

# GESTIÓN DE RIESGO EN GERENCIAMIENTO DE PUENTES CON MODELOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO DISCRETAS<sup>1</sup>

Jorge Galarraga<sup>2</sup> y Marcelo Herz<sup>3</sup>

Resumen: Conservar más de 2000 puentes en las mejores condiciones de funcionamiento en un contexto de limitaciones presupuestarias requiere un sistema de gestión que asigne los recursos con criterios de prioridad. Los puentes son puntos críticos en la red vial porque su clausura o restricción de uso implica desconectar un tramo completo para todo o parte del tránsito (afecta movilidad y accesibilidad) y porque son potenciales lugares peligrosos (afecta la seguridad vial). Planteando como objetivo minimizar los riesgos de fallas de una red vial sujeto a un presupuesto dado para mantenimiento y rehabilitación de sus puentes, se presenta un caso que, no teniendo una solución analítica pura, puede ser tratado con modelos de decisiones multicriterio discretas. El trabajo documenta la generación de funciones de utilidad normalizadas para ordenar prioridades como parte decisoria de un sistema de gerenciamiento de puentes de la red vial argentina, utilizando el método de jerarquías analíticas. Se fundamenta la necesidad de generar un modelo de decisión “consensuable” por diferentes disciplinas incorporando la opinión directa de expertos y responsables de su efectiva aplicación en la ponderación de los múltiples criterios. El proceso desarrolla primeramente una estructura jerárquica de criterios y subcriterios distinguiendo las causas de los riesgos (falla estructural, falla por efectos hidráulicos, falla de seguridad vial) y el tipo de consecuencias (económicas, sociales, ambientales). La valoración de preferencias genera por cada individuo opinante una matriz de comparaciones por pareja de factores escalada desde igual grado de preferencia a extremadamente fuerte grado de preferencia por uno de los factores. Los expertos fueron informados de los criterios que determinan los puntajes de cada indicador, y establecidas las comparaciones de a pares se realizó el proceso de normalización de la matriz para la obtención de los pesos relativos de cada factor en la función de utilidad y el cálculo de la relación de congruencia (índice de congruencia/índice aleatorio) para verificar la consistencia individual de los juicios, que en todos los casos resultó satisfactoria. Finalmente se obtuvo la función lineal de utilidad aditiva representativa del grupo, que al resultar congruente a nivel grupal no requirió la realización de nuevas rondas de valoración de preferencias, y se incorporó al sistema de gestión de mantenimiento. Con una metodología conceptualmente sólida y operativamente simple, la generación del modelo de decisión multicriterio basado en jerarquías analíticas viabilizó la aceptación técnico-política de la parte más sensible del proceso: el método decisorio de ordenamiento de prioridades en una problemática y en un organismo complejo.

**Palabras claves:** decisiones multicriterio, gerenciamiento de puentes, jerarquías analíticas, riesgo.

## RISK ANALYSIS IN A BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM WITH MULTI-CRITERIA DECISION MODELS

Abstract: Keeping more than 2000 bridges in the best operating conditions in a context of budget constraints requires a management system to allocate resources efficiently. Bridges are critical points in the road network because its closing or restriction of use involves disconnecting a road segment to part or all traffic (affecting mobility and accessibility) and because they are potential dangerous places (affects road safety). A road network, under a given budget for maintenance and rehabilitation of its bridges, with the objective of

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 17 de junio de 2008 y aceptado el 9 de septiembre de 2008.

<sup>2</sup> Docente Investigador Titular, Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mención Transporte, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: jorgala@efn.uncor.edu

<sup>3</sup> Profesor Titular, Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mención Transporte, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: mherz@efn.uncor.edu

minimizing failure risks, can be considered a case that can be analyzed with multi-criteria decision models. The work documents the generation of normalized utility functions to determine priorities as part of a bridge management system of the Argentinean national road network, using the Analytic Hierarchy Process. It is based in the need to generate a decision model acceptable for different disciplines incorporating the views of experts and directly responsible for its effective implementation in the weighting of multiple criteria. The process develops a hierarchical structure of criteria and sub criteria distinguishing the causes of risks (structural failure, failure by hydraulic effects, road safety failure) and the kind of consequences (economic, social, environmental). The valuation of preferences by each expert generates an array of paired comparisons of factors varying from equal degree of preference to extremely strong degree of preference for one factor. The experts were informed of the criteria that determine the scores of each indicator. Provided the paired comparisons the relative weights of each factor were obtained and the consistency ratio (consistency index / random index) was calculated. Finally the linear additive utility function representative of the group was obtained. The level of consistency was adequate and therefore it was not necessary to carry out further rounds of valuation of preferences, and the utility functions were incorporated to the bridge management system. With a methodology conceptually adequate and operationally simple, the generation of multi-criteria decision models based on analytic hierarchy process permitted the technical and political acceptance of the most sensitive part of the process: ordering priorities in a complex problem inside a government institution.

**Keywords:** analytic hierarchy process, bridge management system, multi-criteria decision analysis, risk.

## **GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE PUENTES DE REDES VIALES**

Con la visión del desarrollo sustentable se establecen para el transporte carretero objetivos económicos, sociales y ambientales que pueden explicitarse en términos de movilidad eficiente (costos de transporte), seguridad vial (accidentes), accesibilidad (integrar territorio) y preservación ambiental (contaminación, capacidad soporte).

