Optimización aplicada a la gestión sostenible del mantenimiento de las carreteras. La transición hacia la gestión inteligente

Víctor Yepes

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Catedrático de Universidad. http://victoryepes.blogs.upv.es/

Universitat Politècnica de València

¡Buenos días a todos! Antes de nada me gustaría agradecer al Director de Geotechtips, Freddy Sánchez-Leal y a ITAFEC de México, el ofrecimiento recibido para impartir esta conferencia en el marco del Simposio GeoRoads19. Efectivamente, bajo el acertado paraguas "La pasión por las carreteras" esta conferencia se transmite en directo por internet, por lo que la difusión de los contenidos se extiende no solo a los participantes al simposio, sino que posteriormente queda a disposición de cualquiera que esté interesado. Este es un claro ejemplo de cómo las nuevas tecnologías están revolucionando profundamente la forma de compartir y transmitir los conocimientos. Las nuevas tecnologías, además, se encuentran estrechamente relacionadas con la inteligencia artificial. Y es justamente la aplicación de la inteligencia artificial, la toma de decisiones y la optimización aplicada a la gestión sostenible del mantenimiento de las carreteras, el centro la conferencia que tengo el placer de compartir con ustedes. Posteriormente, tendremos ocasión de contestar alguna de las preguntas de la audiencia, que creo puede ser lo más interesante del simposio.

Mi nombre es Víctor Yepes y soy catedrático de ingeniería de la construcción en la Universidad Politécnica de Valencia, aunque es probable que algunos de ustedes me conozcan por una labor intensa de divulgación desarrollada durante más de 8 años en mi blog. En este momento tiene unas 2000 visitas diarias y se ha superado ampliamente los 1000 artículos publicados. Sin embargo, la conferencia va a centrarse en los trabajos realizados por nuestro grupo de investigación. El título de la conferencia es "Optimización aplicada a la gestión sostenible del mantenimiento de las carreteras. La transición hacia la gestión inteligente" y en ella voy a tratar de exponer, de forma sencilla y sin formalismos matemáticos, algunas de las conclusiones más importantes y la aplicabilidad práctica del uso de técnicas derivadas de la optimización multiobjetivo en la gestión inteligente del mantenimiento sostenible de las redes de carreteras, sobre todo cuando los presupuesto son restrictivos.

Por tanto, la pregunta que vamos a intentar responder en esta conferencia es la que tienen señalada en la transparencia: ¿Es posible realizar una gestión sostenible del mantenimiento de las carreteras cuando los presupuestos son restrictivos? Si fuera posible, ¿cómo lo podríamos hacer? ¿Se están perdiendo oportunidades de mantener en estado óptimo nuestras carreteras por no tomar las decisiones acertadas?

Preservar las infraestructuras en un estado mínimamente adecuado de conservación y mantenimiento es una necesidad de primer orden en cualquier sociedad. Sin embargo, por motivos que a veces son estructurales y otras coyunturales, los responsables de esta tarea no

prestan la atención y los recursos necesarios para este cometido. Parece que la inversión en conservación de los activos siempre ha sido insuficiente incluso en países desarrollados.

En efecto, parece evidente que el desarrollo económico que tuvo lugar en países como fue España en la última parte del siglo XX se centró, en el caso de las carreteras, en ampliar la red para apoyar dicho desarrollo.

Si bien es cierto que estas nuevas infraestructuras nacen con un periodo de vida relativamente largo, también es cierto que una parte nada desdeñable de dicha infraestructura está empezando a notar el paso del tiempo, y lo que es peor, parece que podemos vivir dentro de un horizonte no tan lejano, a un verdadero colapso en los niveles de servicio prestados por estos activos.

Lo peor de todo ello es que estas infraestructuras se financiaron a largo plazo y la siguiente generación se va a encontrar con la sorpresa de tener que pagar por unas infraestructuras con pésimos niveles de servicio. Todo ello nos lleva a la cuestión central del problema: la urgente necesidad de tener un plan racional con recursos suficientes para mantener las infraestructuras básicas de nuestro país.

Por tanto, las infraestructuras se deterioran en un proceso que es natural e inevitable. En particular, las carreteras sufren, por una parte un proceso de envejecimiento de los materiales, por otra por las acciones del tráfico (que varía a su vez con el tiempo) y, por último, por el ambiente. Se trata de un proceso de deterioro que depende, por tanto, del tiempo, y que puede modificarse con estrategias de mantenimiento y de conservación. Es decir, se puede intervenir en el proceso.

En la Figura 1 podemos ver una gráfica donde se representa no solo la degradación del estado o de las prestaciones de la carretera, sino las distintas estrategias que se tienen al alcance para modificar dicho deterioro.

