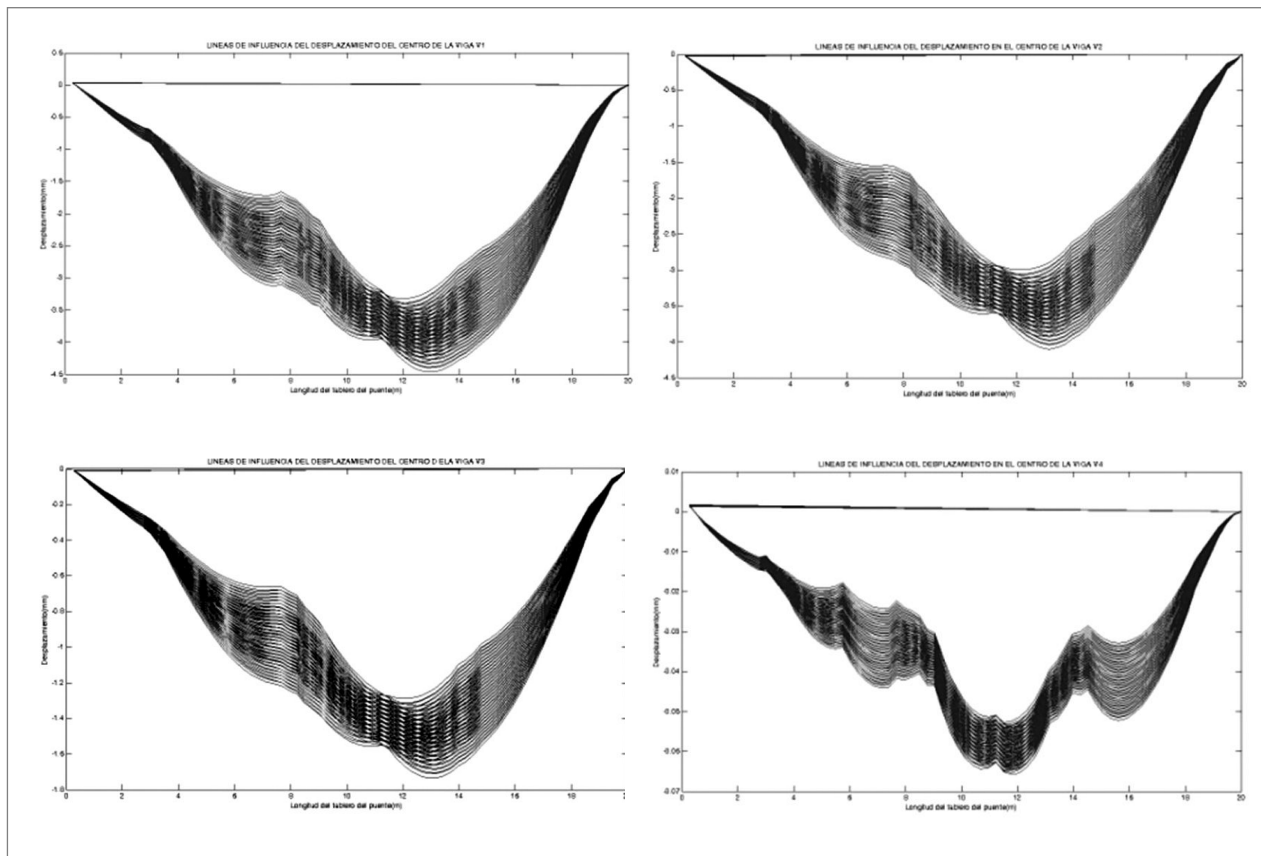


Figura 21. Líneas de influencia TEORICA del desplazamiento en el centro de la luz del puente en las vigas V1, V2, V3 y V4
 Figure 21. THEORETICAL Lines of influence for displacement at the mid span of bridge beams V1, V2, V3 and V4

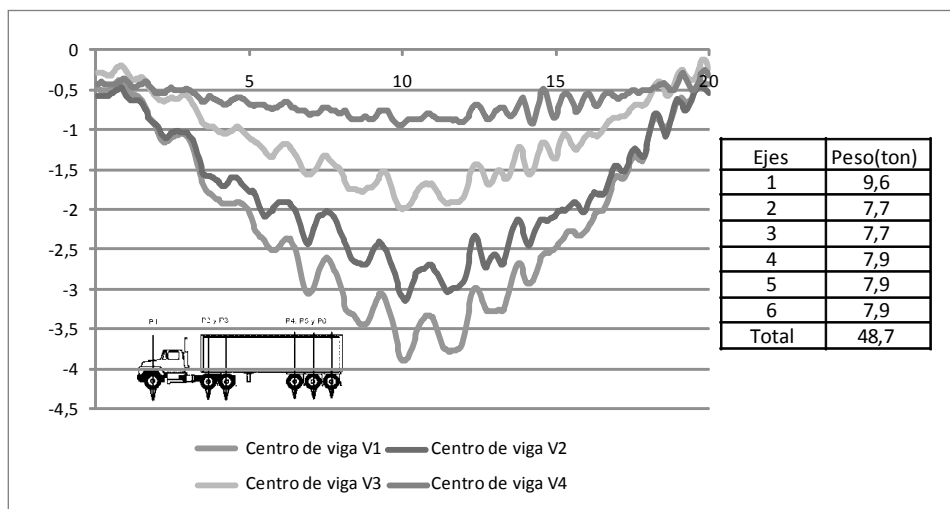


Figura 22. Líneas de influencia EXPERIMENTAL del desplazamiento en el centro de la luz del puente en el centro de las vigas V1, V2, V3 y V4. Peso estático del camión de prueba
 Figure 22. EXPERIMENTAL lines of influence for displacement at the mid span of bridge beams V1, V2, V3 and V4. Static weight of tested truck

Con esta información de campo se diseñó una primera etapa del algoritmo que consiste en estimar la carga total del camión considerando que los pesos por eje son iguales y crecen hasta converger y encontrar el mínimo error acumulado promedio, como se observa en la figura siguiente.

Empleando técnicas de optimización y considerando que trabajan sobre una población de soluciones y no con una sola como hacen los procedimientos tradicionales, se diseñó la segunda parte del algoritmo donde las variables son el peso de cada eje del camión. Para el caso del camión C3-S3 se tuvo en el proceso matemático seis (6) variables y se hicieron diferentes pruebas de calibración, con variaciones del impacto entre 10% a 30%, encontrándose que para el valor del 22% se obtiene la mejor solución al problema basado en un proceso de convergencia, con él que se obtuvo el mínimo error acumulado, cuyo proceso se explica en la Figura 24.

En la Figura siguiente se presenta las líneas de influencia teóricas comparadas con la experimental, donde se observa el nivel de convergencia y por lo tanto la confiabilidad en los resultados que se lograron a través del algoritmo genético desarrollado. Se obtuvo un impacto del 22% que es muy cercano al que recomienda el CCDSP y una distribución de la magnitud de los ejes con errores que varían entre el 1 a 7 % como se observa en la Tabla 2.