Los puentes son potenciales puntos vulnerables en la red vial porque la cadena es tan fuerte como el eslabón más débil, y la clausura o restricción de uso de un puente, sea por razones estructurales o hidráulicas, significa desconectar un tramo completo para todo o parte del tránsito, afectando la movilidad y la accesibilidad. También son potenciales puntos negros en la red si presentan localmente condiciones diferentes a las generales del tramo, afectando la seguridad vial, y los puentes son potenciales generadores de impactos ambientales cuando se ubican en zonas sensibles.

En la red vial nacional de Argentina existen más de 2000 puentes que deben conservarse en las mejores condiciones de funcionamiento y efectividad para el sistema de transporte carretero. Esto puede enfocarse como un problema logístico de mantenimiento de bienes de capital, cuya solución se puede plantear minimizando la función de costos sujeto a cumplir un estándar de mantenimiento establecido (presupuesto sin restricciones) o minimizando la función de riesgo de fallas sujeto a cumplir un presupuesto establecido (presupuesto con restricciones).

Las estrategias de conservación identifican el mantenimiento preventivo (anticipado), correctivo programable y correctivo de emergencia, con costos generalmente crecientes cuando el mantenimiento es diferido en el tiempo. La confiabilidad del sistema es la probabilidad que el sistema se desempeñe satisfactoriamente durante un periodo determinado (tiempo medio entre ciclos).

Cuando no hay limitaciones presupuestarias para asegurar una alta confiabilidad de que no habrán de producirse fallas en la producción, los sistemas de gestión de mantenimiento que han mostrado costo-efectividad de largo plazo son los que priorizan políticas de mantenimiento preventivo respecto al correctivo programado y de este último respecto al correctivo de emergencia. El criterio es fijar un estándar con un nivel de precaución satisfactorio, tratando de lograrlo a costo mínimo, siendo aplicable la metodología de costo-efectividad, donde el presupuesto total es variable.

Cuando existen limitaciones presupuestarias, el criterio es asignar los recursos disponibles para mantenimiento tratando de minimizar el riesgo de fallas priorizando aquellas que más afecten al sistema. Este es el caso de los puentes de la red vial nacional, donde el criterio de optimización requiere maximizar la efectividad de un presupuesto dado.

En la conservación de puentes pueden distinguirse las tareas de mantenimiento de rutina de las tareas que involucran obras de rehabilitación. Según las disponibilidades presupuestarias las tareas de mantenimiento de rutina pueden ejecutarse como preventivas o correctivas programables, en tanto las obras de rehabilitación son correctivas programables o correctivas de emergencia.

Los recursos presupuestarios destinables a obras de rehabilitación, al no ser suficientes para todas las necesidades identificadas y presupuestadas, deben asignarse con criterios de prioridad en el cronograma de inversiones, por lo cuál quedarán puentes sin rehabilitación programada como mínimo hasta el siguiente año.

## **MODELO DE DECISIÓN PARA GESTIÓN DE RIESGOS**

El Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil, de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), dirigido por el Dr. Carlos A. Prato, desarrolló la metodología para el sistema de Gerenciamiento de Puentes de la red nacional (UNC, 2006), a través de un Convenio con la Dirección Nacional de Vialidad.

El citado desarrollo planteó la necesidad de definir la metodología de los siguientes módulos: captura de datos, evaluación de estado, alternativas de obras de mantenimiento y rehabilitación, y selección de prioridades (dónde y qué obras hacer el próximo año).

Con la visión del desarrollo sustentable se establecen para el transporte carretero objetivos económicos, sociales y ambientales, que pueden explicitarse en términos de movilidad eficiente (costos de transporte), seguridad vial (accidentes), accesibilidad (integrar territorio), y preservación ambiental (contaminación, capacidad soporte)

Estos módulos son análogos al sistema de gestión de pavimentos, pero para la selección de prioridades se presenta una importante diferencia. Las alternativas para mantenimiento y rehabilitación de una red de pavimentos son optimizables en términos puramente económicos, mediante análisis beneficio-costos, considerando los costos presente de construcción, mantenimiento y operación de los usuarios en el ciclo de vida de la red para las distintas estrategias de intervención que puedan formularse. El Banco Mundial desarrolló en los años 1970's la base conceptual, experimental y computacional del modelo "Highway Design and Maintenance", una metodología de evaluación específica para redes viales que se ha venido actualizando y cuyo uso se ha generalizado con la versión del modelo HDM-4. La optimización se realiza con el módulo EBM ("Executive Budgeting Model"), que maximiza el valor presente neto para un presupuesto restringido, utilizando el método beneficio-costos incremental (PIARC, 2000).

Las alternativas para mantenimiento y rehabilitación de puentes no son optimizables en términos puramente económicos, debido a la dificultad de cuantificar los riesgos estructurales e hidráulicos que pueden colapsar el puente, y a la dificultad de plantear una función de utilidad "consensuable" que incluya valores monetarios de intangibles.

Para la selección de prioridades se presenta así un proceso de toma de decisión que no tiene soluciones analíticas puras sino que requiere de ponderaciones de diversos criterios, en este caso estructurales, hidráulicos, de seguridad vial, económicos, etc., tratable con análisis de decisiones multicriterio.

En esta área pueden mencionarse varios métodos (Figueira et al., 2005), destacándose los métodos de relaciones de superación como ELECTRE ("Elimination Et Choix Traduisant la Réalité"), PROMETHEE ("Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations") y los métodos de utilidad multiatributo como AHP ("Analytic Hierarchy Process"). Estos métodos se basan en comparaciones binarias de alternativas, siendo ELECTRE y PROMETHEE de la escuela europea de decisión multicriterio y el método de las jerarquías analíticas (Saaty, 1977) de la escuela americana.

