



# **SISTEMA COMPUTACIONAL DE ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD EN PUENTES DE LA RED VIAL NACIONAL EN COLOMBIA UTILIZANDO EL MODELO DE JERARQUIZACIÓN ANALÍTICA\***

## **COMPUTATIONAL SYSTEM OF VULNERABILITY ANALYSIS IN BRIDGES OF THE NATIONAL ROAD NETWORK IN COLOMBIA USING THE ANALYTICAL HIERARCHY MODEL**

*Jhonny Alexander Rodriguez Bayona\*\**

*Candidato Magister en Infraestructura Vial - USTA*

*Oscar Leonardo Celis Fonseca\*\*\**

*Candidato Magister en Infraestructura Vial - USTA*

### **RESUMEN**

Este proyecto crea una herramienta computacional de evaluación de puentes tomando criterios de decisión y muchas más variables que se involucran en la toma de decisiones para su inmediata intervención, utilizando criterios más definidos de los daños estructurales, hidráulicos y geotécnicos, indicadores de riesgo ponderado del puente y indicadores de consecuencia, se utilizó los criterios de nivel de tránsito y valor estratégico del puente, con los respectivos subcriterios como elementos funcionales, infraestructura y superestructura, socavación del puente en pilas,

---

\*Artículo de resultado del trabajo de grado para la Maestría en Infraestructura Vial de la USTA.

\*\*Ingeniero de Vías y Transporte. Especialista en Gerencia de Proyectos, Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Maestría en Infraestructura Vial. Investigación Aplicada, Universidad Santo Tomás de Aquino - USTA. Correo electrónico: [jhonnyarb@gmail.com](mailto:jhonnyarb@gmail.com)

\*\*\* Ingeniero Civil. Especialista en recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Maestría en Infraestructura Vial. Universidad Santo Tomás de Aquino - USTA Correo electrónico: [leonardo\\_celisy@hotmail.com](mailto:leonardo_celisy@hotmail.com).



estribos y aletas, grado de importancia dentro de la red vial, tránsito promedio diario - TPDS, importancia de la vía, impacto por cierre, dificultad de recuperación de la vía, pendiente del tramo, fecha de construcción del puente, configuración estructural del puente, vías alternas y sensibilidad ambiental; abarcando en su gran mayoría los criterios técnico-político y socio-ambiental que intercedan en la toma de decisión para una intervención en la evaluación de los puentes.

Utilizando el modelo de procesos de decisión de Saaty (1), aunque la metodología permite generar valores de los pesos, a través de expertos o juicio de valores de un centro decisor; en el presente proyecto se generaron los pesos de manera cualitativa midiendo su consistencia, los cuales se tomaron en base a las tres evaluaciones de puentes realizadas por el INVIAS en los años 1996-1997, 2001-2002 y 2008-2009(16), estos pesos podrían ser modificados por el administrador, experto del programa en caso de requerirse criterios o “juicios subjetivos realizados por los expertos” (2), se realiza una matriz de comparación por pares de factores en una escala de valoración de acuerdo a las preferencias, utilizando la escala de valores de Saaty (3) de igual o extrema importancia o sea de 1 (uno) cuando es débil la comparación y hasta 10 (diez) cuando la comparación es fuerte; se ejecuta el proceso de normalización de la matriz para la obtención de los pesos relativos para cada criterio, realizando el cálculo de la relación de congruencia con la finalidad de verificar la consistencia de los juicios individuales, obteniendo el vector de prioridad para cada par de criterios y en el ordenamiento de las prioridades para la toma de decisiones en la intervención para administración de puentes.



**Palabras clave:** Gestión en puentes, Análisis de vulnerabilidad, métodos para toma de decisiones, procesos de jerarquización analítica, herramientas computacionales para evaluación en puentes.

### **Abstract**

This project creates a computational evaluation tool that takes decision criteria and many more variables that are involved in decision making for immediate intervention, using more defined criteria structural, hydraulic and geotechnical damages as indicators of the bridge's average risk and as indicators of consequence, the criteria of traffic level and strategic value of the bridge were used, with the respective sub-criteria as functional elements, infrastructure and superstructure, undermining the bridge in piles, abutments and fins, degree of importance within the road network, average daily traffic, importance of the road, impact by closure, difficulty in recovering the road, slope of the section, construction date of the bridge, structural configuration of the bridge, alternate roads and environmental sensitivity; covering in its great majority the technical-political and socio-environmental criteria that intercede in the decision making for an intervention in the evaluation of the bridges.

Using the decision process model of Saaty (1), although the methodology allows to generate values of the weights, through experts or judgment of values of a decision-making center, in the present project weights were generated qualitatively by measuring their consistency, which were taken based on the three bridge evaluations carried out by INVIAS in the years 1996-1997, 2001-2002 and 2008-2009 (12), these weights could be modified by the expert administrator of the program if criteria or "subjective judgments made by experts" (2) are required, an array is matrix of comparison by pairs of factors in a scale of assessment according to preferences using the scale of Saaty values (3) of equal or extreme importance since 1 (one) when the comparison is weak to 10 (ten) when the comparison is strong. The normalization process of the matrix is executed to obtain the relative weights for each criteria, calculating the congruence relation in order to verify the consistency of the individual judgments, obtaining the priority vector for each pair of criteria and in ordering the priorities for decision-making in the intervention for bridge management.

**Keywords:** Bridge management, vulnerability analysis, decision making methods, analytical hierarchical processes, computational tools for evaluation on bridges.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las herramientas computacionales de uso institucional para la gestión en la administración de puentes utilizan sistemas operativos desactualizados, metodologías de evaluación de la vulnerabilidad con pocas variables que incluyen solamente daños estructurales, por lo que los ordenadores del gasto público se ven abocados a realizar intervenciones en los puentes en la medida que estos son reportados como afectados por acción de lluvia intensa, de la sobrecarga por sobrepeso en los vehículos, socavación en la cimentación, sismos, etc. Esta toma de decisiones en la mayoría de los casos se ejecuta de manera reactiva, atendiendo los puentes en la medida que se van afectando, por lo que el proyecto pretende ser el inicio de una planeación efectiva para priorizar el daño en las estructuras viales y en especial los puentes.

La metodología a implementar tiene en cuenta variables como por ejemplo la tipología de puentes o la importancia del mismo dentro de la red vial, que conjugadas con los factores de riesgo y vulnerabilidad por agentes sísmicos y de lluvia, tipo de carreteras, asociados al grado de importancia o peso relativo de cada variable; son los conceptos que se tomarán para desarrollar este proyecto y apoyado con el modelo de análisis de decisión multicriterio desarrollado por Thomas Saaty en la Universidad de Pennsylvania(1), como herramienta en la toma de decisiones y en la jerarquización para la intervención de los puentes, ya que se pretende realizar una herramienta computacional, que permita priorizar la atención oportuna de los puentes bajo el modelo de análisis de decisión multicriterio, dando



con esto un aporte a la Gestión y Administración en el mantenimiento de puentes en Colombia.

La base de datos utilizada y que facilitaba el cargue de base de datos y las muchas variables que contempla una estructura de un puente, se desarrolló en el programa en Oracle V8, el cual registra las características más relevantes de naturaleza técnica y de inspección visual de los puentes en una red vial y con las características de la zona de influencia.