From such in-situ information, the first algorithm stage was developed which consisted in calculating the truck total load, considering that weights by axle are equal and, they increase until converging and achieving the average minimum cumulated error, as observed in the following figure:

By employing optimization techniques and considering they work on a solution population, not on a single one only as done by traditional procedures, the second stage of the algorithm was designed, which variables are the weights per each truck axles. In the case of C3-S3 truck, the mathematical process considered six (6) variables and, different calibration tests were carried out, including impact variations between 10% and 30%, thus concluding that with 22% the best solution is achieved based on a convergence process, delivering the minimum cumulated error, which process is explained in Figure 24. Figure 24. Process for final calculation of load per axle on C3-S3 truck.

The following figure presents theoretical lines of influence compared to experimental ones, showing the convergence level and, therefore, the reliability of results achieved from genetic algorithms. An impact of 22% was obtained which is quite close to the one recommended by CCDSP and also the magnitude distribution of axles with errors ranging from 1% until 7%, as observed in Table 2.

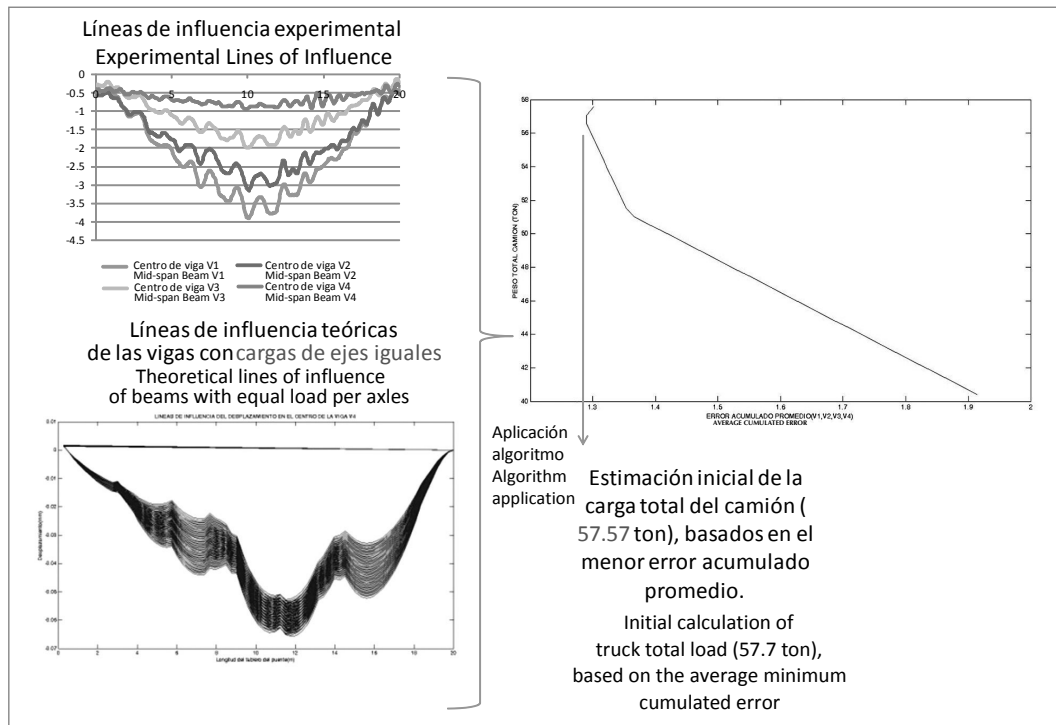


Figura 23. Proceso para la estimación inicial de la carga total del camión
Figure 23. Process for the initial calculation of truck total load

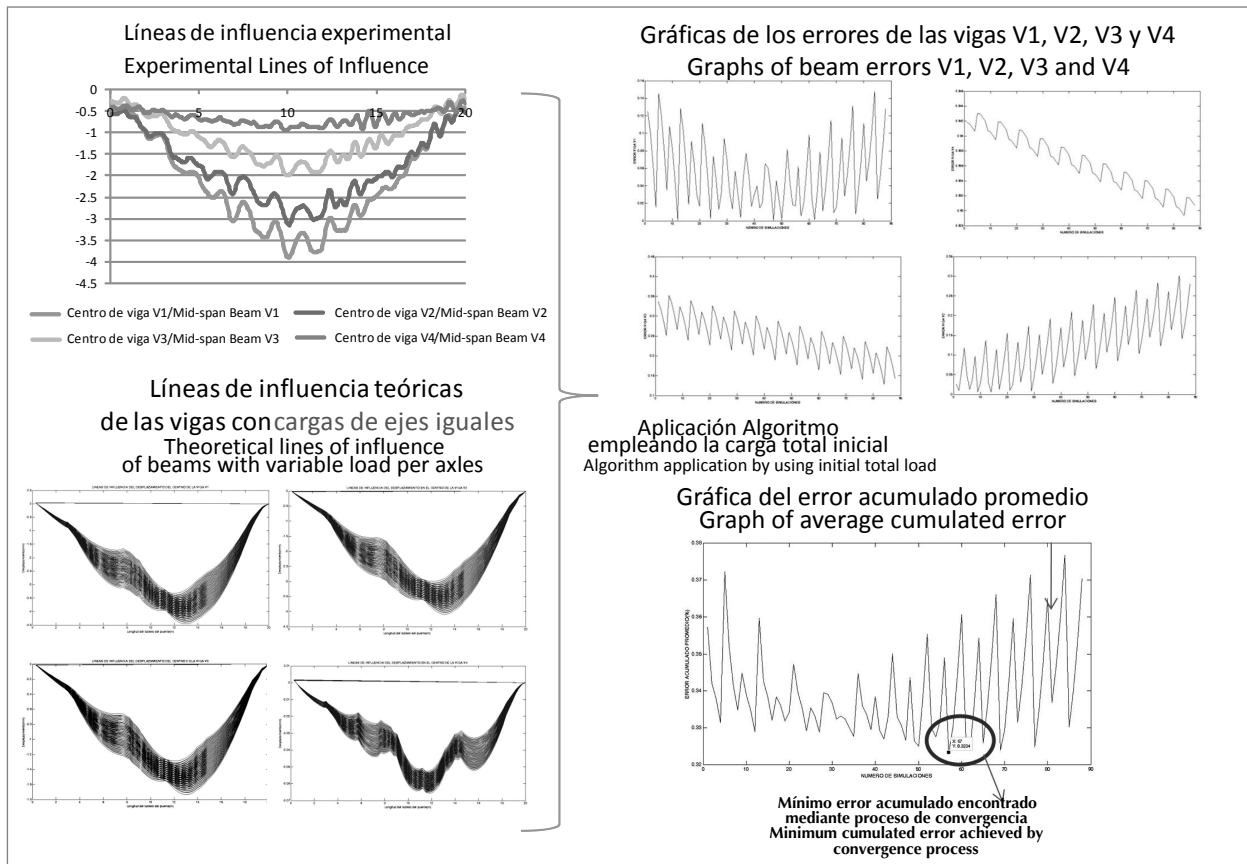


Figura 24. Proceso para la estimación final de la carga por eje del camión C3-S3
Figure 24. Process for the final calculation of truck per axles load C3-S3