Dado el problema de trabajar con presupuestos limitados, se planteó un modelo de decisión para gestión de riesgos con el siguiente escenario para la selección de prioridades: comparar el riesgo de la red en un horizonte de un año con y sin la obra de rehabilitación. Por ejemplo, si la obra requerida se difiere en el tiempo, los riesgos de mayores deterioros en el próximo año podrían requerir clausura del puente, o restricciones de uso, o altos costos de reparación correctiva de emergencia, o adelantar la obra con costos similares a lo presupuestado, etc.

Considerando las diversas disciplinas involucradas, cada una con sus métodos experimentales y analíticos que dejan estrecho margen para discusión, pero con gran dificultad organizacional para integrar los resultados en un proceso de

decisión de prioridades, se trató de generar un modelo “consensuable”, que incorporara la opinión directa de expertos y responsables de las decisiones para su efectiva aplicación en la ponderación de los múltiples criterios.

Para medir la efectividad en la minimización del riesgo se utilizaron funciones lineales de utilidad normalizadas y para ordenar prioridades como parte decisoria del sistema de gerenciamiento de puentes de la red vial nacional, el modelo se basó en el método AHP o método de las jerarquías analíticas. Este método tiene antecedentes en aplicaciones similares (Min, 1994; Thompson, 1994; Meade et al., 1998).

## **ESTRUCTURA JERÁRQUICA DEL PROCESO DE DECISIÓN**

El proceso de formulación del modelo comienza con la identificación de variables relevantes y una primera estructura jerárquica del proceso de decisión, con criterios y subcriterios que establezcan categorías homogéneas para la comparación de los factores. Esta estructura debe ser aceptada por los expertos y responsables de las decisiones antes de pasar a la etapa de valoración de preferencias

Se consideraron inicialmente 12 indicadores relevantes para la jerarquización:

- Estado del puente
- Costo de la reparación
- Beneficios para la sociedad (disminución de costos de los usuarios)
- Nivel de servicio y seguridad vial
- Itinerario alternativo
- Factor geográfico
- Valor estratégico
- Restricciones geométricas de la vía
- Vulnerabilidad hidráulica
- Aspectos ambientales
- Vulnerabilidad de las fundaciones
- Grado de importancia dentro del corredor vial

Establecer los criterios y subcriterios permite evitar el problema de independencia de las alternativas irrelevantes. Se consideró separar el factor costo de los atributos que hacen a la efectividad para minimizar el riesgo (minimizar riesgo = beneficios), pues es recomendable en decisiones multiatributo tratar por separado los costos, en una etapa final

También se consideró diferenciar en la función de daño los indicadores que hacen a la probabilidad de eventos de distinta severidad para el puente con los indicadores que hacen a las consecuencias en la red y en la sociedad si tal evento ocurre.

Los indicadores fueron entonces clasificados por disciplinas de la ingeniería civil como estructuras, hidráulica, vialidad y por tipo de consecuencias como económicas, sociales (accidentes, geopolítica) y ambientales, quedando consolidados en tres niveles.

### **Primer nivel: Factores de riesgo**

Criterio de intervención por

- Riesgo de falla estructural, asociado al estado del puente. Indicador E
- Riesgo de falla por hidráulica, asociado a salidas de servicio por causas hidráulicas o peligros naturales. Indicador H
- Riesgo de seguridad vial, asociado con los potenciales accidentes de tránsito. Indicador SV

La primera categoría (indicadores de riesgo) pretende estimar el nivel de riesgo que implicaría postergar la inversión para un próximo período.

## Segundo nivel: Factores de consecuencias

Subcriterio de intervención por

- Nivel de tránsito, asociado a la importancia económica del arco en la red vial. Indicador T
- Vulnerabilidad de la Red, relacionada con el perjuicio a los usuarios en caso de inhabilitación del puente. Indicador V
- Valor Estratégico, asociado a la importancia social, geopolítica, y ambiental del puente en la red. Indicador VE

La segunda categoría (indicadores de consecuencia) está orientada a determinar la importancia del perjuicio, en caso de que la falla se produzca.

## Tercer nivel: Costo de la reparación

Subcriterio de ordenamiento de prioridades por costo de la reparación (inversión requerida).

La tercera categoría contempla el consumo presupuestario, aportando información adicional importante que puede ser empleada para la definición de prioridades, ya que entre dos obras con iguales riesgos y consecuencias, la que requiera menor inversión presenta ventajas comparativas.

## FUNCIONES LINEALES DE UTILIDAD

Para integrar los diferentes indicadores se emplean funciones de utilidad (o “disutilidad”) lineal con factores ponderados de la importancia relativa de los indicadores.

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

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

Según la estructura jerárquica planteada, se definen tres indicadores:

### Indicador de riesgo ponderado del puente “ $i$ ”

$$IRP_i = w_1 E_i + w_2 H_i + w_3 SV_i \quad (2)$$

donde  $IRP_i$  es el indicador de riesgo ponderado del puente “ $i$ ”,  $E_i$  es la calificación del indicador de riesgo de falla estructural en el puente “ $i$ ”,  $H_i$  es la calificación del indicador de riesgo de falla hidráulica en el puente “ $i$ ”,  $SV_i$  es la calificación del indicador de riesgo de seguridad vial en el puente “ $i$ ”,  $w_1, w_2, w_3$  son factores de ponderación de la importancia relativa de  $E, H, SV$  como indicadores de riesgo del puente.