Esta base de datos de cada puente que podrá ser consultado y actualizado en cada inspección para ejecutar una política de reparación de daño y una herramienta computacional que sea ágil, de fácil manejo para el usuario de seguimiento de las estructuras y su comportamiento tanto estructural como hidráulico y ambiental. Adicionalmente y con la facilidad del programa se podrían generar diferentes priorizaciones, reportes por puente y/o puentes con sus respectivas características, datos de la evaluación con imágenes fotográficas que visualizarían aún más la presentación de la información y la toma de decisiones en su intervención.

## **METODOLOGÍA**

El proyecto contempló la ejecución de las actividades de revisión de los documentos del sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia y de informes de Administración Vial, la revisión de los documentos existentes referentes a los modelos de aplicación de análisis multicriterio y esquema de evaluación de criterios para vulnerabilidad en puentes, revisión de los documentos relacionados



Inspección Visual de puentes, revisión bibliográfica existente sobre las bases de datos Oracle, programa Expert.choice.V11(4), sistemas de administración de puentes, plantear y realizar la estructura y arquitectura computacional con un procedimiento guía para el manejo del software, ejemplo de aplicación del software a un inventario de puentes, con análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

## **MODELO DE EVALUACION PARA PUENTES CON METODOLOGIA MULTICRITERIO**

La estructuración del proyecto se fundamentó en dos ejes, uno que es la metodología de evaluación utilizando la Jerarquización Analítica -AHP(5) y otro es la construcción de la herramienta computacional utilizando un manejador de base de datos en ORACLE V5; para lo cual se hizo una revisión de las fortalezas y debilidades del Sistema de SIPUCOL(6) - Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia del INVIAS, de la calificación de la inspección visual de puentes del Instituto de Desarrollo Urbano - IDU de Bogotá D.C(7) que cuenta con una evaluación de puentes a través de una hoja de cálculo Excel programada.

Se identificaron las variables relevantes y se estructuró una primera jerarquización del proceso de decisión, tomando criterios y subcriterios con características homogéneas; para lo cual los expertos e ingenieros responsables de las decisiones



antes de pasar al siguiente paso que es la valoración de preferencias, deberán estar de acuerdo con la estructura. **(8)**

De los indicadores relevantes para la jerarquización se tomaron los siguientes aspectos: Estado del puente (estructural y funcional), socavación del puente en pilas, estribos y aletas, grado de importancia dentro de la red vial, Tránsito Promedio Diario – TPDS, importancia de la vía, impacto por cierre, dificultad de recuperación de la vía, pendiente del tramo, fecha de construcción del puente, configuración estructural del puente, vías alternas y sensibilidad ambiental. **(9)**

Clasificando los criterios anteriores dentro la disciplina de la ingeniería vial como: Riesgos estructurales(E), hidráulicos(H), geotécnicos(G), y por los tipos de consecuencia como: tránsito, vulnerabilidad de la red (VR), valor estratégico del puente(VEP). **(10)(11)(12)**

### **CARACTERIZACION DEL MODELO LINEAL**

Para definir el modelo lineal integrando los indicadores y la función de utilidad lineal con factores ponderados de la importancia relativa de los indicadores se tiene que:

$$S_i = \sum wf * S_{fi} \quad (1)$$

donde  $S_i$  es el índice ponderado del puente “ $i$ ”,  $wf$  es el factor de ponderación del atributo “ $f$ ”,  $S_{fi}$  es la calificación del indicador del atributo “ $f$ ” en el puente “ $i$ ”.

De acuerdo con la propuesta de la estructura jerárquica, se definen tres indicadores:



Indicador de riesgo ponderado del puente “i”

$$IRPi = w_{11}Ei + w_{12} Hi + w_{13} Gi \quad (2)$$

Donde  $IRPi$  es el indicador de riesgo ponderado del puente “i”,  $Ei$  es la calificación del indicador de riesgo de falla estructural en el puente “i”,  $Hi$  es la calificación del indicador de riesgo de falla hidráulica en el puente “i”,  $Gi$  es la calificación del indicador de riesgo de Geotécnico “i”,  $w_{11}$ ,  $w_{12}$ ,  $w_{13}$  son factores de ponderación de la importancia relativa de E, H, G como indicadores de riesgo del puente.

Indicador de consecuencias por fallas del puente “i”

$$ICPi = w_{21}NTi + w_{22}VRi + w_{23} VEPi \quad (3)$$

Donde  $ICPi$  es el indicador de consecuencia ponderado del puente “i”,  $NTi$  es el indicador de consecuencia por nivel del tránsito en el puente “i”,  $VRi$  es la calificación del indicador de consecuencia por vulnerabilidad de la red (afectación por desvíos) como resultado de la inhabilitación del puente “i”,  $VEPi$  es el indicador de consecuencia por valor estratégico del puente “i”,  $w_{21}$ ,  $w_{22}$ ,  $w_{23}$  son factores de ponderación de la importancia relativa de NT, VR, VEP como indicadores de consecuencia del puente.

Indicador de costo de mantenimiento y rehabilitación del puente “i”

$$ICMRi = Ci \quad (4)$$

Donde  $Ci$  es el monto del costo de mantenimiento y rehabilitación dado en pesos.

La utilidad del indicador está asociada a los recursos presupuestales de la entidad encargada del puente. Para el presente proyecto se tendrá en cuenta en su análisis



el valor de diez (10) como menor valor de inversión y de uno (1) como mayor valor de inversión y se puede tomar valores intermedios de acuerdo con los requerimientos de inversión.

## DETERMINACION DE LOS FACTORES DE PONDERACION

Los juicios de valores son la base del proceso para la metodología AHP y pueden estar definidos por información técnica, científica, la basada en la experiencia y conocimiento del grupo decisor o lo que se conoce como las opiniones de cada individuo y/o grupo de interés involucrado en la toma de decisión, esta es una característica que hace diferente este método a otros.(8)

Para el caso de los factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo ponderado ( $w_{11}$ ,  $w_{12}$ ,  $w_{13}$ ) e indicadores de consecuencia de falla del puente ( $w_{21}$ ,  $w_{22}$ ,  $w_{23}$ ) se definió tomarlos en base a los resultados de las tres inspecciones realizadas por el INVIAS en los periodos 1996-1997, 2001-2002 y 2008-2009)(13) y en base al porcentaje de participación de las variables, dado que es una de las ventajas del método (AHP) permite "(...)obtener un sistema de pesos que resulte consistente con las preferencias subjetivas mostradas por el centro decisor(...)." (11).

**Tabla 1 Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo ponderado.**

Causas	Número de casos	%	Indicador de riesgo asociado	%	$W_1$
Deficiencia estructural y de diseño	13	18	Estructural(E)	28	$w_{11}$
Sobrecarga e impacto	4	5	Estructural (E)		



Deficiencia en construcción e interventoría	4	5	Estructural (E)		
Avalancha, creciente, etc.	29	40	Hidráulica (H)	40	W <sub>12</sub>
Socavación, pérdida estribos, pilas, etc.	23	32	Geotecnia (G)	32	W <sub>13</sub>
Totalidad de casos	73	100		100	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo II Ingeniería de puentes, colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga”, pág. 35 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012.

Obteniendo el Indicador de Riesgo Ponderado (IRP):

$$IRP = 0,28 E + 0,40 H + 0,32 G (5)$$

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo estructural ( $w_{21}$ ,  $w_{22}$ ,  $w_{23}$ ) como son elementos funcionales, elementos estructurales y elementos de la infraestructura, se determinó teniendo en cuenta la información de daños en la evaluación de 2008 realizada por el INVIAS en componentes promedio calificados como “Malos” calificación 4 y 5 y “Regular” calificación de 3 en Sipucol, obteniendo que,  $w_{21} = 0.29$ ,  $w_{22} = 0,49$  y  $w_{23} = 0,22$ .