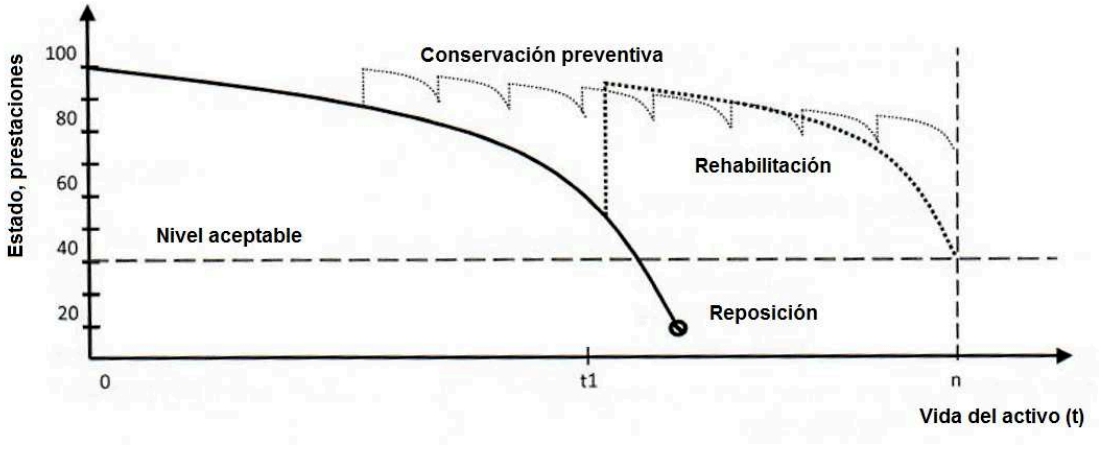

Figura 1. Estrategias de conservación (Clemente, 2012)

Así, la estrategia preventiva o proactiva tiene como objetivo mantener en el tiempo el estado físico del elemento en un nivel adecuado, evitando que alcance niveles de deterioro elevado que puedan afectar a su funcionalidad y provocar costes elevados de reparación. Estas actuaciones son normalmente de alcance y coste limitado y se realizan con cierta periodicidad

en función de la evolución observada o incluso de manera programada antes de que el defecto se llegue a manifestar.

La estrategia correctiva o reactiva es la que deja al elemento que se deteriore hasta alcanzar un nivel elevado, en cuyo momento se realizan intervenciones de gran calado, como por ejemplo grandes rehabilitaciones integrales o estructurales, que lo devuelven a su estado original. Sin embargo, son actuaciones de mayor coste, aunque más separadas en el tiempo.

Por último, se podría optar por un deterioro controlado hasta la retirada. En este caso se pasa directamente a retirar el elemento cuando se ha alcanzado su vida útil de servicio y se sustituye por otro similar. Durante este periodo no se interviene, o se hace mínimamente para no afectar a la funcionalidad.

Por tanto, la estrategia óptima no es evidente, pues depende tanto de factores endógenos (características constructivas, edad, etc.) y exógenos (condiciones del clima, nivel de tráfico, etc.) y por tanto no se pueden generalizar las conclusiones. Este problema, por tanto, es uno de los focos más importantes de nuestro grupo de investigación.

Pero el problema se hace más complejo cuando se tienen en cuenta los costes de los usuarios. En efecto, las características de la carretera y el nivel y la composición de la demanda de tráfico influyen en los costes de los usuarios. Un mal estado del pavimento, claramente influye en el coste del usuario. Y lo que es peor, un estado sub-óptimo de la infraestructura debido a una estrategia de conservación reactiva, tiene como consecuencia el incremento del riesgo de accidentes, la reducción de la velocidad, las restricciones de paso y la elección por los usuarios de itinerarios alternativos con mayor tiempo de recorrido. Insisto en este punto. Una conservación deficiente genera mayores costes a los usuarios relacionados con el valor del tiempo de viaje, con el vehículo y con los accidentes de tráfico.

En la Figura 2 se puede ver que existe un hipotético nivel de conservación óptimo que minimiza los costes totales del transporte, teniendo en cuenta el coste del usuario, el coste de conservación y el coste de construcción.

Sin una estrategia clara de conservación, los responsables de la conservación de una red de carreteras suelen realizar una conservación correctiva, que tiene un aparente ahorro económico en el corto plazo, pero que traslada al futuro unos costes que pueden ser muy elevados tanto para los contribuyentes o accionistas que sufragan la inversión como para los usuarios.

Todo lo anteriormente visto justifica la necesidad de un sistema de gestión de infraestructuras, tal y como se puede ver en la Figura 3. El proceso parte de un conjunto de datos, establecidos a nivel estratégico, en el que se definen los objetivos y políticas de la gestión así como el presupuesto disponible para la conservación.