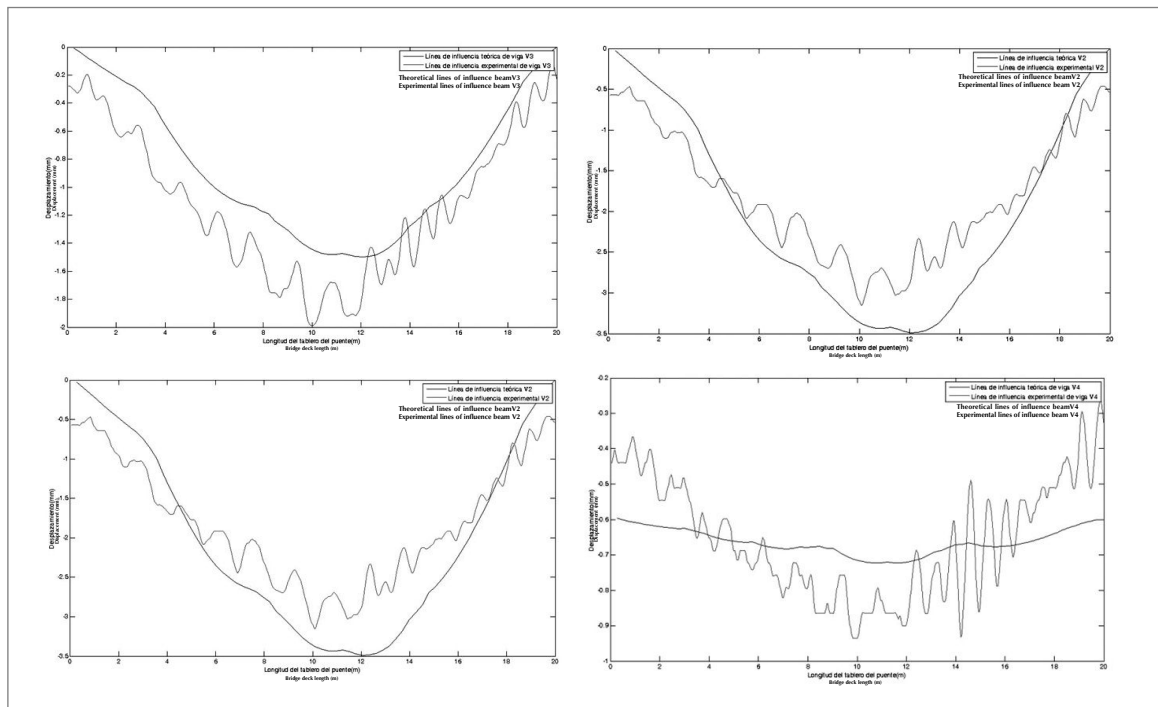


Figura 25. Líneas de influencia teóricas más cercanas a las líneas de influencia experimental
Figure 25. Theoretical lines of influence closest to experimental lines of influence

Se utilizó el mismo procedimiento explicado anteriormente para incluir dentro del algoritmo la evaluación de las cargas totales y por eje de los camiones C4 y C3. Estos se lograron gracias a que la concesión nos suministró camiones C4 y C3, del cual conocimos su geometría y peso. En la figura siguiente se presentan los resultados para los dos (2) camiones, incluyendo la magnitud de las cargas de los ejes determinados.

The same above mentioned procedure was used to include in the algorithm the calculation of total loads and loads per axle for C4 and C3 trucks. The concessionaire supplied trucks C4 and C3, which geometry and weight were previously known. The following figure shows the results for both (2) trucks, including load magnitudes per determined axles.