**Tabla 6 Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo estructural.**

Elemento del Puente	Malo	Regular	Promedio	% Participación	Indicador de riesgo asociado(Estructural)	% por Indicador	Wi
Superficie de rodadura	1	11	6	6.3	Elemento funcional	29.0	w <sub>21</sub>
Juntas de dilatación	18	2	10	10.4	Elemento funcional		
Andenes y Bordillos	4	1	2.5	2.6	Elemento funcional		
Barandas	16	2	9	9.4	Elemento funcional		
Losa	9	1	5	5.2	Superestructura	49.0	w <sub>22</sub>



Vigas	18	2	10	10.4	Superestructura		
Elementos del Arco	12	3	7.5	7.8	Superestructura		
Cables	18	2	10	10.4	Superestructura		
Elementos de armadura	25	5	15	15.6	Superestructura		
Conos y Taludes	4	1	2.5	2.6	Infraestructura		
Aletas	3	1	2	2.1	Infraestructura		
Estribos	5	1	3	3.1	Infraestructura		
Pilas	6	1	3.5	3.6	Infraestructura		
Apoyos	5	1	3	3.1	Infraestructura		
Cause	13	1	7	7.3	Infraestructura	22.0	w23
		<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.0</b>		100.0	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo I Ingeniería de Puentes-reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación, pág. 301 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012.(12)

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo Hidráulico ( $w_{24}$ ,  $w_{25}$ ,  $w_{26}$ ) como son: Socavación en pilas, socavación en estribo/aletas y socavación cauce se determinó teniendo en cuenta la información de daños en la evaluación de 2008 realizada por el INVIAS en componentes promedio calificados como “Malos” calificación 4 y 5 y “Regular” calificación de 3 en Sipucol, obteniendo que así:  $w_{24} = 0.22$ ,  $w_{25} = 0,26$  y  $w_{26} = 0,52$ .

**Tabla 7 Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo Hidráulico.**

Componente de la estructura	Malo	Regular	Promedio	% Participación	Indicador de riesgo asociado(Hidráulico)	% por Indicador	Wi
Pilas	6	1	3.5	26%	Socavación en Pilas	26%	W24



Estribos	5	1	3	22%	Socavación en Estribos/Aletas	22%	W25
Cause	13	1	7	52%	Socavación Cause	52%	W26
		<b>Total</b>	<b>13.5</b>	<b>100%</b>		100	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo I Ingeniería de Puentes-reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación, pág. 301 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012.(12)

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo Geotécnico ( $w_{27}$ ,  $w_{28}$ ,  $w_{29}$ ) como son: Sismicidad, lluvias y procesos de remoción en masa se tomarán porcentual a la participación para conservar la igualdad en la ecuación también, como se comentó anteriormente, pueden ser generados por el grupo decisor de “acuerdo a juicio de valores de expertos”, obteniéndose que:  $w_{27} = 0.34$   $w_{28} = 0,33$  y  $w_{29} = 0,33$ .

**Tabla 8 Factores de ponderación para los Indicador de Riesgo Ponderado del puente**

INDICADOR	CALIFICACION	CRITERIO	INDICADOR	w1	SUBCRITERIO A	INDICADOR	w2
Indicador de Riesgo Ponderado del Puente (IRP)		ESTRUCTURAL €		$w_{11} = 0.28$	Elementos funcionales		$w_{21} = 0.29$
					Elementos superestructura		$w_{22} = 0.49$
					Infraestructura		$w_{23} = 0.22$
		HIDRÁULICO(H)		$w_{12} = 0.40$	socavación en pilas		$w_{24} = 0.26$
					socavación en estribos/Aletas		$w_{25} = 0.22$
					socavación Cause		$w_{26} = 0.52$



		GEOTECNICO(G)	$w_{13} = 0.32$	sismicidad (INGEOMINAS) As lluvias (IDEAM) Proceso remoción en masa	$w_{27} = 0.34$ $w_{28} = 0.33$ $w_{29} = 0.33$
--	--	---------------	-----------------	--	---

Fuente: Elaboración propia

Para los indicadores de consecuencia de falla del puente ( $w_{31}$ ,  $w_{32}$ ,  $w_{33}$ ) se tomarán porcentual a la participación para conservar la igualdad en la ecuación, obteniéndose que,  $w_{31} = 0.34$ ,  $w_{32} = 0,33$  y  $w_{33} = 0,33$

Para los criterios de los indicadores de consecuencia de falla del puente ( $w_{34}$ ,  $w_{35}$ ,  $w_{36}$ ) como son: Los Niveles de Tránsito, Vulnerabilidad de la Red Vial y el Valor estratégico del Puente se tomarán porcentual a la participación para conservar la unidad de la identidad en la formula, ósea que,  $w_{34} = 0.34$ ,  $w_{35} = 0,33$  y  $w_{36} = 0,33$ .

Para los subcriterios de los indicadores de consecuencia de falla del puente ( $w_{41}$ ,  $w_{42}$ ,  $w_{43}$ ,  $w_{44}$ ,  $w_{45}$ , ...  $w_{48}$ ) para niveles de tránsito, vulnerabilidad de la red vial y valor estratégico que tienen como subcriterios el TPDS, la importancia de la vía e impacto por cierre, dificultad de la recuperación y pendiente del tramo, con la finalidad de conservar la unidad en la ecuación lineal se tomaran porcentual la participación por no contar con datos estadísticos, ósea que para el TPDS  $w_{41} = 1$ , por la importancia de la vía e impacto por cierre  $w_{42} = 0.34$ ,  $w_{43} = 0,33$  y  $w_{44} = 0,33$ . Por Valor estratégico, se tomará para la fecha de construcción, configuración estructural del



puede, vías alternas y sensibilidad ambiental  $w_{45} = 0.25$ ,  $w_{46} = 0,25$ ,  $w_{47} = 0,25$  y  $w_{48} = 0,25$ . Es necesario evaluar la totalidad de los subcriterios para obtener el 100% de la suma de los pesos.

**Tabla 9 Factores de ponderación para los Indicador de consecuencia del puente.**

INDICADOR	CALIFICACION	CRITERIO	INDICADOR	$w_3$	SUBCRITERIO A	INDICADOR	$w_4$
Indicador de Consecuencia del Puente (ICP)		NIVEL DE TRANSITO (NT)		$w_{31}=0.34$	TPDS		$w_{41} = 1$
		VULNERABILIDAD DE LA RED (VR)		$w_{32}=0.33$	Importancia de la vía e Impacto por cierre		$w_{42} = 0.34$
					Dificultad de recuperación		$w_{43} = 0.33$
					Pendiente del tramo		$w_{44} = 0.33$
		VALOR ESTRATEGICO DEL PUENTE (VEP)		$w_{33}=0.33$	Fecha de Construcción		$w_{45} = 0.25$
					Configuración estructural del puente		$w_{46} = 0.25$
					Vías alternas		$w_{47} = 0.25$
					Sensibilidad ambiental		$w_{48} = 0.25$

Fuente: Cálculos propios

## CALIFICACION DE LAS CONDICIONES DEL PUENTE

Con base en la fundamentación del método de Saaty, en primera medida para el indicador de riesgo ponderado e indicador de consecuencia del puente, dependen de la evaluación realizada para cada puente en particular, por expertos y responsables de las decisiones en el área de puentes; se definió la escala de calificación para cada indicador de la función de utilidad con la mayor objetividad



posible, dependiendo del tipo de daños y las características de la estructura y demás variables asociadas, para que sea homogénea y consistente la base de comparación.