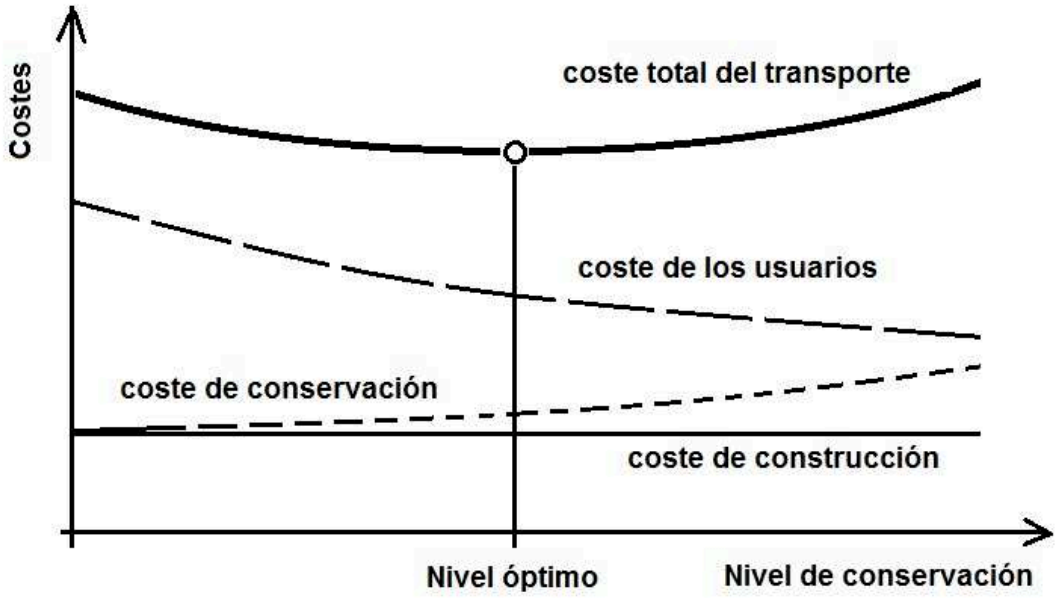

Figura 2. Nivel óptimo de conservación en relación con el coste total del transporte

Figura 3. Sistema de gestión de infraestructuras

Posteriormente se recopila y analiza la información de inventario que incluye datos sobre el uso, condición e historial de construcción y conservación. Esta información permite establecer las necesidades futuras de conservación. A partir de herramientas que evalúan el efecto de las alternativas de conservación, se lleva a cabo la asignación del presupuesto disponible de forma que se satisfagan las necesidades y requerimientos tanto de los usuarios como de la administración responsable de su gestión. Este proceso requiere que se haya definido, a nivel estratégico, los criterios a considerar en la evaluación y la elección de alternativas. Como resultado de este análisis se proponen los proyectos a implementar, los cuales se controlan para que exista una retroalimentación en el proceso de gestión.

Pues dentro de este esquema general, nuestro grupo de investigación y especialmente la profesora Cristina Torres en su tesis doctoral, se ha centrado en el recuadro marcado en rojo. Se trata de un problema muy complejo de asignación del presupuesto, de evaluación de las alternativas y de optimización de los programas de conservación.

Para centrar el problema de la toma eficiente de decisiones en la gestión inteligente de las infraestructuras, sobre todo cuando los recursos son escasos, es necesario entender la diferencia entre los indicadores de estado o condición y los de prestación o rendimiento.

El estado o condición de una infraestructura se define como su estado físico, que puede afectar o no a sus prestaciones. En cambio, la prestación o rendimiento se define como la capacidad de la infraestructura para proveer un determinado nivel de servicio a los usuarios. Se pueden llamar también prestaciones funcionales, pues indican el nivel de habilitación de una infraestructura para desarrollar su función principal, que es la prestación del servicio, aunque también podrían incluir otras características o efectos no directamente relacionados con el servicio a los usuarios.

Saber diferenciar ambos conceptos es básico para cualquier organización responsable de la gestión de una infraestructura. Así, por ejemplo, las prestaciones de un puente pueden no verse afectadas por el estado hasta que se produzca un fallo. Es fácil encontrar un puente de hormigón con defectos superficiales (corrosión de armaduras, desconchados, etc.) que mantiene intacta su funcionalidad e integridad estructural. También podría darse el caso de un puente en muy buen estado que no sea capaz de soportar determinadas cargas o que impone restricciones de gálibo que afectan al tráfico.

Pero, ¿cuáles son las razones para disponer de indicadores en la gestión de las infraestructuras? Son imprescindibles para tomar decisiones que afectan a estos activos. Permiten identificar las necesidades de intervención, proporcionan la guía de los procesos y criterios en la toma de decisiones y son los elementos que permiten controlar el progreso hacia los objetivos y metas trazados por la organización responsable de la gestión.

En el caso de una carretera, los indicadores utilizados en su gestión se suelen agrupar en diferentes categorías que corresponden con los objetivos de la organización. Se podrían considerar, entre otros, los siguientes: conservación de la carretera, seguridad vial, movilidad y accesibilidad, medioambiente, operaciones y mantenimiento y eficiencia económica.

Si se disponen de mediciones de dichos indicadores de estado o de prestaciones, podremos comparar sus valores con determinados estándares, umbrales o niveles mínimos. Esta información es determinante en la identificación de las necesidades de intervención y, por tanto,

catalizan todo el proceso posterior de selección de intervenciones y asignación de recursos económicos.

Pero, ¿qué indicadores vamos a utilizar? Como vamos a tener ocasión de comprobar, existen una multitud de ellos. Pero todos ellos sirven de espejo para comprobar si se cumplen las funciones básicas de una carretera. Dichas funciones básicas pasan por poseer una capacidad estructural suficiente para soportar las cargas a la estará sometida, presentar un nivel de servicio adecuado bajo el punto de vista del usuario y garantizar la seguridad en cualquier momento.