### Indicador de consecuencias por fallas del puente “ $i$ ”

$$ICP_i = w_4 T_i + w_5 V_i + w_6 VE_i \quad (3)$$

donde  $ICP_i$  es el indicador de consecuencias ponderado del puente “ $i$ ”,  $T_i$  es el indicador de consecuencia por nivel del tránsito en el puente “ $i$ ”,  $V_i$  es la calificación del indicador de consecuencia por vulnerabilidad de la red (perjuicio por desvíos) dada la inhabilitación del puente “ $i$ ”,  $VE_i$  es el indicador de consecuencia por valor estratégico del puente “ $i$ ”,  $w_4, w_5, w_6$  son factores de ponderación de la importancia relativa de  $T, V, VE$  como indicadores de consecuencia del puente.

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

$$ICMR_i = C_i \quad (4)$$

donde  $C_i$  es el monto del costo de mantenimiento y rehabilitación en pesos.

Dado que el indicador de consumo presupuestario no se propone para combinar con otro, puede adoptarse como más representativo directamente el monto de la inversión en la obra de reparación en pesos.

La utilidad del indicador está asociada a restricciones presupuestarias. Por una parte puede considerarse que para obras de similares riesgos y consecuencias alcanzaría mayor prioridad aquella de menor inversión. Por otra parte pueden plantearse escenarios de maximización de la cantidad de obras ó de los indicadores de consecuencia con un monto total de inversión predeterminado.

La división en categorías también permite que los puntajes y pesos relativos puedan establecerse separadamente y con diferente objetivo para cada una de ellas.

## **CALIFICACIÓN DE INDICADORES**

La escala de calificaciones debe definir para cada indicador de las funciones de utilidad las condiciones técnicas asociadas a cada nota con la mayor objetividad posible, para que resulten homogéneas las bases de comparación de puentes calificados por distintos operadores. Además los criterios de calificación deben ser generados y/o aceptados por los expertos y responsables de las decisiones que intervengan en la etapa de valoración de preferencias, porque es necesario para desarrollar un juicio sobre la importancia relativa de los indicadores.

### **Indicador de riesgo**

La calificación de los indicadores de riesgo describe la probabilidad de eventos de distinta severidad para el puente dado su estado estructural (E), su estado hidráulico (H), y su estado vial (SV). Cada indicador es calificado de manera independiente.

A mejor estado mayor nota, por lo que el puntaje 1 corresponde a máximo riesgo y el puntaje 10 corresponde a mínimo riesgo. Las calificaciones se asocian con las siguientes situaciones:

**1** Muy alta posibilidad de clausura 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).

**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).

**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 directa. Ancho de la calzada del puente menor a 8,30 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).

**7** Sin sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente. Deficiencias en los elementos de guiado y seguridad pasiva del puente. Barandas de defensa, veredas y barandas peatonales, señalización.

**10** Requiere solamente obras de mantenimiento de rutina.

Las calificaciones de riesgo por razones estructurales, hidráulicas y por seguridad vial se encuentran a cargo de ingenieros especialistas y como consecuencia de un proceso de inspección previo, también objeto del mismo estudio (UNC, 2006).

El proceso aplicado sobre los indicadores de riesgo (asumiendo una escala de 1 a 10 y que las notas más bajas implican mayor riesgo) posibilita establecer umbrales de puntajes altos (bajo riesgo) para obras que solamente requieren mantenimiento de rutina y por lo tanto no es necesario evaluarlas con los indicadores de consecuencia, que exigen un mayor esfuerzo de recolección de datos.

Los umbrales se definieron en cinco puntos para cualquiera de los indicadores individuales de riesgo (estructura, hidráulica, seguridad vial) 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). 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.

### **Indicadores de consecuencia**

La calificación de los indicadores de consecuencia describe la situación resultante en la red y en la sociedad si ocurre el evento de riesgo. Cada indicador es calificado de manera independiente. Las calificaciones se encuentran a cargo de ingenieros especialistas

A mejor situación mayor nota, por lo que el puntaje 1 corresponde a la peor consecuencia y se ha dado puntaje 9 a la menor consecuencia. Las calificaciones se asocian con las siguientes situaciones:

#### Indicador de consecuencia por nivel de tránsito

El nivel de tránsito es un primer indicador asociado a la importancia económica del perjuicio que generaría la clausura ó limitación de carga por falla estructural y/o hidráulica y también para el caso de riesgo por seguridad vial.

En efecto, el costo por cierre de ruta está directamente asociado a la cantidad de usuarios que se encontrarán perjudicados por la situación. Asimismo, la cantidad de accidentes en un puente angosto está directamente asociada al volumen de tránsito circulante

Para la asignación de puntajes se han determinado umbrales de tránsito que permitan distribuir razonablemente el total de tramos de la red nacional. Se empleó como variable de clasificación al Tránsito Diario Medio Anual (TMDA).

Calificación: (Máxima consecuencia = 1; Mínima consecuencia = 9).

**1** TMDA mayor a 5000 vehículos/día. (Muy alto) Aproximadamente el 10% de los tramos de la red nacional se encuentra en este nivel de tránsito.

**3** TMDA entre 3000 y 5000 vehículos/día. Aproximadamente el 18% de los tramos de la red nacional se encuentra en este nivel de tránsito.

**5** TMDA entre 1500 y 3000 vehículos/día. (Medio) Aproximadamente el 30% de los tramos de la red nacional se encuentra en este nivel de tránsito.

**7** TMDA entre 500 y 1500 vehículos/día. Aproximadamente el 32% de los tramos de la red nacional se encuentra en este nivel de tránsito

**9** TMDA menor a 500 vehículos/día. (Bajo) Aproximadamente el 10% de los tramos de la red nacional se encuentra en este nivel de tránsito.