**Tabla 10 Calificación de las condiciones del puente con el Modelo de decisión Multicriterio Discreto.**

Calificación	Modelo de decisión Multicriterio Discreto	Estado del Puente
1	Muy alta posibilidad de cierre o corte de accesos por razones estructurales, hidráulicas. Accidentes graves (víctimas fatales o heridos graves) registrados en el puente en los últimos tres años, debido a razones de falta de adecuación geométrica (reducción de sección transversal y de velocidad de circulación, falta de visibilidad).	Muy mal estado
2	Alta posibilidad de cierre o corte de accesos por razones estructurales, hidráulicas. Accidentes graves (víctimas fatales o heridos graves) registrados en el puente en los últimos cuatro años, debido a razones de falta de adecuación geométrica (reducción de sección transversal y de velocidad de circulación, falta de visibilidad).	Mal estado
3	Muy alta posibilidad de limitación de cargas por razones estructurales, hidráulicas. Ancho de la calzada del puente menor al de la calzada de los accesos (reducción del ancho de carril), o velocidad de circulación en el puente mucho menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de 20 Km/h o más).	Mal estado
4	Alta la posibilidad de limitación de cargas por razones estructurales, hidráulicas. Ancho de la calzada del puente menor al de la calzada de los accesos (reducción del ancho de carril), o velocidad de circulación en el puente mucho menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de 20 Km/h o más).	Mal estado
5	Altos sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente por razones estructurales, hidráulicas. Causas que incrementan el costo en caso de reparación urgente: zonas alejadas de centros urbanos importantes; proyectos de alta complejidad técnica; dificultades administrativas para contratación. Ancho de la calzada del puente menor a 7,30 m, ó velocidad de circulación en el puente menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de entre 10 Km/h y 20 Km/h).	Regular estado
6	Presenta sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente por razones estructurales, hidráulicas. Causas que incrementan el costo en caso de reparación urgente: zonas intermedias de centros urbanos importantes; proyectos de complejidad técnica; dificultades administrativas para contratación. Ancho de la calzada del puente menor a 7,30 m, ó velocidad de circulación en el puente menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de entre 10 Km/h y 20 Km/h).	Regular estado



7	Sin sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente. Deficiencias en los elementos de guía y seguridad pasiva del puente. Barandas, defensas y barandas peatonales, señalización.	Buen estado
8	Costos dentro de la normalidad en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera no urgente. Daños menores en los elementos de guía y seguridad pasiva del puente. Barandas, defensas y barandas peatonales, señalización que deben ser reparados.	Buen estado
9	Daños insignificantes que no requieren reparación solamente obras de mantenimiento de rutina.	Buen estado
10	Sin daño, requiere solamente obras de mantenimiento de rutina.	Buen estado

Fuente: Ejecución propia con fundamento en la referencia (1) y (14)

A mejor estado del puente mayor calificación, por lo que la calificación de uno (1) corresponde a máximo riesgo y la calificación de (10) corresponde a mínimo riesgo.

Las calificaciones se asocian con las siguientes situaciones:

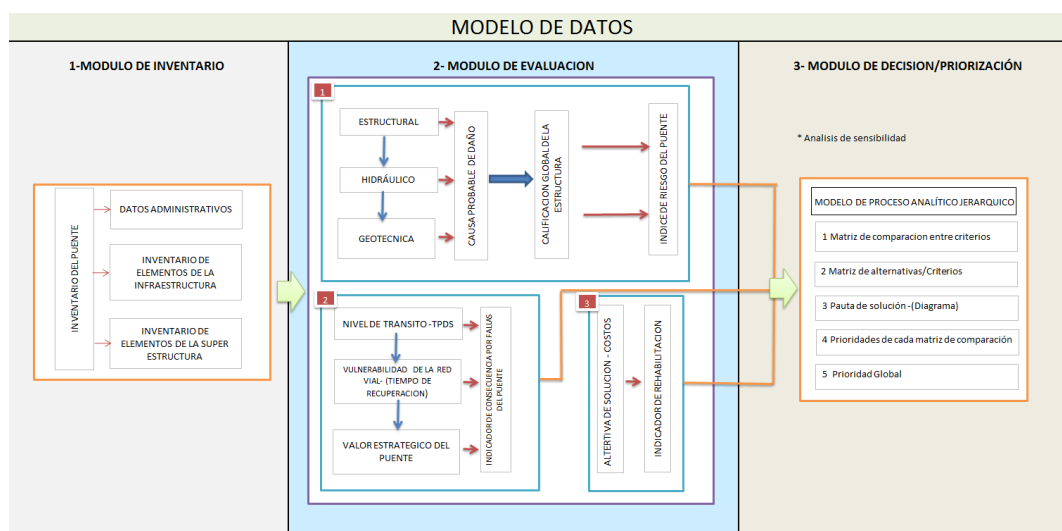
Para aquellos puentes que resulten con riesgo alto se definió en cinco puntos, el umbral para cualquiera de los indicadores individuales de riesgo (estructura, hidráulica, geotécnico) y en siete puntos, para el indicador de riesgo ponderado. Así quedan en el rango de riesgo bajo los puentes que cumplan simultáneamente la condición de tener todos sus indicadores individuales con valores **mayores a cinco (5)** y el indicador de riesgo ponderado **mayor** a siete (7), para estos casos corresponden a obras de mantenimiento de rutina que no requieren priorización. Los puentes que no cumplen la condición anterior quedan en el rango de riesgo alto y deben someterse al indicador de consecuencia para el proceso de ordenamiento de prioridades. El ordenamiento de prioridades de inversión resulta de menor a mayor ICP; a menor puntaje, mayor prioridad.



## CONFIGURACION DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

La herramienta computacional esta está conformada por tres módulos; el módulo de inventario, módulo de evaluación y el módulo de decisión/priorización. Definidos los parámetros contenidos en la inspección visual, fundamentados en los formatos usados en el inventario, se basa en tres pasos para el inventario de puentes, los cuales son los datos administrativos, inventario de elementos de la infraestructura e inventario de elementos de la superestructura.

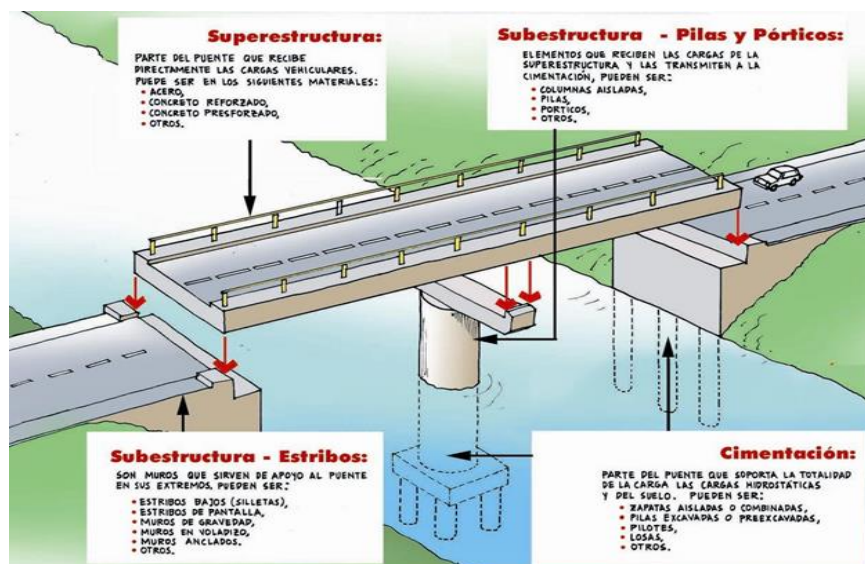
**Tabla 11 Modelo de Datos**



## MODULO DE INVENTARIO

Hace parte de este Inventario la información que se obtiene de la inspección del o de los puentes en la inspección.