En consecuencia, el estado y las prestaciones de una carretera varían a lo largo del tiempo debido a las solicitaciones directas o indirectas, como puede ser el tráfico o el clima, y por tanto, se debe evaluar periódicamente el estado de la carretera para garantizar las funciones básicas que antes hemos definido.

Dentro de la gestión de una carretera, llamaremos evaluación técnica al proceso que pasa por recoger datos, evaluar la infraestructura a través de un indicador y predecir la condición futura de la carretera mediante un modelo de comportamiento (Figura 4).

La primera fase de la evaluación técnica implica examinar las características de una carretera tanto desde el punto de vista funcional como estructural. Existen distintos tipos de indicadores para evaluar las características de una carretera.

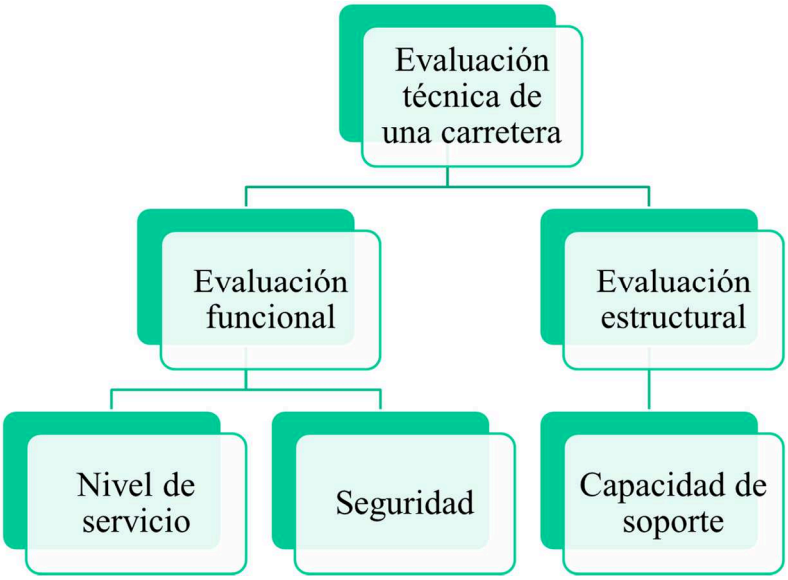

Figura 4. Evaluación técnica de una carretera

Estos indicadores se correlacionan entre ellos para comparar los valores cuando se utilizan distintas metodologías de medición. Si se evalúa la funcionalidad del pavimento, se puede medir el nivel de servicio o la seguridad. Por otra parte, la evaluación estructural mide la capacidad de soporte del pavimento. Para ello se pueden medir las propiedades mecánicas (deflexiones y deformaciones) o bien el deterioro superficial (agrietamiento, defectos superficiales) o la deformación del pavimento.

En la Figura 5 vemos un mapa conceptual que explica alguno de los indicadores más frecuentemente utilizados en la evaluación técnica de pavimentos. Vamos a analizar con más detalle este mapa conceptual.