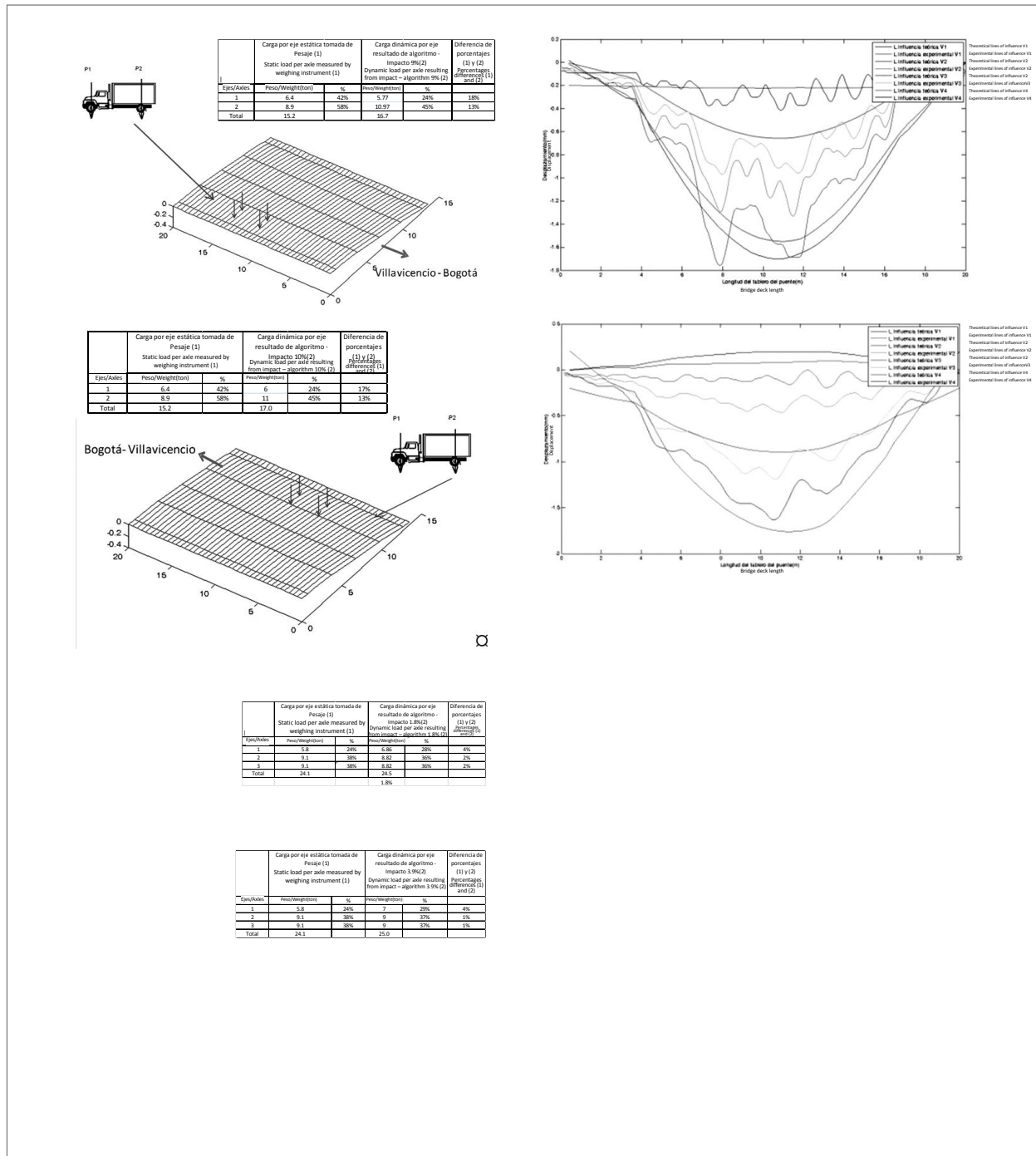


Figura 26. Líneas de influencia teóricas más cercanas a las líneas de influencia experimental de los camiones C3 y C4 en cada dirección
 Figure 26. Theoretical lines of influence closest to experimental lines of influence on C3 and C4, for both carriage ways



4. Analisis de resultados

El algoritmo genético, que se implementó mediante esta prueba piloto, tiene la capacidad de estimar las cargas dinámicas por eje y totales de los diferentes tipos de camiones que circulan por el puente instrumentado. Sin embargo, estima las cargas de dichos camiones cuando hay uno por carril, es decir cuando no hay presencia múltiple simultánea de cargas en el puente. Este se diseñó para que en trabajos futuros pueda ser adaptado, de tal forma que permita detectar las cargas múltiples simultáneas en un carril o en los dos (2) carriles actuando en el puente.

En la Figura 27 se presentan los resultados del paso de diferentes camiones C3-S3 por el carril Villavicencio – Bogotá. En dicha figura se observa, que a través del algoritmo se puede determinar la relación que existe entre diferentes variables, tales como: peso total de los camiones, desplazamiento promedio del tablero y la velocidad de los camiones. Con esta información fue posible determinar una ecuación potencial que permite conocer el peso total de los camiones C3-S3 (que circulan por uno de los carriles) con relación al desplazamiento promedio del tablero (Ver Figura 30(b)), lo cual es una simplificación con una confiabilidad adecuada, producto de un proceso matemático amplio que incluyó la calibración del modelo estructural, la matriz de rigidez y el algoritmo genético. Así mismo, en la Figura 30(c) se presentan la variación de las cargas por eje de los camiones en función de la velocidad. Con esta relación se pueden comparar las cargas por eje en movimiento con respecto a los límites establecidos, lo que se constituye en una herramienta de control de peso preliminar, muy útil para la concesión, si se decidirá implementar este sistema permanentemente. Mediante este mecanismo se puede reportar o identificar los camiones cuyo peso debe ser verificado en una estación de pesaje fija y hacer un control más óptimo.

4. Analysis results

The genetic algorithm implemented by this pilot test is capable of calculating dynamic loads per axle and total loads for different trucks travelling on the instrumented bridge. However, it calculates trucks loads only when there is one single truck travelling on the lane, i.e., when there is no multiple simultaneous presence of loads on the bridge. It was designed to be adapted for future research jobs, so that it will be able to detect simultaneous and multiple loads moving on one lane or two (2) lanes of the bridge.

Figure 27 presents the results of different C3-S3 trucks travelling on Villavicencio – Bogota lane. Such figure shows that, by means of an algorithm, the relation existing among different variables can be determined, such as: trucks total weight, average deck displacement and trucks speed. From such information it was possible to calculate a potential equation that provides the total weight of C3-S3 trucks (travelling on one lane) in relation to the average deck displacement (See Figure 30 (b)), which is a simplification with adequate reliability resulting from a wide mathematical process that included the structural model calibration, the stiffness matrix and genetic algorithm. Besides, figure 30(c) presents the variations of moving trucks loads per axle in relation to their speed. This relation allows the comparison of moving loads per axle regarding established limits, which is a preliminary weighing control tool quite useful for the concessionaire so as to decide the implementation of this system on a permanent basis. By means of this mechanism it is possible to report or identify the weight of a truck, which shall be checked by a weighing toll gate thus conducting a most adequate control.