**Tabla 11 Esquema general de un puente**



Fuente: Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Universidad de los Andes – INVIAS- Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, 2005

Para el ingreso, el sistema nos presenta la primera ventana flotante, donde solicita Username, Password y el Database, mostrando la ventana de presentación del programa llamado SIGP (Sistema Integrado de Gestión de Puentes).

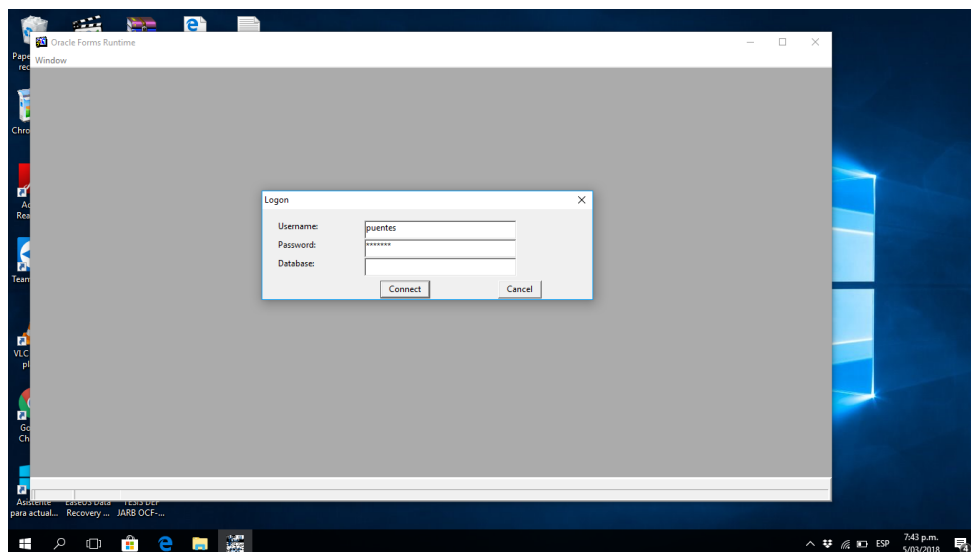
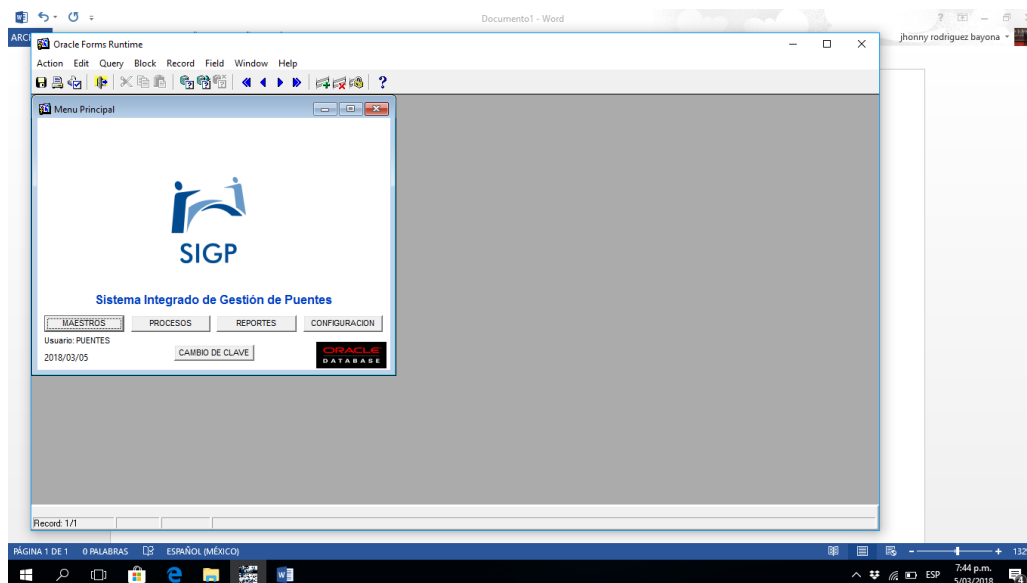
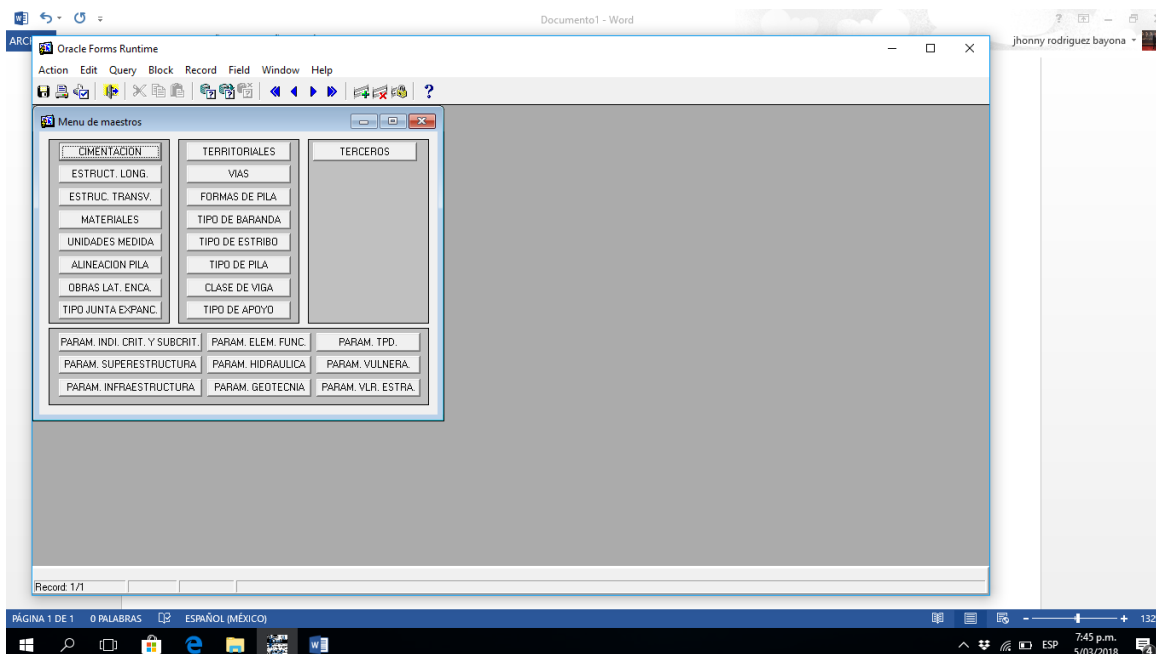