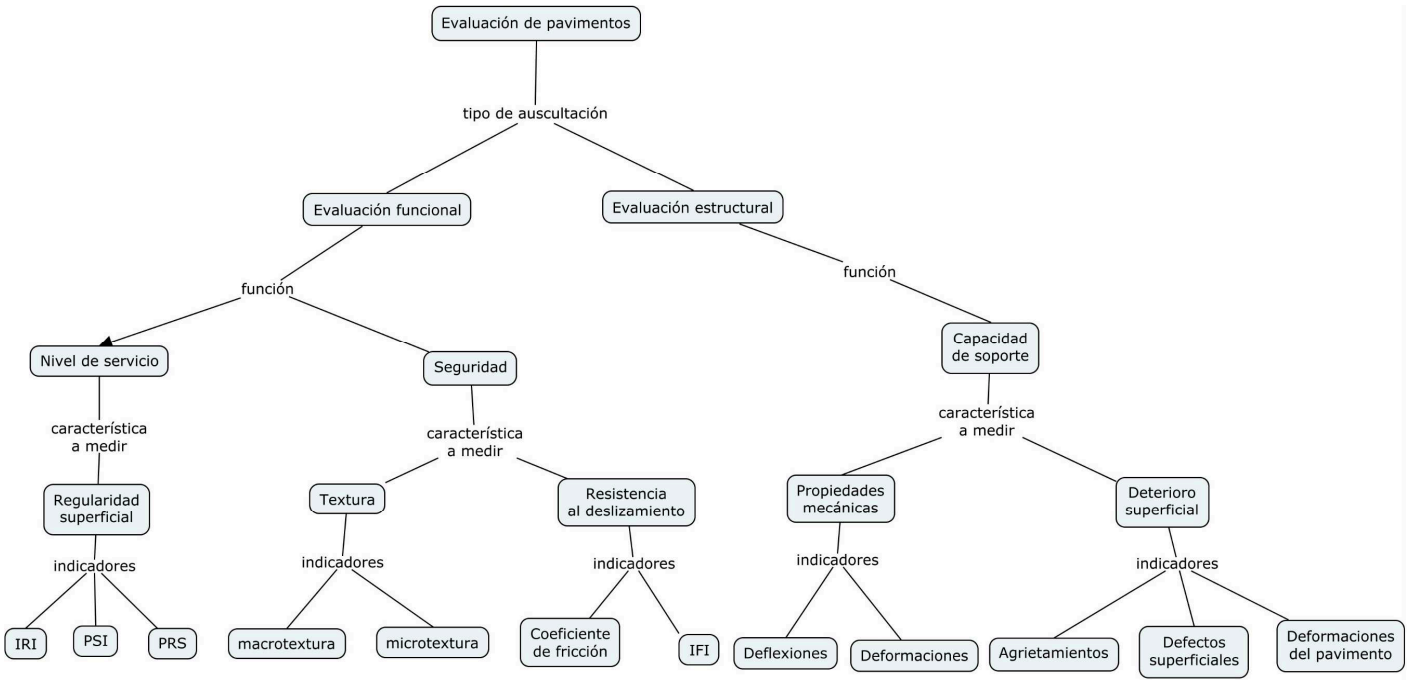

Figura 5. Mapa conceptual de la evaluación de pavimentos.

El nivel de servicio mide la capacidad del pavimento para servir al tránsito ofreciendo un nivel de calidad adecuado a los usuarios; por tanto, se trata de una percepción subjetiva basada en la comodidad. Esta percepción se relaciona habitualmente con la regularidad superficial, medida con diversos indicadores. Hoy en día el IRI (Índice Internacional de rugosidad)es el indicador más importante, y se evalúa a partir del perfil longitudinal del pavimento.

El nivel de seguridad de una carretera depende de múltiples factores, como son el diseño geométrico, la señalización o las características de los vehículos, entre otros muchos. Sin embargo, para medir la seguridad del pavimento se suele utilizar la textura y la resistencia al deslizamiento (coeficiente de fricción internacional, IFI).

Hay que tener presente, en este caso, que la resistencia al deslizamiento no solo depende de la textura del pavimento, sino que también depende de las características de los neumáticos y de las condiciones del vehículo. Pero si se tiene que medir la condición del pavimento, deberemos centrarnos en la microtextura, (que influye fuertemente en el deslizamiento de vehículos a baja velocidad sobre superficies mojadas) y la macrotextura (que facilita el drenaje del agua y que ofrece resistencia al deslizamiento en vehículos a alta velocidad sobre pavimentos mojados).

Las propiedades mecánicas del pavimento (módulo elástico, fatiga, deformación y tensiones residuales) definen los parámetros de resistencia de las diferentes capas de la estructura del pavimento. Sin embargo, el indicador más utilizado para evaluar la capacidad estructural es la medición de las deflexiones (deformación elástica de un pavimento al paso de una carga).

Por otra parte, el deterioro superficial se hace patente con las grietas, defectos superficiales y deformaciones del pavimento, así como en los defectos de los tratamientos o reparaciones realizadas. Suele medirse mediante una inspección visual, que puede ser manual o automática.

Sin embargo, aunque todos los indicadores expuestos son de interés en la toma de decisiones, también es cierto que resulta conveniente disponer de indicadores compuestos que permitan simplificar la información. Se trata de combinar los indicadores individuales para simplificar la toma de decisiones. Algunos de ellos son el PCI (índice del estado del pavimento), el PQI (Índice de calidad del pavimento) y el POI (Índice general del pavimento). Como estos indicadores son una agregación de distintos deterioros, para utilizarlos en la gestión de una red de carreteras, es necesario una calibración previa.

Estos indicadores se utilizan, entre otros, para realizar una optimización multiobjetivo en la toma de decisiones necesaria para el mantenimiento de una red de carreteras. En el caso de los indicadores de condición, se trata de maximizar dicho indicador a lo largo del ciclo de vida de la red de carreteras. Pero este es un problema muy complejo. Vamos a desmenuzarlo un poco.

En muchos foros se repite, a modo de mantra, que la falta de conservación de nuestras carreteras (y calles, en el caso de las ciudades) se debe fundamentalmente a un problema de orden económico. Por algún u otro motivo (crisis económica, dificultad en aprobar presupuestos, falta de voluntad política, etc.), la falta aparente de recursos obliga a realizar una conservación correctiva o reactiva de las carreteras que, como ya hemos dicho, genera mayores costes a los usuarios relacionados con el valor del tiempo de viaje, con el vehículo y con los accidentes de tráfico. La justificación económica de las restricciones presupuestarias queda en entredicho cuando se consideran los costes totales del transporte.

Sin embargo, en nuestro grupo de investigación hemos desarrollado modelos que, incluso en el caso de disponer presupuestos restrictivos, pueden maximizar el estado o condición, no de una carretera, sino de una red completa, considerando, además, distintas funciones objetivo (costes económicos, sociales y medioambientales). Pero para entender mejor la cuestión, expongo a continuación la dificultad intrínseca de este tipo de problemas y justificaré las razones por las que muchos gestores del mantenimiento de carreteras toman decisiones que se alejan de ser óptimas.