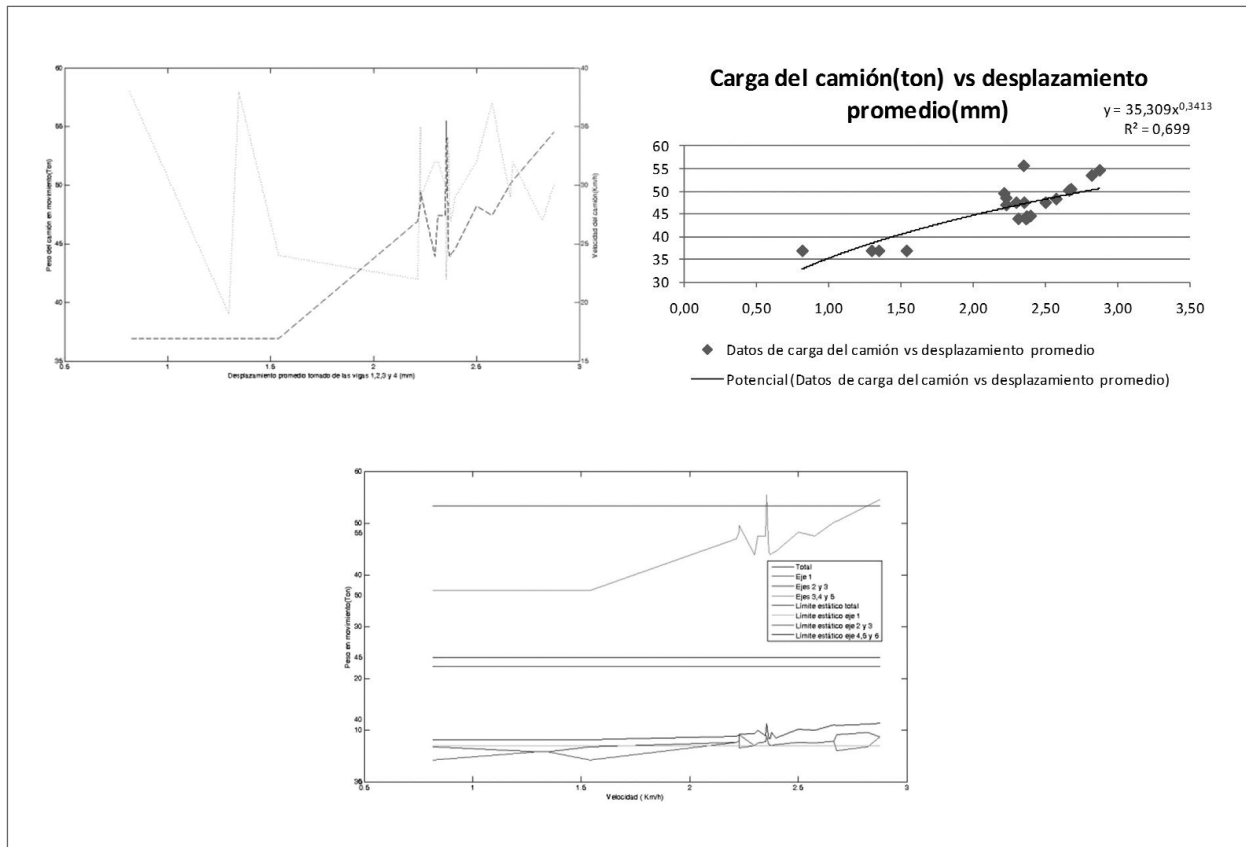


Figura 27. (a) Peso total en movimiento vs Desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2,V3 y V4) Velocidad de los camiones vs Desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2,V3 y V4). (b) Determinación de la función de tendencia que relaciona los desplazamientos de las vigas con la carga total del camión. (c) Parte de Líneas de influencia teóricas más cercanas a las líneas de influencia experimental de los camiones C3 y C4 en cada dirección.

Figura 27. (a) Total moving weight v/s Average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4). Trucks speed v/s Average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4). (b) Calculation of trend relating beams displacements with truck total load. (c) Some theoretical lines of influence closest to experimental influence lines of trucks C3 and C4 in both carriage directions

En las siguientes figuras se presentan el peso total en movimiento de los camiones C3-S3 durante 24 horas (día y noche) incluyendo el desplazamiento promedio del tablero. A través de estas gráficas se puede identificar, como se observa en la Figura 36:

- Horas en las cuales hay mayor frecuencia de este tipo de camiones.
- Promedio de los pesos en movimiento.
- Horas donde se producen los pesos máximos y mínimos
- Entre otros.

The following figures present the total moving weight of trucks C3-S3 during 24 hours (day and night time) including the average deck displacement. By means of the following graphs the following facts can be identified, as observed in Figure 32:

- Highest frequency time for this type of trucks
- Moving loads average
- Time of maximum and minimum loads
- Among others

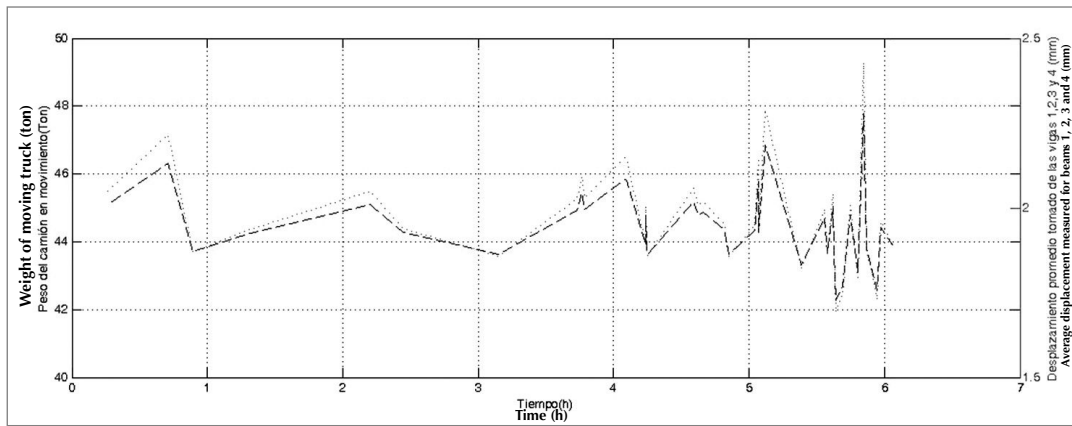


Figura 28. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1,V2,V3 y V4) desde las 0 a 6 horas.
 Número de camiones C3-S3 detectados: 40

Figure 28. Total moving weight and average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4), from 0 to 6 hours.
 Number of CS-S3 trucks detected: 40

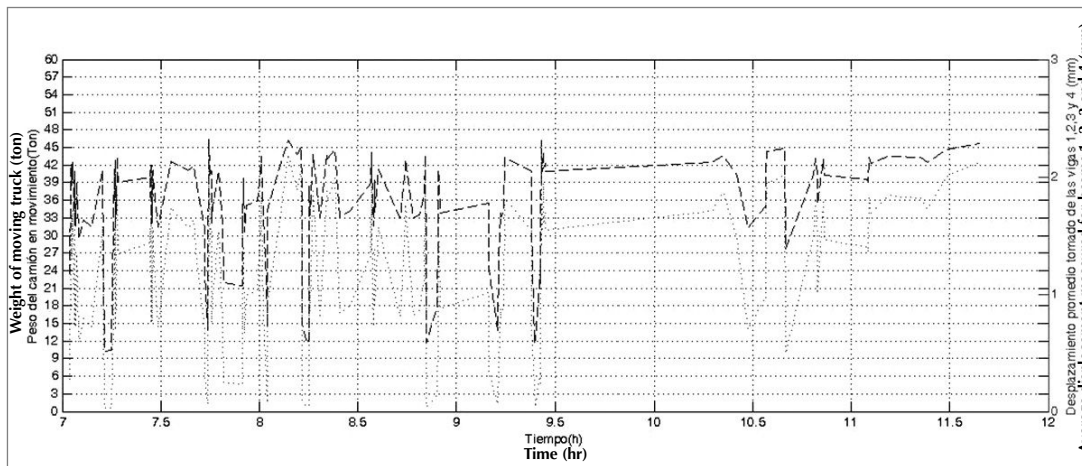


Figura 29. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las 6 a 12 horas. Número de camiones C3-S3 detectados: 176

Figure 29. Total moving weight and average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4), from 6 to 12 hours. Number of C3-S3 trucks detected: 176.

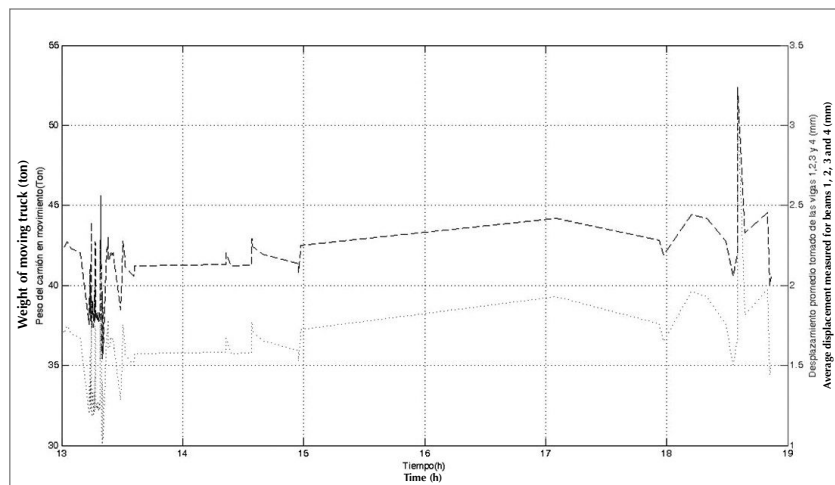


Figura 30. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las 12 hrs. a 18 horas. Número de camiones C3-S3 detectados: 154