Figura No. 1 Ventana de Inicio



**Figura No. 2 Formulario principal del SIGP**

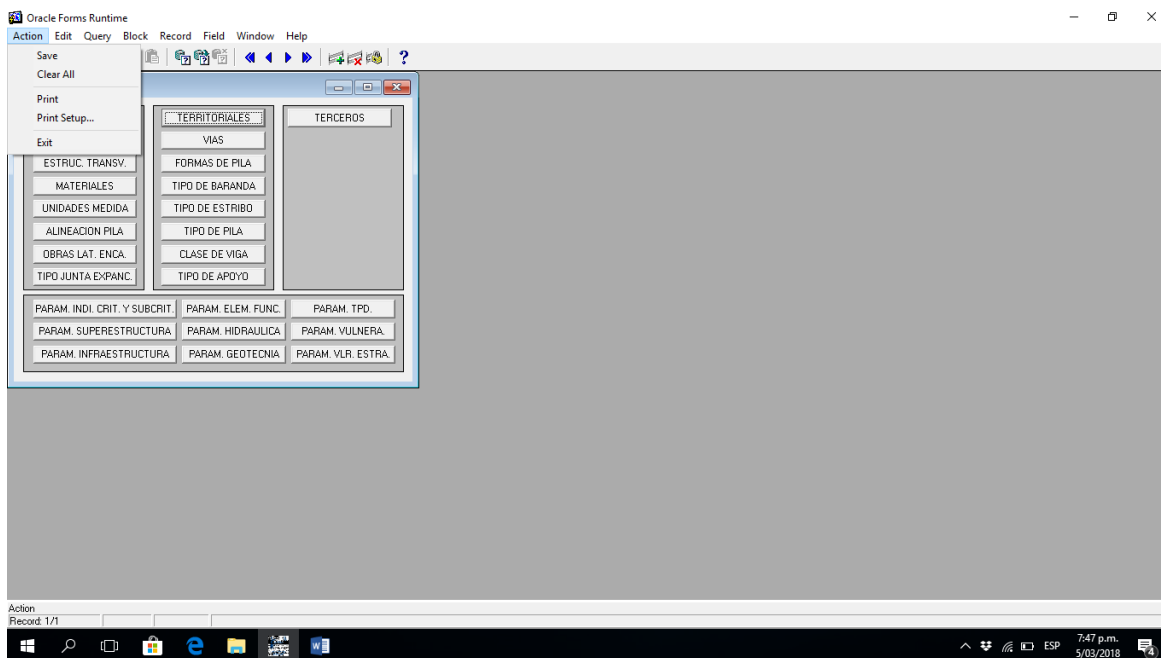
La ventana principal da acceso a los diferentes módulos del sistema; están agrupados en menús, que dependiendo del perfil del usuario que ingrese estarán activos o inactivos y se ubican los botones de Maestros. Procesos, Reportes, Configuración y cambio de clave.



**Figura No. 3 Formulario de Maestros**



En esta ventana se encuentran distintos botones que permiten navegar e ingresar los diferentes datos correspondientes a los campos en la base de datos, con el fin de realizar ediciones tales como crear, eliminar o modificar cualquier campo creado.

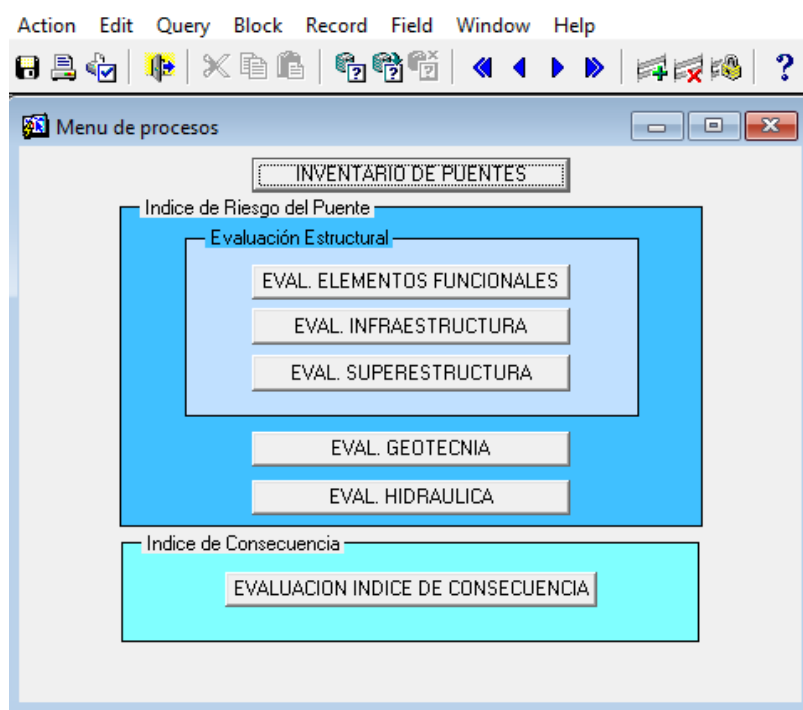


**Figura No. 4 Lista de opciones de Archivo**

Adicionalmente se encuentra los botones de Editar que permite ingresar desde este menú a la edición de los campos previamente creados; el cual consiste en crear un nuevo campo, editarlo o eliminarlo. (Save, Print, Print setup, Exit, Cut, Copy, Paste, Enter query, Execute query, Cancel query, Previous block, Next record, Next block, Insert record, Remove record, Lock record, Help). Los cuales se pueden activar picando en el icono o utilizando las ayudas de las teclas Tab para deslizarse o F9 para seleccionar.



En el menu de procesos, se encuentran la ventana flotante del inventario de puentes, es decir el modulo administrativo de la base; posteriormente y una vez creado el puente con los principales registros, continua con el módulo de evaluación con los principales criterios, para determinar el “Índice de riesgo ” y el “índice de consecuencia“ .



**Figura No. 5 Menú de procesos**

El formulario de inventario de puentes; cuenta con cuatro subformularios el cual determina los principales datos de cada puente asi: Administrativos, elementos que componene la estructura en su conjuntos, subformulario Datos Básicos, como: El código, identificación, nombre, dirección territorial a cargo, el tipo de alineamiento. (si es en curva, o tangente), sistema de medición ( Inglés o internacional ), año de



construido, año de reconstruido: año de la última intervención, número de luces que componen la estructura, número de pilas, número de vigas, terraplén; si su acceso es en lleno o a nivel con la vía (botón de selección), ancho de tablero, ancho de la calzada, alineación de las pilas respecto al cauce; latitud, en grados, minutos, segundos y coordenadas Norte-Este (Botón de selección); longitud en grados, minutos, segundos y coordenadas Norte-Este (Botón de selección). El programa da la opción de presentar dos fotografías (para antes y después), como se aprecia en la presentación:

Cod. Puente	Identificación Puente	Descripción Puente
1	16-7506-009.00	CANO GRANDE

Id. Terr.	Descripción Territorial	Id. Vía	Descripción Vía
16	Meta	7506	Calamar - San José del Guaviare

Lineamiento	PR	Sistema de Medición
TANGENTE	46	170

Id.	Unidades de Longitud	Id.	Unidades de Superficie	Longitud	Area
1	kilómetro (km)	15	metro cuadrado (m <sup>2</sup> )	16	90

Año Construc.	Año Recons.	No. Luces	No. Pilas	No. Vigas	Terraplen
1900	1996	1	0	3	<input checked="" type="checkbox"/>

Ancho Tablero	Ancho Calzada	Cod.	Alineación Pilas respecto al cauce
5.6	5.2		

Grados	Minutos	Segundos	Tipo
2	20	9	NORTE

Grados	Minutos	Segundos	Tipo
72	37	38	OESTE

Fecha Inicial	Fecha Final	Observaciones

Figura No. 6 Formulario de datos básicos

Una vez cargado los elementos a evaluar se deben seleccionar desde una lista, las posibles causas que dieron origen al daño, por lo tanto se debe tener coherencia entre las causas seleccionadas y el daño ocasionado. Una vez identificado el daño, el programa asigna una calificación que permite tener un valor cualitativo acorde



con el modelo escogido de Saaty, esta valoración está relacionada con el grado de severidad del daño.