La clave para entender la magnitud del problema radica en la dificultad que tienen los gestores en la toma de decisiones debido a la explosión combinatoria de las soluciones posibles cuando se tienen en cuenta distintos tipos de tratamientos de preservación, mantenimiento y rehabilitación y los periodos de aplicación. Dicho de otra forma, en una red de carreteras se trata de decidir en qué tramo se aplica un tratamiento de los múltiples posibles y cuándo se debe realizar. Las decisiones tomadas conforman el programa de conservación.

En la Figura 6 se representan las variables fundamentales que conforman el problema. En una red de carreteras tenemos *N* activos (tramos considerados), S posibles tratamientos cada uno de los cuales se aplicará en el instante *t* en los años considerados en el programa de conservación.

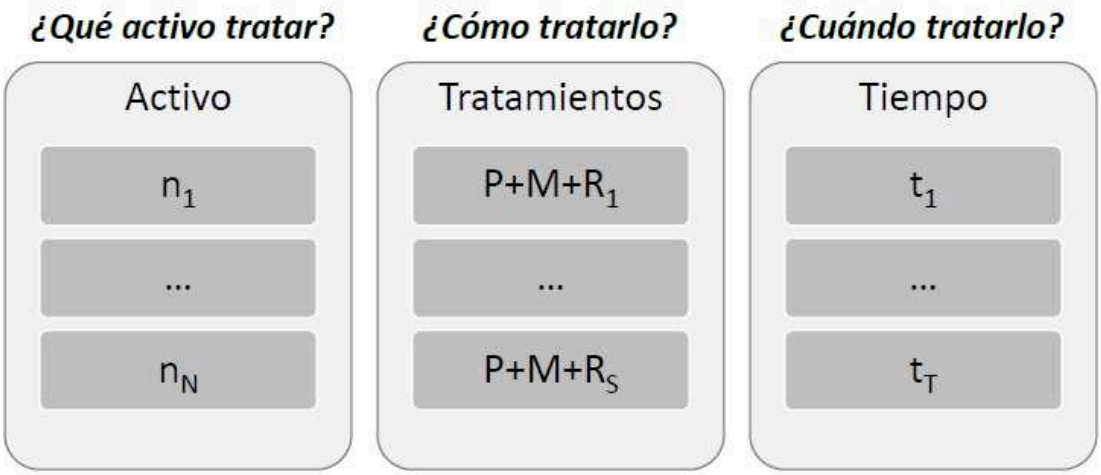

Figura 6. Programa de conservación (Torres-Machí, 2015)

El programa de conservación resultante de las decisiones tomadas para un horizonte de *T* años nos dirá para cada uno de los años dónde actuar y qué tipo de tratamiento se deberá realizar. En la pantalla se ha representado un posible programa fruto de las decisiones tomadas.

Lo difícil de este problema, como hemos dicho anteriormente, es acertar con el mejor programa de conservación. No hay más remedio que aplicar técnicas de optimización para resolver el problema si los presupuestos son escasos. Caben dos enfoques, el secuencial y el holístico. El primero se centra en un activo (tramo de carretera, calle en una ciudad) y se decide qué tratamientos y cuándo se van a aplicar. En este caso el problema tiene $N \cdot S^T$ soluciones. En cambio, el enfoque holístico considera toda la red: se trata de elegir qué activo tiene prioridad en la red y luego decidir qué tratamiento y cuándo se aplica. Aquí se dispara el número de posibles soluciones a $S^{(N \cdot T)}$. A modo de ejemplo, teniendo en cuenta solo dos tratamientos (S=2), un horizonte de 10 años (T=10) y 7 tramos diferentes de carretera (N=7), el número de posibles soluciones es de 1,18E+21.

La única forma de abordar este problema es con algoritmos heurísticos de optimización multiobjetivo.

Para entender mejor el problema de optimización, en la Figura 7 aparecen varias funciones objetivo. En este caso, se quiere maximizar en la primera función el área existente entre el índice de estado y el índice de estado mínimo para un horizonte de tiempo T. La otra función minimiza la huella de carbono, es decir, el total de las emisiones de CO_2 debida a los distintos tratamientos realizados para la conservación.

FUNCIONES OBJETIVO

$$\max f_1(\boldsymbol{x}) = \max \sum_{n=1}^{N} ABC_n = max \sum_{n=1}^{N} \int_{t=0}^{T} (IC_n(t) - IC_{min,n})\, dt$$