Variaciones intermedias (**2 – 4 – 6 – 8**). En base a la composición, restar 1 cuando el porcentaje de vehículos pesados (camiones + ómnibus) supera el 20% del TMDA.

#### Indicador de consecuencia por vulnerabilidad de la red.

Pretende estimar el impacto que produciría la clausura total ó por limitación de carga de un puente en la red. A mayor longitud del desvío, mayor vulnerabilidad. En tal sentido resulta importante considerar no solamente la longitud de la alternativa existente más conveniente, sino también la posibilidad de realizar o no obras especiales para rehabilitar el tránsito (Vado, puente Bailey, etc.). No está relacionado con la seguridad vial, por lo que sólo es aplicable para obras requeridas por riesgos estructurales o hidráulicos.

Se considera el aumento del tiempo de viaje por la longitud y tipo del desvío, que condicionan la velocidad de circulación (Desvío tipo 1: by pass provisorio o zona densamente urbanizada, Desvío tipo 2: desvío por camino no pavimentado o zona urbana normal, Desvío tipo 3: desvío por camino pavimentado).

Calificación: (Máxima consecuencia = 1; Mínima consecuencia = 9).

**1** Tiempo de viaje adicional por desvío mayor a 120 minutos (vulnerabilidad muy alta).

**5** Tiempo de viaje adicional por desvío 30 minutos (vulnerabilidad alta).

**9** Tiempo de viaje adicional por desvío menor a 7 minutos (vulnerabilidad normal).

Variaciones intermedias (**2 – 3 - 4 – 6 -7 - 8**). A las clasificaciones restar uno (1) ó dos (2) puntos de acuerdo a la magnitud estimada de las obras que pudieran requerirse para habilitar los correspondientes desvíos. Si el monto requerido es nulo ó mínimo (perfilado con motoniveladora) el indicador original no se modifica, a medida que la inversión requerida para habilitar los desvíos aumenta, también se incrementa el puntaje a descontar.

Indicador de consecuencia por valor estratégico.

Pretende reflejar la importancia de los valores socioeconómicos, ambientales y geopolíticos que tiene en la red el tramo dónde se ubica el puente. El valor estratégico se establece aquí ordenar prioridades de mantenimiento y rehabilitación de puentes, por lo se refiere a la situación actual del tramo y no a la situación potencial (planificación)

La DNV de Argentina tiene una red de 38400 km de los cuáles 31100 km son pavimentados y 7300 km son no pavimentados, y parte de la red nacional está caracterizada como corredores troncales. Se califica el Valor estratégico (*VE*) a partir de un valor base por la jerarquía del tramo en la red (*VE base*), modificado por la situación territorial en caso de zonas urbanas (*ZU*), zonas de frontera (*ZF*), y sensibilidad ambiental (*A*).

$$VE = VE \text{ base} - ZU - ZF - A \quad (5)$$

Calificación: (Máxima consecuencia = 1; Mínima consecuencia = 9).

Se asigna *VE base Normal* (9) a tramos no pavimentados y *VE base Alto* (5) a tramos pavimentados de corredores troncales. Los modificadores *ZU*, *ZF* y *A* pueden aumentar la prioridad por consecuencia restando de 1 a 4 puntos cada uno, pero la suma de los tres modificadores no puede superar el valor cuatro (4), esto es para no superponer efectos que distorsionen el *VE base*, impidiendo valores negativos.

Se resta por Zona Urbana (*ZU*) a puentes de rutas nacionales ubicados en ciudades con más de 100000 habitantes (4) hasta en comunas con menos de 2000 habitantes (1) fundamentado en un rol socioeconómico que trasciende la función vial. Para puentes en áreas rurales no se restan puntos.

Se resta por Zona de Frontera (*ZF*) a puentes en corredores internacionales a menos de 100 km de la frontera (4) hasta a más de 400 km de una frontera (1). No hay caso de valor cero, como mínimo debe restarse un punto.

Se resta por Sensibilidad Ambiental (*A*) a puentes emplazados en sitios con alto nivel de sensibilidad del medio receptor según las características físicas, bióticas y antrópicas, como áreas naturales protegidas o poblaciones vulnerables (4), y a puentes en sitios con moderado nivel de sensibilidad (2). Para puentes ubicados en sitios de baja sensibilidad ambiental no se restan puntos.

## **JUICIO SOBRE LA IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS INDICADORES**

Cuando en una evaluación están siendo considerados varios factores por una persona o por un grupo de personas, tratarán de:

1) desarrollar un juicio sobre la importancia relativa de estos factores

2) aspirar a que su juicio final sea lo más objetivo posible.



La valoración de preferencias para obtener los pesos de ponderación de cada indicador en las funciones de utilidad se realizó con el método de jerarquías analíticas que implica realizar comparaciones de a pares de indicadores, desde igual grado de preferencia por ambos (1 de la escala de Saaty para ambos factores) hasta extremadamente fuerte grado de preferencia (9 de la escala de Saaty para el factor preferido). El procedimiento numérico continúa desarrollando una matriz de la comparación por parejas, normalizando la matriz resultante, obteniendo los pesos relativos de los indicadores para finalmente comprobar la relación de congruencia alcanzada, o sea la consistencia de los juicios.

La principal contribución del método es realizar una comprobación de consistencia de los juicios, que permite reevaluar las comparaciones pareadas en caso de inconsistencia individual, y en el caso de inconsistencia del grupo, permite identificarlas y trabajarlas en sucesivas rondas para llegar a consensos razonables.