Finalizando la evaluación de cada uno de los elementos que componen la superestructura, el programa realiza los cálculos internos y muestra el valor global de este sub criterio en un cuadro de texto tipo numérico.

EVALUACION SUPER ESTRUCTURA									
<b>Puente</b>									
Id Pte		Descripción Puente		Fecha Eval.		Id. Evaluador		Nombre del Evaluador	
<b>LUCES</b>									
Id Luz		Tipo de Super Estructura (ET)		Tipo de Sistema de Apoyo (EL)		Material		Calificación Total Super Estructura	
<b>Viga</b>									
Id Viga	Tipo Viga	Material	Tipo Apoyo	Cod	Causal	Cod	Tipo de daño	Calif.	
Calificación Total Vigas							Tipo de daño		
<b>Losa</b>									
Id	Descripción Losa	Material Losa	Cod	Causal	Cod	Tipo de daño	Calif.		
Calificación Total Losas							Tipo de daño		
<b>Pendolon</b>									
Id	Descripción Pendolon	Material Pendolon	Cod	Causal	Cod	Tipo de daño	Calif.		
Calificación Total Pendolones							Tipo de daño		

**Figura No. 7 Formulario de Evaluación de Super Estructura**

Así consecutivamente se adelanta la evaluación de daños en los elementos de la infraestructura, elementos funcionales, evaluación hidráulica, geotécnica, evaluación del Tránsito Promedio Diario, evaluación de la vulnerabilidad de la Red Vial Nacional y evaluación del valor estratégico:





## ARQUITECTURA DEL PROGRAMA

A continuación, se presenta el diagrama de identidad – relación de todas las tablas y formularios que contiene el programa:

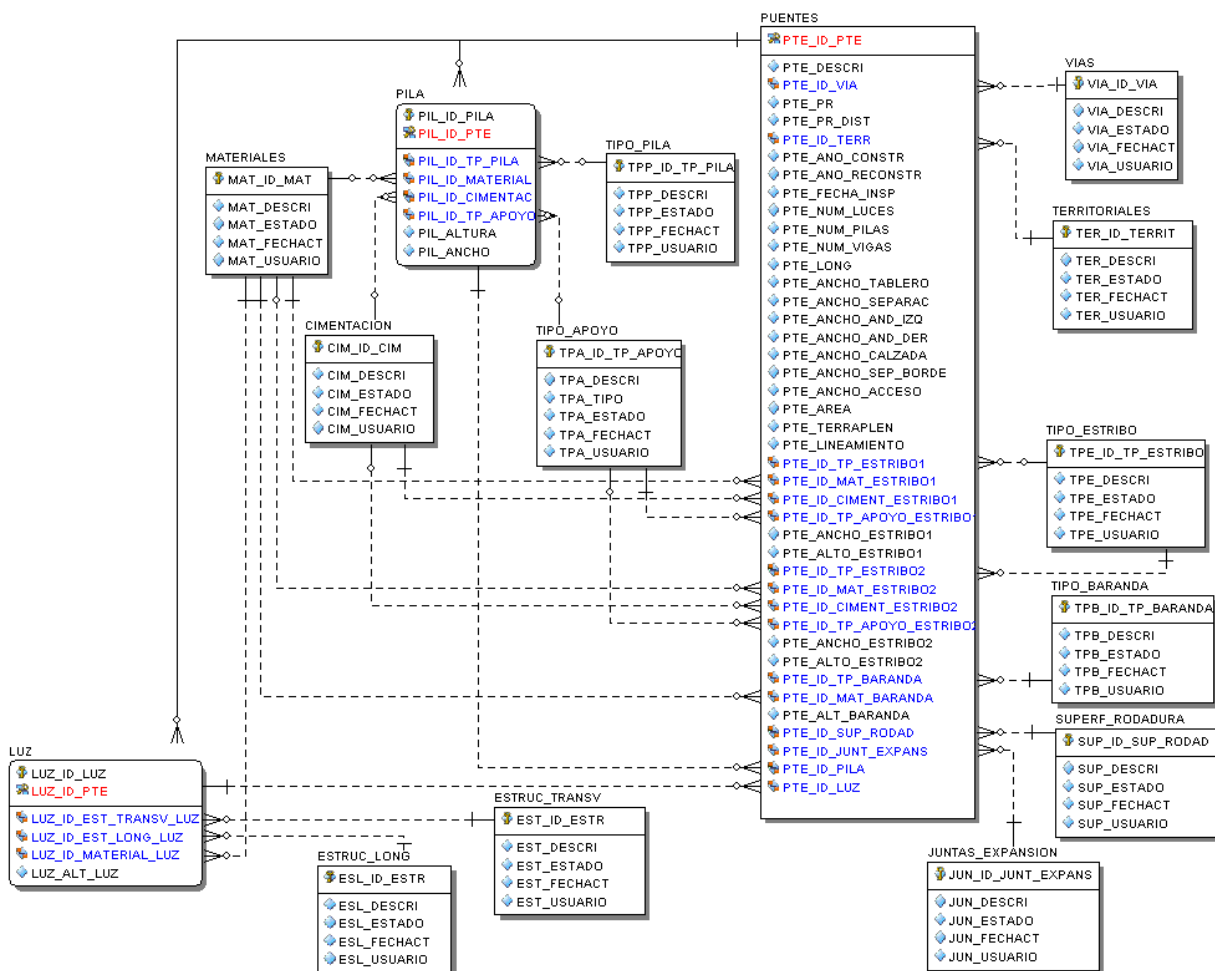


Ilustración 1 Algoritmo del programa

## RESULTADOS

Con la finalidad de realizar las pruebas de integridad de la evaluación y de definir los distintos parámetros de la metodología a continuación se presenta la información de una serie de cinco puentes, con diferentes características evaluadas con el



sistema SIPUCOL y al mismo tiempo evaluado por la metodología Saaty objeto de este proyecto.

Resultado de la evaluación por SIPUCOL:

Identificación	Nombre puente	Carretera	P.R.	# luces	Luz total	Material Superestr	Calif
01-2511-013.00	Tarazá	Los Llanos - Tarazá	122+0200	2	91.49	Acero	3
01-2511-008.00	Puqui	Los Llanos - Tarazá	102+0587	1	60.70	Acero y Concreto	3
06-6504-001.20	El Águila	Puerto Rico - Mina Blanca	9+0051	2	62.00	Concreto Presforzado	4
07-6211-009.00	Chichaca	Sogamoso - Aguazul	103+0692	1	22.00	Acero y Concreto	4
16-7506-009.00	Caño Grande	Calamar - San José del Guaviare	46+0170	1	16.20	Concreto Reforzado	2

Fuente: Elaboración propia extractado del informe SIPUCOL 2016

Resultado de la evaluación con el método de análisis multicriterio y utilizando la herramienta computación:

DETERMINACION DE ORDEN DE ALTERNATIVA		
JERARQUIA	PUENTE	PUNTAJE INDICADOR
1	El Águila	0.4270
2	Chichaca	0.3000
3	Taraza	0.1090
4	Puqui	0.0920
5	Caño Grande	0.0670

Fuente: Resultado de aplicación de la Herramienta computacional

La jerarquización se da ordenando de mayor a menor valor



Como se aprecia, la metodología aplicada de la evaluación con el método de análisis multicriterio, da un orden de priorización de acuerdo con la información obtenida en la evaluación y como resultado se obtuvo el puente Águila como prioritario, luego en el orden de alternativas sigue La Chichaca, Taraza, Puqui y Caño Grande; permitiendo el método realizar toma de decisión con criterio ingenieril en el caso de priorizar inversión.