Figure 30. Total moving weight and average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4), from 12 to 18 hours.
 Number of C3-S3 trucks detected: 154

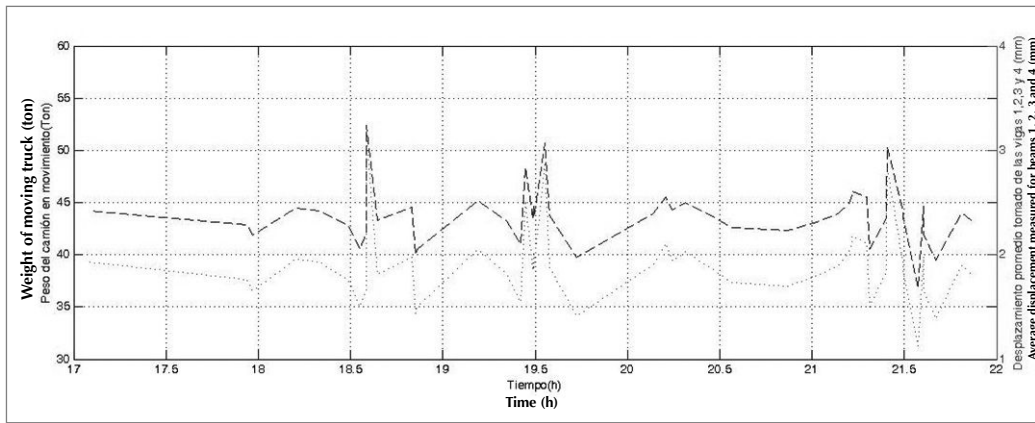


Figura 31. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las 18 a 24 horas. Número de camiones C3-S3 detectados: 152
 Figure 31. Total moving weight and average displacement of bridge beams (V1, V2, V3 and V4), from 18 to 24 hours. Number of C3-S3 trucks detected: 152

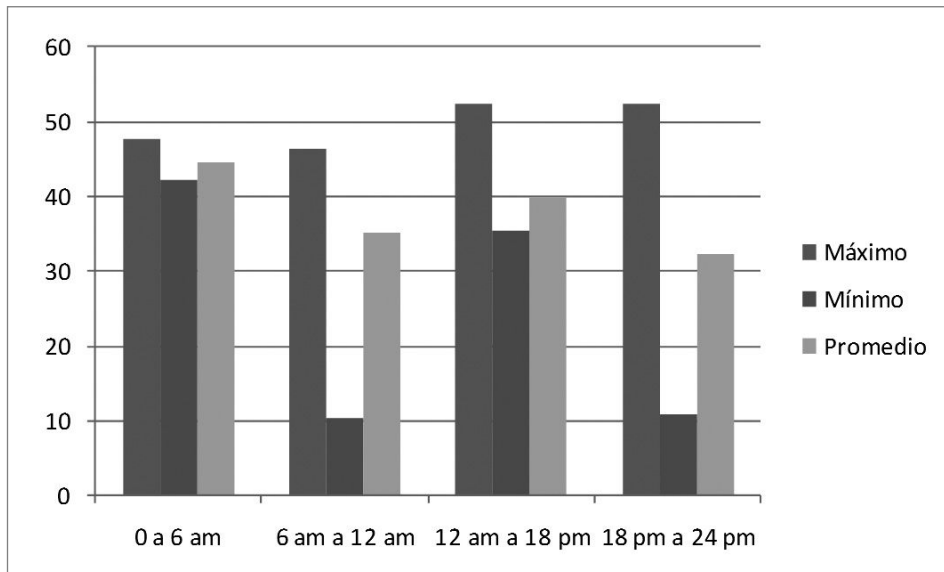


Figura 32. Resumen de la carga y los desplazamientos del tablero en 24 horas de camiones C3-S3 cuando circulan por el carril Villavicencio-Bogotá
 Figure 32. Summary of deck loads and displacements during 24 hours for C3-S3 trucks travelling on Villavicencio – Bogota lane

El ejemplo anterior, que se puede extrapolar a cada tipo de camión y carril, es una demostración de las ventajas del sistema implementado, cuya relación costo/beneficio es mayor comparada con la obtenida de sistemas de pesaje estático tradicional o el sistema WIM, por lo cual se convierte en una opción complementaria que permitiría optimizar la existente.

The above example, which values can be extrapolated to each type of truck and lane, demonstrate the advantages of the implemented system, which cost/benefit relation is greater than the one delivered by traditional static weighing system or by WIM, thus becoming a complementary alternative to improve the existing ones.

Otra aplicación del sistema de instrumentación, es la automatización en la medición del tránsito discriminado de la vía. En particular en la prueba piloto realizada se pudo hacer la medición de camiones discriminada por número de ejes; para los conteos del 5 y 6 de octubre no se obtuvo el aforo completo del día, para el día 20 de octubre se presentó el problema que por falta de canalización, era posible que los vehículos utilizaran un tercer carril y no pasaran por los medidores; para los días 21 y 22 de octubre, se subsanaron estas situaciones y se pudo contar con una medición de 24 horas continuas, compuesta por la tarde-noche del 21 de octubre y la mañana del 22 de octubre, periodo en el cual se calculó el TPD para camiones. Al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes de tránsito que presenta el INVIAS, se comprueba la precisión del dispositivo para medir tránsito, lo cual genera un gran potencial de investigación desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito y transporte.

El TPD de camiones obtenido en la presente prueba piloto fue de 5858; el TPD de camiones reportado por el INVIAS para el 2008 fue de 5153, que con un crecimiento moderado podría estar del orden de 5500 a 5800 para el 2010; demostrando la consistencia que tienen las mediciones automatizadas de tránsito mediante los sensores de piso instalados. En cuanto al análisis comparativo de la distribución porcentual obtenida en la prueba piloto y la suministrada por el INVIAS, se encuentra también una gran similitud; en la prueba piloto de la presente investigación se obtuvo una distribución porcentual de pesados de 76%, 5%, 11% y 8%, para C2, C3-4, C5 y >C5; en los volúmenes del INVIAS la distribución porcentual de pesados es de 64%, 10%, 10% y 16%, para C2, C3-4, C5 y >C5, respectivamente.

Otra aplicación que podrían tener los pesajes de los vehículos pesados desde la perspectiva de la ingeniería de transporte, es en los estudios de cuantificación de oferta y demanda en estimación de la carga que llevan los vehículos; en la actualidad dichos estudios se efectúan mediante encuestas que se aplican a una muestra de los conductores de los vehículos de carga, evitando la subjetividad que implican las respuestas de los encuestados; permitiendo focalizar las encuestas a otras variables tales como el origen/destino de la carga y el tipo de carga transportada.