Desde la perspectiva organizacional, como los juicios comparativos varían según las preferencias de quien los emita, y están influenciados por sus disciplinas de origen y/o por sus creencias, para que los pesos de ponderación resulten aceptables deben ser generados por los expertos y responsables de las decisiones, primero en forma individual y luego integrados grupalmente, realizando nuevas rondas de valoración de preferencias si las dispersiones dificultan el consenso.

En el caso del desarrollo del sistema de gerenciamiento de puentes se adoptó un procedimiento piloto basado en encuestar a cuatro expertos de la Organización. Se solicitó comparar separadamente los indicadores de riesgo y los indicadores de consecuencia. Como en ambos casos los indicadores son tres (3), se debieron realizar tres comparaciones apareadas en cada categoría.

Para expresar el nivel de grado de preferencia se requiere emplear valores enteros (de 1 a 9) de acuerdo a la siguiente escala:

<u>Nivel de Preferencia</u>	<u>Descripción</u>
1	El mismo grado de preferencia
3	Un grado moderado de preferencia
5	Un fuerte grado de preferencia
7	Un grado muy fuerte de preferencia
9	Un grado extremadamente fuerte de preferencia
2-4-6-8	Preferencias intermedias en la serie de enteros citada

Las preguntas eran del tipo siguiente:

*Importancia del riesgo estructural respecto al riesgo hidráulico:*

*Consigne en la columna del indicador preferido el número que cuantifica su "Grado de Preferencia", según la escala de 2 a 9. Si se considera indiferente entre ambos indicadores marque 1 en cualquiera de las columnas.*

	<i>Riesgo Estructural</i>	<i>Riesgo Hidráulico</i>
<i>Grado de Preferencia</i>		

Tratando de facilitar la asignación de preferencias se consignaron en las planillas los criterios que determinan la calificación de cada indicador (para comprensión de lo que se compara), y se incluyó un análisis orientador para la evaluación, del tipo siguiente:

*Existen dos puentes que han obtenido diferente puntaje en riesgo por falla estructural y en riesgo por falla hidráulica, según la siguiente tabla:*

	<i>Puntaje riesgo estructural</i>	<i>Puntaje riesgo hidráulico</i>
<i>Puente A</i>	3	5
<i>Puente B</i>	5	3

*Todos los demás indicadores son iguales para ambos puentes. El presupuesto de la DNV (Dirección Nacional de Vialidad) para este año permite realizar únicamente uno de los proyectos de mejora. ¿Cuál recomendaría ejecutar?*

*Si resulta indiferente entre ambos no tiene preferencia por ninguno (1)*

*Si prefiere el Proyecto para Puente A tiene moderada preferencia por la falla estructural (3)*

*Si prefiere el Proyecto para Puente B tiene moderada preferencia por la falla hidráulica (3)*

*Existen dos puentes que han obtenido diferente puntaje en riesgo por falla estructural y en riesgo por falla hidráulica, según la siguiente tabla:*

	<i>Puntaje riesgo estructural</i>	<i>Puntaje riesgo hidráulico</i>
<i>Puente A</i>	3	7
<i>Puente B</i>	7	6

*Todos los demás indicadores son iguales para ambos puentes. El presupuesto de la DNV para este año permite realizar únicamente uno de los proyectos de mejora. ¿Cuál recomendaría ejecutar?*

*Si prefiere el Proyecto para Puente B tiene extremadamente fuerte preferencia por la falla hidráulica (9)*

La comparación de la importancia de a pares de indicadores se basa en tratar de identificar la tasa marginal de sustitución de un indicador por otro, es decir en qué magnitud debiera variar un indicador para que el otro se modifique en una unidad y la prioridad de la obra se mantenga.

## **PONDERACIÓN DE LOS INDICADORES**

Las comparaciones de a pares tratadas en el apartado anterior fueron realizadas por cuatro (4) expertos. Los expertos fueron seleccionados por su conocimiento sobre riesgos y consecuencias de fallas de puentes.

Establecidas las comparaciones de a pares por los expertos se realizó el proceso de normalización de la matriz para la obtención de los pesos relativos y la comprobación de la relación de congruencia.

Para el caso de ponderar tres indicadores mediante comparaciones binarias resultan matrices como la matriz A

$$A = \begin{vmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

En la matriz A, el elemento  $a_{12}$  representa la importancia relativa del indicador 1 respecto al indicador 2 ( $w_1/w_2$  o peso relativo del indicador 1 respecto al indicador 2).

En el caso ideal se tendría  $w_i = a_{ij} w_j$  (7)

Con los juicios reales se obtiene un vector línea cuyos elementos representan la dispersión estadística del juicio elaborado sobre el valor de “ $w_i$ ” estimado. O sea:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (8)$$

Si la matriz “ $A$ ” consiste en juicios “precisos” y la matriz “ $A'$ ” es una matriz de juicios reales (no necesariamente consistentes), se puede plantear:

$$A' \cdot w = \lambda \cdot w \quad (9)$$

Si “ $A'$ ” es una matriz consistente, la ecuación anterior tiene solución única y en ella “ $w$ ” es su vector propio y “ $\lambda$ ” es el valor característico o valor propio. El autovector “ $w$ ” es el “vector de pesos ponderados” que surge del juicio de las comparaciones.

La comprobación de consistencia se basa en que cuanto más parecido sea “ $\lambda$ ” al número de alternativas que están siendo analizadas ( $n$ ), más consistente es el juicio de valor elaborado, siendo siempre  $\lambda \geq n$ .

La Razón de Congruencia (RC) es el desvío de la consistencia corregido por la aleatoriedad generada por el tamaño de la matriz. La razón de congruencia debiera ser  $< 0.10$  para un decisor coherente (Saaty, 1997).