Al comparar la evaluación por el método de Jerarquización Analítica con el resultado de SIPUCOL se obtiene lo siguiente:

PUENTE	JERARQUIA	Calif
El Águila	1	4
Chichaca	2	4
Tarazá	3	3
Puqui	4	3
Caño Grande	5	2

Fuente: Elaboración propia

El sistema brinda la oportunidad de definir una secuencia de jerarquización definiendo un orden lógico para la toma de decisiones, este sistema facilitará la determinación en la inversión por parte de los organismos encargados del mantenimiento y rehabilitación de puentes, reduciendo de esta forma el riesgo de falla en las estructuras que conforman el sistema vial, involucrando variables de riesgo estructural, geotécnico e hidráulico, variables de seguridad vial y valor estratégico de la estructura.



## **DISCUSIÓN**

La aplicación desarrollada en el presente proyecto usando primero una metodología y nuevos criterios de evaluación, es la base para implementar nuevos desarrollos tecnológicos como por ejemplo una aplicación APP (aplicación informática diseñada para ser ejecutada en teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos móviles) que involucre los mapas digitales del programa HERMES – INVIAS y/o del Servicio Geológico Colombiano – SGC, Sistema de Información Geográfica del IDU – SIGIDU(15), integrando la información geográfica del inventario físico referenciado (GPS) y la evaluación de puentes, por lo que se recomienda que el subsiguiente desarrollo intervenga un grupo interdisciplinario con carácter técnico, administrativo, gerencial y de programación computacional que faciliten y complementen el proyecto, lo que redundaría en el enriquecimiento en la toma de decisión y en la gestión de proyectos viales.

## **CONCLUSIONES**

La utilización del método de análisis multicriterio con el modelo de jerarquización analítica desarrollado por Thomas Saaty en la Universidad de Pennsylvania, permite realizar la evaluación de puentes incluyendo no solo la parte estructural sino que además involucra como gran aporte, sin dejar de ser uno que otro más relevante, otros criterios como el Hidráulico y el Geotécnico y factores de consecuencia por criterios de intervención y requerimientos de inversión; se convierte en una



herramienta fundamental para la toma de decisión en el momento de definir una inversión en rehabilitación, mantenimiento o reconstrucción de un puente.

El uso de sistemas computacionales permite desarrollos de herramientas más eficientes en el inventario, la evaluación y toma de decisión de la calificación de puentes seleccionados, relacionado con la inversión en puentes.

La evaluación de puentes con estos criterios, que a la fecha no han sido utilizados, permite resolver problemas de decisión con múltiples variables tomando información cualitativa y cuantitativa; siendo este proyecto el inicio y el aporte a nuevas implementaciones y metodologías en los procesos de los sistemas de gestión vial y en especial la administración o gestión de puentes.

Esta metodología permite al evaluador como gestor de un proyecto vial o al ingeniero experto o al dueño del proyecto o al ente gubernamental organizar o jerarquizar con un orden lógico o buen criterio ingenieril, en la definición de reparar la estructura e inversión prioritaria.



## REFERENCIAS

1. Saaty, T. (2000). Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS Publications. Universidad de Pittsburgh, U. S. A.
2. Perez Morales, R. (2015). Mejora al proceso de generación y selección de nuevos negocios en UNIRED. Proyecto de grado de Magister en Ingeniería de Negocios con Tecnologías de Información Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile:
3. T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process," McGraw-Hill Inc, pp. 17–34, 1980
4. <https://expert-choice.updatestar.com/es>
5. Pacheco J. y Contreras, E. (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Naciones Unidas - CEPAL Santiago de Chile, ISSN versión impresa 1680-886X ISSN versión electrónica 1680-8878.
6. INVIAS - Instituto Nacional de Vías y DCD-Directorado de Carreteras de Dinamarca (1996). Manual de inventario de puentes, Manual de inspección



- principal de puentes, Manual de inspección especial de puentes, Base de datos - SIPUCOL – 1996. Software v1.0, Base de datos - SIPUCOL - 2001 Software v2.0, Proyecto INVIAS y DCD, Bogotá, Colombia.
7. Boletín Técnico No. 3 Inventario de Puentes – (2016), Incluye las zonas Urbanas y Rurales del Distrito Capital, Instituto de Desarrollo Urbano – IDU
  8. Martínez Fernandez Susana. Técnicas de Investigación de Operativas en Ingeniería. (5/10/2018). España. <http://ocw.upm.es/Contenido/Materiales/t8.1toma-de-decisiones>.
  9. Galarraga J. Hert Marcelo, (sep 2008) Gestión de riesgos en gerenciamiento de puentes con modelo de decisión multicriterio discretas. *Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol 8(2) 151*. Recuperado desde: [http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/23-simposio\\_homenaje\\_al\\_dr\\_carlos\\_prato/23-simposio\\_homenaje\\_prato-19.pdf](http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/23-simposio_homenaje_al_dr_carlos_prato/23-simposio_homenaje_prato-19.pdf)
  10. Perez, A. Casañ. (2013). “La decisión multicriterio; Aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación,” Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España.
  11. Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías (septiembre 2004) Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Departamento de Ingeniería Civil - convenio de cooperación, proyecciones de la estabilidad del



sector Ibagué – Armenia ante eventos hidrológicos y sísmicos extremos, estudio de evaluación de riesgos de la red vial nacional, implementación del SERVIAL – fase IV. Bogotá D.C. – Colombia.

12. Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías - Oficina de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2005). Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Bogotá, D.C.
13. Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías. (octubre 2001) Manual para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y recomendaciones para la rehabilitación de puentes, centro de investigaciones en materiales y obras civiles – CIMOC. Santafé de Bogotá.
14. UNC, Universidad Nacional de Córdoba (2006). “Desarrollo y Aplicación de un Sistema de Gerenciamiento de Puentes para la República Argentina”, Informe Final, Convenio DNV – UNC. Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina.



15. Romero, C. (1996) Análisis de las decisiones multicriterio, Ingeniería de Sistemas para la defensa de España - Isdefe, Madrid, España: Primera Edición.
16. Muñoz, E. (2012). Ingeniería de puentes, colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga”, - Pontificia Universidad Javeriana, Tomo 2 pág. 35. Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Universidad de los Andes – INVIAS- Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, 2005.
17. Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto de Desarrollo del Área Sur del Campo Kinteroni- Nuevo Mundo, Repsol-Wals, Perú - 2007.
18. Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Desarrollo Urbano IDU de Bogotá D.C (agosto 2018).  
<http://idu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6950db8fa2d440ffbb3946c468eaae4a>.  
<https://www.idu.gov.co/page/transparencia/informacion-de-interes/siqi->