Another application of the instrumented system is the automatic measurement of discriminated traffic on the carriage way. Particularly, the pilot test was able to measure trucks discriminating by number of axles. Counting on October 5th and 6th do not deliver the values for the whole days; on October 20th because of a canalization lack, the vehicles were likely travelling on a third lane not being sensed by measurement devices; On October 21st and 22nd those inconveniences were solved and the continuous 24 hours measurement system was available on October 21st afternoon-night time and October 22nd morning, which is the period when trucks' TPD was calculated. By comparing the obtained results to traffic volumes delivered by INVIAS, this device accuracy is proved for measuring traffic volumes, thus becoming a high potential research tool from a traffic and transport engineering point of view.

The obtained trucks' TPD in the current pilot test was 5858; trucks' TPD reported by INVIAS for 2008 was 5153, which with a moderate growing rate could reach from 5500 to 5800 for 2010, thus demonstrating the soundness of automatic traffic measurements by means of sensors installed in the ground. A great similarity is found in the comparative analysis of percentage distribution obtained from pilot test and the one delivered by INVIAS. The pilot test in the current research job delivered a weighing percentage distribution of 76%, 5%, 11% and 8% for C2, C3-4, C5 and >C5; the volumes by INVIAS delivered a weighing percentage distribution of 64%, 10%, 10% and 16%, for C2, C3-4, C5 and >C5, respectively.

Another possible application for heavy load weighing system from a transport engineering point of view, is the supply-demand studies on vehicles load calculation; presently such studies are carried out by means of opinion polls applied on a sample of load vehicle drivers, avoiding subjectivity involved in the survey group answers; therefore surveys could be focused on other variables such as origin/destination and the kind of load transported.

De otra parte, la prueba piloto realizada también permitió capturar información de las velocidades de los vehículos, la cual también evidencia una gran consistencia. Por ejemplo para los días 21 y 22 de octubre, la velocidad promedio en el sentido Bogotá-Villavicencio fue de 38.3 y 38.5 respectivamente, y en el sentido Villavicencio-Bogotá, fue de 32.3 y 32.0, respectivamente; la diferencia del orden del 20% se debe a que en el sentido hacia Bogotá los vehículos llevan una menor velocidad, ya que a poca distancia atrás se encontraba el peaje, en cambio en el otro sentido no se presentaba ninguna restricción a la circulación.

El poder contar con datos confiables de velocidades tiene varias bondades, entendiendo que la velocidad es una variable fundamental para establecer el nivel de servicio de un tramo vial. Dicha captura automática de velocidades, en futuras implementaciones podría permitir tener una aproximación certera al nivel de servicio que está presentando una vía en un momento determinado; lo cual es de mucha utilidad, de manera especial en vías concesionadas, donde el servicio que recibe el usuario es muy importante. Mediante el monitoreo en línea de la velocidad, se puede fortalecer el concepto de nivel de servicio, lo cual indirectamente tiene unas bastas implicaciones en inversiones y gradualidad de las obras, ya que para ofrecer un nivel de servicio operacional a los usuarios, la operación de las carreteras no debe ser superior al nivel de Servicio "D", por más de 50 horas al año, información que perfectamente se puede capturar mediante dispositivos como los utilizados en la presente prueba piloto. También se podrían tener aplicaciones relacionadas con señalización dinámica, información a los usuarios, atención a imprevistos en la vía, operación en condiciones especiales y condiciones críticas de tráfico, elementos que con algunas rutinas en función de la velocidad se podrían reportar.

Por último, información como la recopilada en esta prueba piloto tiene el potencial de servir como ayuda en temas de regulación sobre el transporte de carga en las carreteras colombianas; además de las variables explicadas anteriormente, como son el peso, el volumen de tránsito y la velocidad, se podría recopilar información de suma utilidad en el establecimiento de la estructura tarifaria del transporte de carga, tema que tiene bastantes discrepancias en nuestro país entre los transportadores y el regulador, justamente por la asimetría de la información existente. La tendencia mundial es la desregulación, obligando a concentrar el papel del Estado en aspectos de calidad del servicio.

On the other hand, this pilot test enabled data collection on the vehicles speed, which also evidences a strong soundness. For example on October 21st and 22nd, the average speed on Bogota – Villavicencio direction was 38.3 and 38.5, respectively, and on Villavicencio- Bogota direction was 32.3 and 32.0, respectively. Such vehicles speed difference of approximately 20% is originated by the fact that there was a weighing toll few meters behind, contrarily on the other direction there was no traffic restriction.

Counting with reliable speed records has several advantages, understanding that speed is a fundamental variable to establish servicing level on a traffic road. Such speed automatic measurement, in future implementations could facilitate an accurate approximation of service level on a carriage way at a given moment, which is quite useful especially for concessional carriage ways, where servicing level is quite important for users. By means of on-line speed monitoring, the concept of servicing level can be increased, which indirectly has wide consequences for investments and gradual stages of civil works. Therefore, so as to provide an operational servicing level to users, the carriage way operation should not be higher than Service D, more than 50 hours a year; this information can be easily collected by means of devices such as the ones used in the current pilot test. Other applications may be available, those related to dynamic signaling, information to users, road assistance, operation under special conditions and critical traffic conditions, elements that could be reported by using some routines based on speed.

Finally, information as the one collected by this pilot test has the potential to contribute in control issues for load transportation on Colombian highways. Apart from above explained variables such as weight, traffic volume and speed; quite useful information could be collected for the determination of load transportation fare rates, which is a controversial subject between transporters and regulatory authority in our country, mainly because of dissymmetry of existing information. The global trend is deregulation, thus forcing the Governments role to focus on service quality issues.

Por ejemplo, para la estructuración de la canasta de costos del transporte de carga, es usual que los transportadores planteen argumentos como que muchas veces se ven obligados a realizar viajes en vacío, lo cual disminuye la rentabilidad de su negocio. Si los medidores utilizados se complementan con dispositivos de captura de placas mediante video, se podría tener información de peso asociado a placas, y conocer con mayor exactitud, si en algunos orígenes destinos existe compensación de las cargas o no; información que sería de gran utilidad para el regulador, para temas como el establecimiento de fletes, entre otros, coadyuvando a mejorar la eficiencia del modo, entendiendo que los costos de transporte son una parte muy importante de los costos logísticos de los productos.