El desvío de la consistencia puede ser representado por el Índice de Congruencia (IC):

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (10)$$

La aleatoriedad es representada por el Índice Aleatorio (IA) que es la media del IC en matrices aleatoriamente generadas en función del tamaño de la matriz. Para  $n = 3$ ,  $IA = 0,58$ .

Si para la “Razón de Congruencia” ( $RC = IC/IA$ ) resulta un valor menor o igual a 0,10 se considera que la elaboración de la matriz de juicios de valor fue hecha de manera coherente, respetando todas las relaciones transitivas del tipo: si la alternativa “ $i$ ” tiene un peso superior a la “ $j$ ” y a su vez ésta tiene un peso superior a la “ $k$ ”, la “ $i$ ” deberá ser más pesada que la “ $k$ ”.

Luego de normalizar las matrices para los indicadores de riesgo y de consecuencia, se promediaron los valores por filas, siendo éstos los pesos relativos buscados, explicitando las preferencias subjetivas tanto individuales como del grupo tomado en su conjunto, según muestra la Tabla 1.

**Tabla 1: Factores de ponderación.**

Experto	INDICADORES DE RIESGO			INDICADOR DE CONSECUENCIA		
	E (Estruc.)	H (Hidrául.)	SV (S.Vial)	T (Tráns.)	V (Vulner.)	VE (Val. Est.)
A	0,400	0,400	0,200	0,286	0,143	0,571
B	0,357	0,357	0,286	0,455	0,455	0,091
C	0,286	0,286	0,429	0,438	0,238	0,323
D	0,250	0,250	0,500	0,385	0,308	0,308
Grupo	0,323	0,323	0,354	0,391	0,286	0,323

La comprobación de las relaciones de congruencia en todos los casos resultó satisfactoria, y los factores de ponderación surgidos como grupo conjunto fueron aceptados por unanimidad por lo que no fue necesario hacer nuevas rondas.

## MODELO DE SELECCIÓN DE PRIORIDADES

La gestión de riesgos en el sistema de gerenciamiento de puentes queda entonces planteada con medidas de la efectividad en la minimización del riesgo para todos los puentes con obras de rehabilitación definidas y presupuestadas, mediante un método de jerarquías analíticas con funciones de utilidades multiatributos. El proceso de selección de prioridades refleja la comparación del riesgo de la red en un horizonte de un año, con y sin la obra de rehabilitación, evaluado por un grupo experto.

Todos los puentes son calificados con los indicadores de riesgo estructural ( $E$ ), hidráulico ( $H$ ) y de seguridad vial ( $SV$ ), calculando el indicador de riesgo ponderado ( $IRP$ ) con la expresión:

$$IRP = 0,32 E + 0,32 H + 0,36 SV \quad (11)$$

Para aquellos puentes que resulten con riesgo alto debido a calificaciones iguales ó menores a cinco (5) en  $E$ ,  $H$ , o  $SV$  o calificación igual o menor a siete (7) en  $IRP$ , se califica el puntaje de los indicadores de consecuencia por tránsito ( $T$ ), vulnerabilidad ( $V$ ) y valor estratégico ( $VE$ ), calculando el indicador de consecuencia ponderado con la expresión:

$$ICP = 0,39 T + 0,29 V + 0,32 VE \quad (12)$$

Para el caso de que la obra califique con riesgo alto solamente por seguridad vial, en el indicador de consecuencia ponderado no participa la vulnerabilidad de la red, calculando el  $ICP$  con la expresión:

$$ICP = 0,55 T + 0,45 VE \quad (13)$$

El procedimiento se muestra en la Figura 1.

El ordenamiento de prioridades de inversión resulta de menor a mayor  $ICP$ ; a menor puntaje, mayor prioridad.

El indicador de costo de mantenimiento y rehabilitación ( $ICMR$ ), que es directamente el monto de las obras de rehabilitación ó mejora, establece la línea de corte, o sea cuántas obras según el orden de prioridad del  $ICP$  entran en el monto total de inversión predeterminado. En la zona de la línea de corte, puede considerarse que entre obras de similares riesgos y consecuencias debería diferirse para el siguiente año aquella de mayor inversión, pues libera fondos para otras obras en el presente.

La metodología se consideró rígida respecto a los criterios de calificaciones a asignar a los distintos indicadores (fija en el sistema de gerenciamiento), y flexible en los coeficientes de ponderación de  $IRP$  e  $ICP$ , quedando los valores surgidos de las encuestas piloto como valores por defecto, y dejando abierta la posibilidad de generar en casos particulares a nivel de regiones, otros pesos relativos encuestando a expertos claves con el procedimiento de valoración de preferencias, normalización y agregación.