$$\min f_2(\boldsymbol{x}) = \min \sum_{n=1}^{N} (CO_2)_n$$

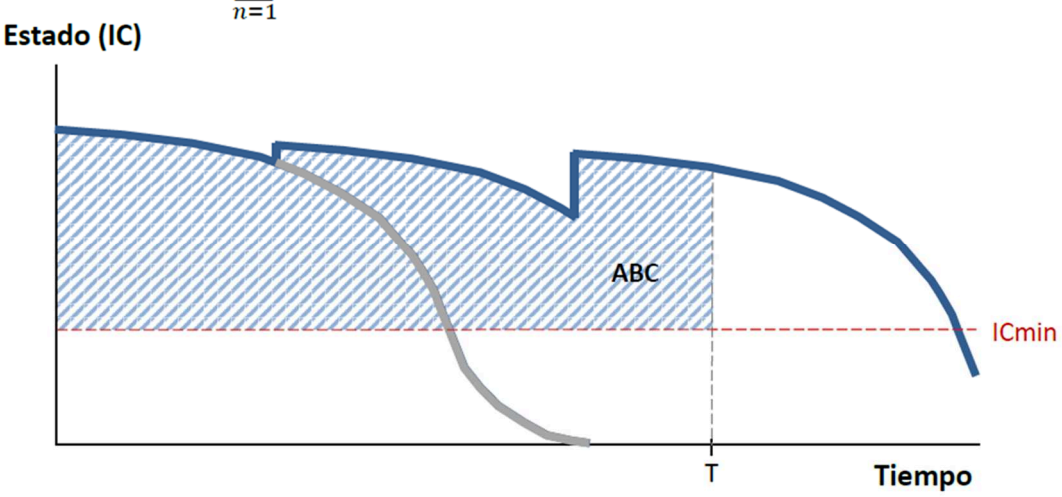

Figura 7. Funciones objetivo y evolución del estado de condición con el tiempo (Torres-Machí, 2015; adaptado de Haas et al., 1994))

En cuanto a las restricciones del problema, destacan las restricciones presupuestarias como g_1 (Figura 8). En este caso el coste de los tratamientos se encuentra con su actualización monetaria correspondiente. La segunda de las restricciones tiene que ver con el estado del activo, que siempre deberá superar el índice de condición mínimo exigible.

A partir de la definición del problema, ya se pueden utilizar metaheurísticas para resolver la optimización multiobjetivo. En la Figura 9 se ha representado un diagrama de flujo procedente de la tesis de Cristina Torres donde se ha utilizado un algoritmo constructivo (tipo GRASP) y luego un postproceso de mejora.

RESTRICCIONES

$$g_1(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N} coste(x_n) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \leq B(t)\,;\ \forall\, t$$

$$g_2(\boldsymbol{x}) = IC_n(t) \geq IC_{min\,n}\ ;\ \forall\, t \text{ y } \forall\, n$$

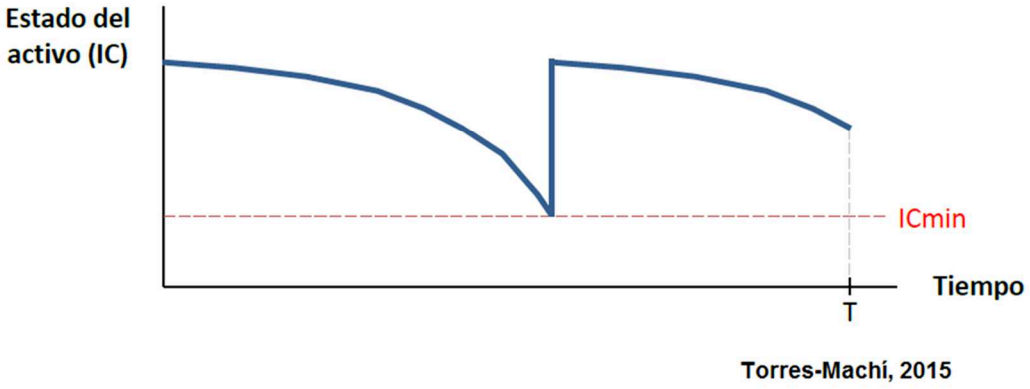

Figura 8. Restricciones y evolución del estado de condición (Torres-Machí, 2015))