5. Conclusiones

- La metodología basada en Algoritmos Genéticos apoyados en Líneas de Influencia, desarrollada en la presente investigación, permite encontrar con gran confiabilidad las cargas dinámicas producidas por los camiones pesados que circulan por un puente instrumentado, así como, las cantidades de tránsito vehicular discriminados por tipo de vehículo, con gran eficiencia frente a procesos tradicionales de medición estática.
- El error de calibración promedio de 4.6%, encontrado en el modelo analítico computacional de la superestructura del puente, partiendo de una prueba estática y las técnicas numéricas de optimización sobre el comportamiento son muy aceptables, considerando la complejidad de las acciones y efectos en este tipo de estructuras.
- Un aporte cualitativo y cuantitativo importante de esta investigación, es la determinación de un matriz de rigidez de la superestructura del puente, el cual se basa en el modelo analítico computacional calibrado y que es el fundamento del algoritmo genético.
- El proceso de calibración y validación del algoritmo genético partiendo del paso de diferentes camiones de peso y geometría conocida, empleados en la investigación, encontró que es más preciso cuando determina cargas de mayor magnitud por eje, específicamente para camiones C3-S3 ó C3-S2.
- El sistema desarrollado tiene la capacidad de determinar, con una precisión satisfactoria, el peso total en movimiento - de cualquier tipo de camión- durante el día y la noche, por cada carril en función del desplazamiento promedio de las cuatro vigas.

For example, for the determination of standard load transportation basket, it is usual that transporters declare their arguments such as the unloaded trips developed, that diminishes their business profit. If employed measurement devices are complemented with plate collection devices by means of video recordings, it will be possible to obtain weigh information associated to plates and, to learn with higher accuracy if in some origins/destinations there is a load compensation or not.

This information would be useful for the regulatory authority on subjects such as freight determination among others, so as to collaborate in increasing the efficiency mode by understanding that transportation costs are a very important factor in logistic costs for products.

5. Conclusions

- Methodology based on Genetic Algorithms supported on Influence Lines developed in the current research job, enables an easy determination of highly reliable dynamic loads produced by heavy trucks travelling on an instrumented bridge, as well as obtaining discriminated vehicular traffic volume by vehicle type, with great efficiency when compared to static measurement traditional processes.
- The average calibration error of 4.6% delivered by the analytical model application on the bridge superstructure, starting from a static test and followed by the optimization numerical techniques on the bridge behavior, are quite acceptable considering the complex actions and effects of these types of structures.
- A qualitative and quantitative contribution from this research job is the determination of stiffness matrix of bridge superstructure, which is based on a calibrated analytical model application which is the base of genetic algorithm.
- The calibration and validation process of genetic algorithm considering the transit of different trucks, counting with previous information on weight and geometry employed in this research job, proved to be more accurate when determining higher load magnitudes per axle, especially for trucks C3-S3 and C3-S2.
- The system developed has the capacity of determining with satisfactory accuracy the total weight in motion for any kind of truck, during day and night times, on each lane based on the average displacement of four beams.



- El sistema empleado puede ser implementado de manera primaria en los puentes simplemente apoyados de una sola luz en el país para ser complementario a los sistemas tradicionales de pesaje estático, permitiendo de esa manera la optimización de las labores de control de peso.

- The employed system may be implemented on a preliminary basis on supported single span bridges in Colombia, so as to complement traditional static weighing systems thus allowing the optimization of weighing control tasks.

6. Agradecimientos

Dicho trabajo fue posible gracias al apoyo logístico de COVIANDES.

6. Acknowledgments

Current research job was developed thanks to logistical support provided by COVIANDES.

7. Referencias / References

- Acevedo A.M y Martínez L.A (2006), "Diseño de algoritmos para la determinación indirecta de las cargas dinámicas de los carros que actúan sobre un prototipo instrumentado del puente puerto Salgar", Trabajo de grado, Director: Edgar Muñoz, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.
- European Commission 4th Framework Programme Transport(2001), "Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)" Report of Work Package, Bridge WIM systems (B-WIM), University College Dublin.
- Goldberg D. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley. 412 pp.
- Gagarine N. (1991) *Advances in weigh-in-motion with pattern recognition and prediction of fatigue life of highway bridges*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Md, USA,.
- Muñoz E.E. (2001), "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia". *Revista Ingeniería y Universidad*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Muñoz E.E., Nuñez F. F. y Jamshid Mohammadi (2009), "An Investigation of Common Causes of Bridges Collapse in Colombia", *ASCE – Practice Periodical on Structural Design and Construction*, EE.UU.
- Muñoz E.E., Valbuena E. y Rodríguez R. (2004), "Estado y daños típicos de los puentes de la Red Vial Nacional de Colombia, basados en inspecciones visuales". *Revista RUTAS*, Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, España.
- Muñoz E.E. y Valbuena E. (2004), "Evaluación de los puentes de acero de la Red Vial Nacional", *Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura vial*, Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico.
- Muñoz E.E. y Valbuena E. (2006), "Los problemas de la socavación en los puentes de Colombia", *Revista de Infraestructura Vial*, numeral 15 de febrero de 2006, Lanamme, Universidad de Costa Rica, San José.
- Muñoz E.E., Nuñez F., Otalora XX., Rodríguez W.n y Ruiz D. (2006), "Confiabilidad estructural de un puente en acero apoyados en monitoreo e instrumentación", *Revista Ingeniería de Construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Muñoz E.E., Rodríguez J., Nuñez F., Otalora C. y Ramos A. (2008), "Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural", *Revista Ingeniería de Construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Muñoz E.E., Rodríguez J., Nuñez F., Otalora C. y Ramos A. (2010), "Vulnerabilidad sísmica de un puente atrantado basada en confiabilidad estructural y apoyado en monitoreo e instrumentación", *Revista Ingeniería de Construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- Moses F. (1979), *Weigh-in motion Sytem using instrumented bridges*. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 105, TE3, 233-249
- Pino L. A. (2006), "Propuesta para la elaboración de norma para la evaluación de superestructura de puentes de carretera existentes en Colombia", Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.
- Quilligan M.(2003), "Bridge Weight-in-motion. Development of a 2-D Multi-Vehicle Algorithm", Department of Civil and Architectural Engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Rowley C., Gonzalez A. Obrien E. y A. Znidaric (2008), "Comparison of conventional and regularized bridge weigh-in-motion algorithms," in *Proceedings of the 5th International Conference on Heavy Vehicles (ICWIM '08)*, pp. 271–282, Paris, France.
- Tarantola A. (2005), "Inverse Problem Theory and Model Parameter Estimation". SIAM. New Jersey.
- Chan T. H. T. y Ashebo D. B. (2006), "Theoretical study of moving force identification on continuous bridges," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, no. 3–5, pp. 870–883.
- Chan T. H. T. y Ashebo D. B. (2006), "Moving axle load from multi-span continuous bridge: laboratory study," *Journal of Vibration and Acoustics*, *Transactions of the ASME*, vol. 128, no. 4, pp. 521–526.
- Law S. S., Chan T. H. T. y Zeng Q. H. (1997), "Moving force identification: a time domain method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 201, no. 1, pp. 1–22.
- Law S. S., Chan T. H. T. y Zeng Q. H. (1999), "Moving force identification a frequency and time domains analysis," *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 121, no. 3, pp. 394–401.
- Zhu X. Q. y Law S. S. (2000), "Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 236, no. 4, pp. 705–724.
- Znidaric J. y Moses F. (1994), "Evaluation of the Carrying Capacity of Existing Bridges". Final Report. Institute for Testing And Research in Materials and Structures. Ljubljana, Slovenia.