## CONCLUSIONES

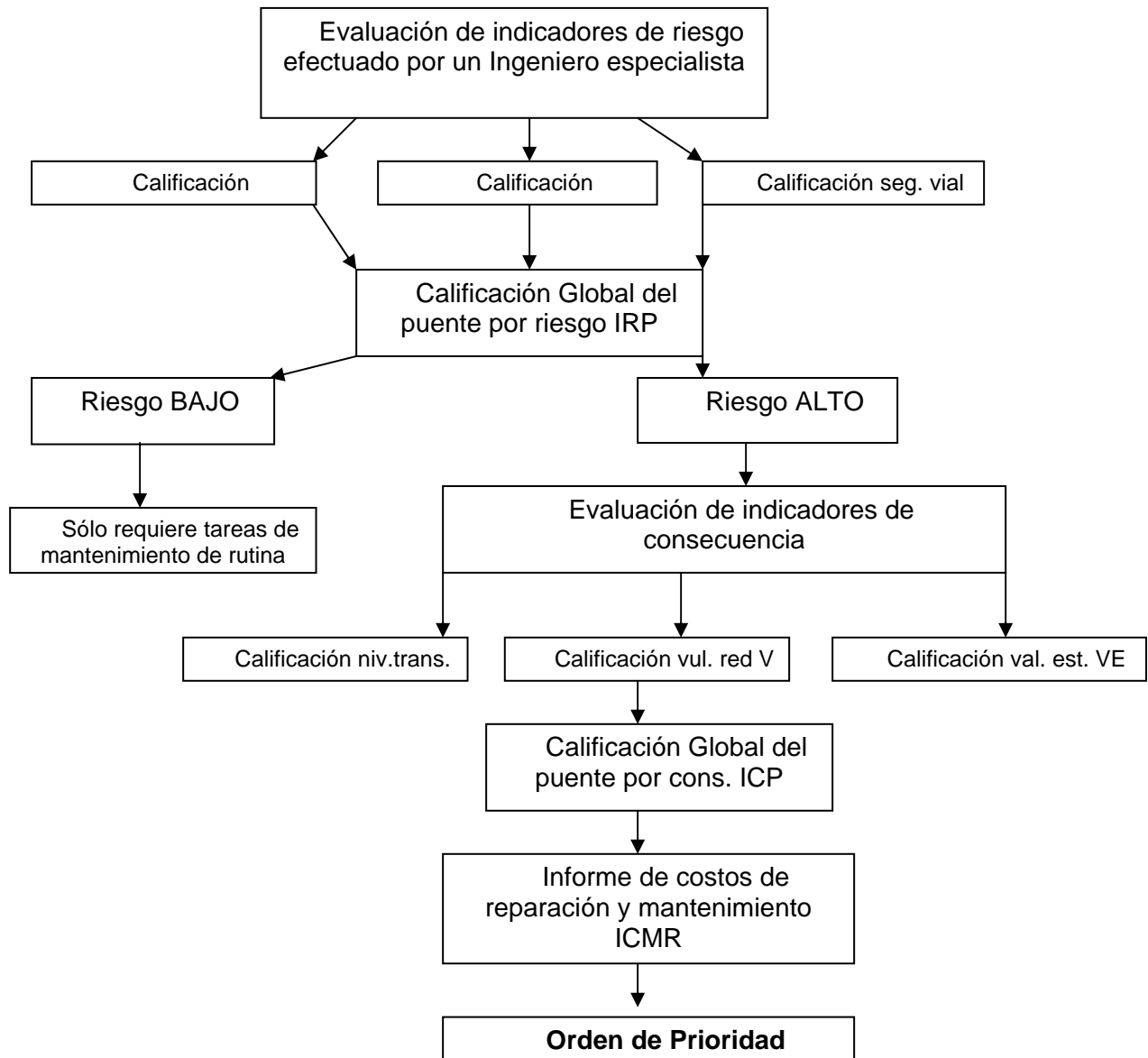
La selección de obras de mantenimiento y rehabilitación de puentes con el objetivo de minimizar el riesgo de fallas en la red vial sujeto a restricciones presupuestarias no es optimizable en términos puramente económicos, pues intervienen aspectos de riesgos estructurales e hidráulicos que pueden colapsar el puente, aspectos de seguridad vial que implican dar valores monetarios a vidas estadísticas y aspectos intangibles como el valor estratégico.

Para la selección de prioridades se presenta así un proceso de toma de decisión que no tiene soluciones analíticas puras sino que requiere ponderaciones de diversos criterios, que en el caso del sistema de gerenciamiento de puentes de la red nacional involucra diversas disciplinas y áreas de la organización.

De los modelos de decisión multicriterio se planteó el método de las jerarquías analíticas, reconociendo como aspectos claves, la formulación y aceptación de la estructura jerárquica del proceso de decisión, con criterios y subcriterios, y la relación técnica para calificar los indicadores.

El proceso permitió alinear para las diversas disciplinas y áreas de la organización las expectativas técnicas del sistema de gerenciamiento con la racionalidad económica y operativa en requerimientos de captura de datos y evaluación de estado a través de los indicadores definidos para la selección de prioridades de obras.

Con una metodología conceptualmente sólida y operativamente simple, la generación del modelo de decisión multicriterio basado en jerarquías analíticas viabilizó la aceptación técnico- política de la parte más sensible del proceso: el método decisorio de ordenamiento de prioridades en una problemática compleja y en un organismo complejo.



**Figura 1: Proceso de evaluación y ordenamiento.**

## REFERENCIAS

- Figueira, J., Greco S. y Ehr Gott M., Editors (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, Boston, Dordrecht, London.
- Meade L. y Sarkis J. (1998). "Strategic analysis of logistics and supply chain management systems using the analytical network process", *Transportation Research-E*, Vol. 34, No. 3, pp. 201-205.

- Min, H. (1994). "Location analysis of international consolidation terminals using the Analytic Hierarchy Process", *Journal of Business Logistics*, Vol. 15, pp. 25-44.
- PIARC (2000). *The Highway Development and Management Series. Analytical Framework and Model Description*, Volume 4, Permanent International Association of Road Congresses, Paris, France.
- Saaty, T. (1977). "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 15, pp. 243-281.
- Saaty, T. (1999). *Decision Making for Leaders*, RSW Publishing, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Thompson, D. M. (1994). "Using AHP to allocate contract incentives", *Transactions of the American Association of Cost Engineers*, DCL7.1-DCL.3.
- 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.