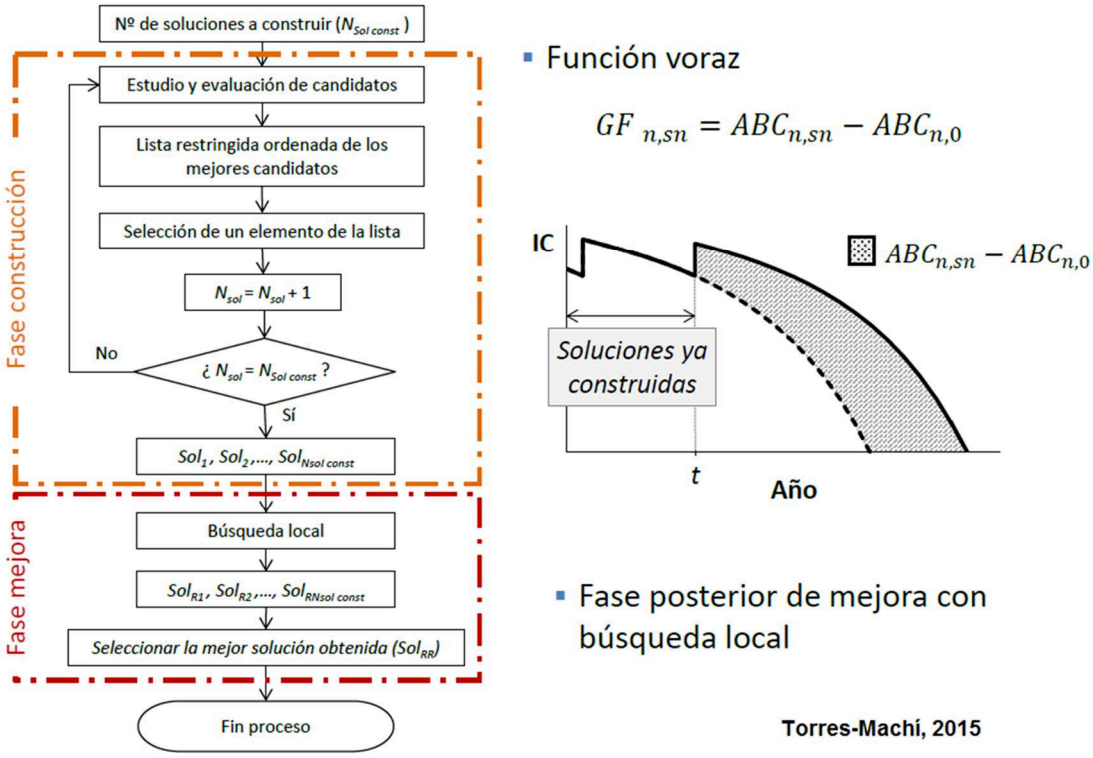

Figura 9. Diagrama de flujo de algoritmo constructivo tipo GRASP (Torres-Machí, 2015)

Para hacerse idea de la efectividad de este tipo de procedimientos, para un caso real aplicado a 20 tramos de una porción de la red urbana de Santiago (Chile), con un presupuesto restrictivo y acotado para un horizonte de 25 años, se consiguió aumentar la condición media de la red hasta un 22% y, asimismo, se redujo en un 12% la huella de carbono.

Los resultados son muy interesantes, pues la alternativa es una toma de decisiones intuitiva, sub-óptima, que, incluso con el presupuesto disponible, sería incapaz de garantizar los indicadores de condición de las infraestructuras y supondrían un efecto no controlado en el impacto ambiental generado por la huella de carbono.

Para finalizar, las conclusiones más importantes de esta comunicación, son las siguientes:

- La inteligencia artificial transformará la forma de gestionar las infraestructuras (red de carreteras, calles urbanas, etc.)
- La conservación correctiva de las infraestructuras supone costes inasumibles para el usuario
- Son necesarios indicadores de estado y prestaciones para tomar decisiones
- La optimización heurística es capaz de encontrar soluciones óptimas que maximicen la condición de las infraestructuras y reduzcan los impactos ambientales y sociales

Agradecimientos:

Se agradece al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la financiación del Proyecto de investigación DIMALIFE (BIA2017-85098-R), así como A los fondos FEDER.

Referencias:

CLEMENTE, J.J. (2012). *La toma de decisión en el marco de la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre.* Trabajo de investigación. Universitat Politècnica de València.

NAVARRO, I.J.; MARTÍ, J.V.; YEPES, V. (2019). Reliability-based maintenance optimization of corrosion preventive designs under a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 74:23-34.

PELLICER, E.; YEPES, V.; TEIXEIRA, J.C.; MOURA, H.P.; CATALÁ, J. (2014). *Construction Management*. Wiley Blackwell, 316 pp.

SALAS, J.; YEPES, V. (2019). MS-ReRO and D-ROSE methods: assessing relational uncertainty and evaluating scenarios' risks and opportunities on multi-scale infrastructure systems. *Journal of Cleaner Production*, (accepted, in press).

SIERRA, L.A.; PELLICER, E.; YEPES, V. (2017). Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 65:41-53.

SIERRA, L.A.; YEPES, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; PELLICER, E. (2018). Bayesian network method for decision-making about the social sustainability of infrastructure projects. *Journal of Cleaner Production*, 176:521-534.

SIERRA, L.A.; YEPES, V.; PELLICER, E. (2017). Assessing the social sustainability contribution of an infrastructure project under conditions of uncertainty. *Environmental Impact Assessment Review*, 67:61-72.

SIERRA, L.A.; YEPES, V.; PELLICER, E. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187:496-513.

TORRES-MACHÍ, C. (2015). *Optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre.* Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València - Pontificia Universidad Católica de Chile.

TORRES-MACHÍ, C.; CHAMORRO, A.; PELLICER, E.; YEPES, V.; VIDELA, C. (2015). Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making. *Transportation Research Record*, 2523:56-63.

TORRES-MACHÍ, C.; CHAMORRO, A.; VIDELA, C.; PELLICER, E.; YEPES, V. (2014). An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level. The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 524329, 11 pages.

TORRES-MACHÍ, C.; CHAMORRO, A.; YEPES, V.; PELLICER, E. (2014). Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management. *Revista de la Construcción*, 13(2): 49-56.

TORRES-MACHI, C.; PELLICER, E.; YEPES, V.; CHAMORRO, A. (2017). Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions. *Journal of Cleaner Production*, 148:90-102.

YEPES, V. (2002). *Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València. 352 pp.

YEPES, V. (2018). La "crisis" de las infraestructuras. *Obras Urbanas. Revista Técnica de Maquinaria y Obra Pública*, 71:8-9.

YEPES, V.; MEDINA, J.R. (2006). Economic Heuristic Optimization for Heterogeneous Fleet VRPHESTW. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 132(4): 303-311.

YEPES, V.; TORRES-MACHÍ, C.; CHAMORRO, A.; PELLICER, E. (2016). Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(4):540-550.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional