

Estudios de implantación de un sistema de gestión de las inversiones en la red de carreteras

POR JOSÉ MIGUEL RUIZ,
INGENIERO DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

Y

JUAN SAMÓS TIE,
INGENIERO DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



1. Introducción

Se pretende con este artículo comunicar resumidamente al lector la experiencia obtenida por el equipo de trabajo con la realización de un estudio de viabilidad del sistema HDM en junio de 1995 en la provincia de Madrid, así como describir los principales elementos que lo componen, para ayudar a su mejor conocimiento.

2. Objetivos y medios empleados

El objetivo principal que se pretendía conseguir con este trabajo era determinar la viabilidad de aplicar a la gestión del mantenimiento de la red de carreteras de la Comunidad de Madrid un sistema como el HDM de evaluación y programación de inversiones: todo ello con el fin de optimizar y sistematizar la me-

todología empleada actualmente por el personal de conservación.

Se pretendían resolver dos grandes cuestiones:

- La complejidad de instalar el modelo en la práctica.
- Su adecuación técnica a las carreteras y condiciones locales de la provincia de Madrid.

Para el desarrollo de estos trabajos se contó con la dedicación de dos ingenieros de caminos du-

rante siete meses, así como con el apoyo y supervisión de otro ingeniero experto en el sistema. Para el tratamiento de la información y la realización de pruebas con el modelo, se dispuso de dos ordenadores personales con las aplicaciones informáticas más habituales.

Cabe destacar la importante colaboración prestada por la Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid y por la Dirección General de Carreteras del entonces M.O.P.T.M.A., que resultó fundamental en la fase de recopilación de datos.

3. Introducción al modelo HDM-EBM

El **HDM (Highway Design and Maintenance Standards Model)** es un modelo para la evaluación y programación de inversiones en redes de carreteras que el Banco Mundial ha ido desarrollando desde 1969 y que, desde hace unos años, se ha convertido en una herramienta de uso casi obligado en los países en desarrollo que reciben préstamos de este organismo, ya que se exige que cualquier solicitud de ayuda vaya acompañada por un estudio de la rentabilidad de la inversión.

La última versión desarrollada, conocida como **HDM Manager**, constituye una simplificación de las versiones anteriores que incorpora una serie de herramientas que facilitan notablemente su manejo, a la vez que incluye unas aplicaciones nuevas que permiten evaluar los costes de la congestión.

En la actualidad se encuentra en fase de desarrollo una nueva versión del HDM (HDM-IV), que incorporará también la posibilidad de analizar pavimentos rígidos y la influencia de los climas fríos en el deterioro de los firmes, además de revisar todas las ecuaciones y curvas en las que se basa el modelo.

Complementariamente al HDM se estableció el modelo **EBM (Expenditure Budgeting Model)**, modelo de optimización de los gastos bajo restricciones presupuestarias, fruto de la colaboración entre el Banco Mundial y el EDI (*Economic Development*



Vehículo empleado en la auscultación del IRI.

Institute). Se emplea para seleccionar el conjunto de opciones más rentable entre varias soluciones analizadas mediante el HDM, cuando existe una limitación presupuestaria.

■ Descripción del Sistema HDM

a) Datos de partida

El modelo HDM contempla simultáneamente tres grupos de información:

- **Carreteras**
 - Características geométricas de la carretera.
 - Deterioro del pavimento.
 - Intensidad y tipo de tráfico.
 - Historial de las actuaciones sobre la carretera.
- **Usuarios**
 - Características del parque de vehículos.
 - Costes unitarios de funcionamiento de los vehículos.
- **Actuaciones**
 - Naturaleza y características de actuaciones individuales posibles.
 - Políticas de actuación.
 - Costes de ejecución de las actuaciones.

Combinando esta información de forma sistemática para unos periodos de hasta 30 años, se

puede seleccionar la estrategia de actuaciones más rentable, basándose exclusivamente en criterios económicos y respondiendo a cuestiones variadas, por ejemplo:

- Rentabilidad de construir una nueva carretera frente a conservar adecuadamente las existentes.
- Espesor óptimo de los refuerzos e intervalo entre las actuaciones.
- Selección de la operación más adecuada para el nivel de tráfico.
- Umbral de tráfico que rentabiliza la duplicación o el ensanche de una calzada, o la construcción de una variante en un tramo congestionado.

El HDM es un modelo para la evaluación y programación de inversiones en redes de carreteras que el Banco Mundial ha ido desarrollando desde 1969

b) Proceso de cálculo.

El proceso cíclico de cálculo que emplea el modelo para cada año y para cada tramo es el siguiente:

- Submodelo de Tráfico

En función de la composición del tráfico y el crecimiento previsto, determina el volumen de tráfico para cada año y el número de ejes equivalentes (de 8 t) que soportará el tramo.

- Submodelo de Deterioro y Mantenimiento

Según las características del trazado, la estructura y los materiales del firme, las condiciones de construcción y la naturaleza de la explanada y de las actuaciones de mantenimiento aplicadas, estima los efectos del tráfico, del medio ambiente y del envejecimiento sobre el estado del firme en el año anterior, prediciendo su deterioro.

- Submodelo de Costes de Funcionamiento de los Vehículos

La función de este submodelo es la de simular los efectos del estado de la carretera sobre las velocidades de los vehículos, el consumo de combustible, los gastos de mantenimiento, etc. y determinar los costes totales de funcionamiento para cada tipo de vehículo.



Operación de mantenimiento: fresado y extendido de mezcla bituminosa.

- Submodelo de Congestión

Este submodelo permite tener en cuenta la congestión del tráfico y sus efectos sobre las velocidades de circulación, los tiempos de viaje y los costes de funcionamiento de los vehículos. Utiliza para ello tres nuevos conceptos: variación de las intensidades horarias de circulación a lo largo del año, curvas de relaciones velocidad-IMD particularizadas por tipos de vehículo y de carretera, y el es-

tranchamiento lateral de la carretera debido a la presencia de elementos que obstaculizan la circulación.

- Submodelo de Costes y Beneficios Exógenos

El ahorro en los costes de funcionamiento de los vehículos y de los tiempos de viaje calculados por el HDM constituyen la gran mayoría de los beneficios a la sociedad producidos por las mejoras en la carretera. Pero existen costes o beneficios que no dependen directamente de las Administraciones de carretera, y que pueden incluirse externamente para un análisis más completo, como los costes de impacto ambiental (contaminación, ruido) o los beneficios debidos a la reducción de accidentes.

- Submodelo de Evaluación de la Rentabilidad Económica

Determina, en función de las diferentes variables introducidas, la rentabilidad económica de la inversión prevista, medida a través de diferentes indicadores: tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN) y otros ratios económicos.



Vehículo empleado en la auscultación: Georradar.



Operación de mantenimiento: revestimiento de cunetas.

4. Descripción de los trabajos realizados

A continuación se resume el desarrollo de los trabajos realizados, con la exposición de sus distintas fases.

a) Definición y selección de la red objeto de estudio

La red de carreteras pavimentadas en la Comunidad de Madrid tiene una longitud de 3 435 km, de los cuales 2 760 km están administrados por la Comunidad Autónoma y el resto, por el Estado.

La red finalmente seleccionada se obtuvo tras un proceso de exclusión en el que, por diversas razones, se eliminaron los tramos que cumplían alguna de las siguientes condiciones:

- Vías con doble calzada.
- Carreteras en construcción.
- Firmes rígidos o bases tratadas con cemento.
- Tramos en zona urbana.
- Ramales y pequeñas carreteras de acceso.

El resultado fue una selección de **2 264 km**, con todo tipo de firmes, estados de conservación y niveles de tráfico, entre los que figuraban la mayor parte de las carreteras convencionales de la red estatal en la provincia de Madrid.

b) Tramificación

El siguiente paso consistió en tramificar la red seleccionada,

atendiendo a discontinuidades debidas a alguno de los tres factores siguientes:

- Naturaleza y espesor del firme.
- Grado de deterioro del firme.
- Tráfico.

Con este proceso se obtuvieron **340 tramos**, muchos de los cuales coincidían con la tramificación oficial de la Comunidad de Madrid.

Dado que un número tan grande de tramos es inmanejable para un análisis con el HDM, se procedió a formar una matriz reuniéndolos en grupos homogéneos, según los siguientes parámetros:

- **Estado superficial:** bueno, regular y malo.
- **Firme:** tratamiento superficial, mezcla bituminosa de espesor menor de 10 cm y mezcla bituminosa de espesor mayor de 10 cm.
- **Tráfico:** seis niveles de tráfico con los límites de IMD de 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000 y mayor de 10 000 vehículos.

Teóricamente se obtendría una matriz de $3 \times 3 \times 6 = 54$ **tramos ficticios**, cuya longitud sería la suma de todos los tramos incluidos en cada celda, y cuyos valores geométricos, de tráfico, etc., serían una media ponderada entre ellos. Debido a que algunas de estas com-

binaciones no tenía ningún tramo representativo o su longitud era muy pequeña, se redujo a 32 el número de celdas con representación.

El análisis de las restricciones presupuestarias con el modelo EBM aconseja que los tramos que se comparan tengan longitudes similares, motivo por el cual algunos de los tramos ficticios formados se subdividieron en dos o tres idénticos de menor longitud. Ello dio lugar a un número final de **42 tramos ficticios** sujetos a estudio. Cada uno de estos tramos incluía uno o varios tramos reales perfectamente identificados.

c) Obtención de los datos

La fase de recopilación de los datos requeridos por el modelo fue la más laboriosa, especialmente los relativos al estado superficial del pavimento.

Dentro de los **datos generales**, destaca la adopción de una tasa de descuento del 6% y de un periodo de análisis de 20 años.

Los **datos geométricos y sobre tipo de firme** se obtuvieron a partir de los inventarios existentes y de consultas hechas a los responsables locales de conservación y mantenimiento.

Para los **datos sobre deterioro del firme** se auscultó casi un 10% de la red seleccionada, considerado representativo, tomando los valores del IRI, deflexiones, espesores de capas, rodadas y deterioro superficial. El coste medio de esta campaña fue de 35 000 pta/km.

Los **datos sobre vehículos**, válidos en su mayor parte para toda España, se extrajeron de un trabajo similar realizado en Tarragona en 1993, exceptuando los valores de ejes equivalentes y peso medio de los vehículos, que se determinaron a partir de las campañas de pesaje realizadas en la provincia de Madrid por el CEDEX. Estos valores son algo inferiores al promedio nacional, por tratarse de una red de mucho tráfico comarcal y local.

Para los **datos del tráfico** se contó con la completa información contenida en los aforos realizados por la Comunidad y el Ministerio. En cuanto a las previsiones de crecimiento del tráfi-

co, se adoptaron las incluidas por la propia Comunidad de Madrid en su II Plan de Carreteras 1994 - 2001.

Las **estrategias** de actuación se elaboraron basándose en criterios compatibles con la experiencia desarrollada hasta entonces por el personal de mantenimiento (tratamientos superficiales, refuerzos y reconstrucciones), pero introduciendo unos elementos nuevos, técnicamente aceptables, que fueran capaces de replantear algunas políticas empleadas, apartadas de criterios económicos.

d) Calibración del modelo

El modelo HDM contiene una serie de ecuaciones y parámetros que modelan el comportamiento de los firmes en unas determinadas condiciones de clima y naturaleza de los materiales. Para asegurar la validez de su aplicación a otro tipo de condiciones locales, es preciso efectuar un proceso previo de **calibración**, que consiste básicamente en simular con el modelo uno o varios casos reales de deterioro del firme para los que se disponga de datos históricos, y comparar los resultados del modelo con la evolución real registrada.

En el caso de la Comunidad de Madrid, se disponía de una serie de datos del IRI y de actuaciones suficiente para poder calibrar el modelo. Sin embargo, al realizar la comparación de los valores del IRI antiguos y recientes de tramos en los que no se había efectuado ninguna actuación intermedia, se descubrió que los valores antiguos eran en muchas ocasiones superiores a los actuales, lo que denotaba probablemente algún error de ajuste en los aparatos de auscultación. Debido a ello sólo se pudo realizar una calibración básica de la evolución del IRI debida a la climatología local y la acción del tráfico, mediante la adecuación de los valores del IRI actuales y la edad del pavimento.

Aparte de este tipo de problemas derivados de falta de datos históricos del estado superficial o de su fiabilidad, cabe citar otros dos aspectos que dificultan la calibración del modelo para España:



Operación de mantenimiento: tratamiento superficial.

- El HDM desarrolla un modelo elástico adecuado para firmes flexibles de espesores medios de mezclas bituminosas, por lo que se adapta peor a la rigidez de carreteras con **espesores de firme muy grandes**.
- En **carreteras con tratamiento superficial**, el IRI no es siempre un indicador exacto del grado de deterioro del firme, sino más bien de su ejecución. Esto introduce distorsiones en el modelo, ya que éste considera la regularidad superficial como el principal indicador del estado de un firme y de la necesidad de actuar sobre él.

e) Obtención de resultados

Definidos los datos de partida, se procedió a calcular el modelo, estudiando un máximo de hasta 13 estrategias de actuación para cada uno de los tramos. A estas estrategias finales se llegó después de analizar una mayor combinación de ellas.

El modelo obtiene el beneficio por diferencia entre los costes de cada opción y una alternativa de comparación o base, que en este caso correspondía a la opción mínima de mantenimiento rutinario y bacheo.

f) Aplicación de restricciones económicas

El presupuesto óptimo de inversión estimado por el modelo resultó ser aproximadamente igual que el previsto por la Comunidad de Madrid para los tramos seleccionados.

Sin embargo, y como ejercicio teórico, se analizó con el modelo EBM cómo variaban las estrategias seleccionadas como óptimas al considerar **cinco escenarios presupuestarios** crecientemente restrictivos. La conclusión principal fue que con limitación presupuestaria, se da prioridad a las actuaciones con una mejor relación beneficio/coste, determinada básicamente por dos factores: el tráfico y la mejora de las características superficiales debida a la actuación.

La Comunidad de Madrid aplica generalmente refuerzos de mezcla bituminosa de un espesor algo mayor y más espaciados en el tiempo

5. Comentarios y conclusiones

Los resultados obtenidos fueron en su inmensa mayoría muy razonables, con alguna excepción localizada; lo que permite asegurar que la aplicación del modelo, siempre mejorable con un ajuste más profundo que soslaye los problemas apuntados al hablar de la calibración, se ha mostrado por lo general **coherente con la realidad**, dentro de los límites impuestos por el equipo que llevó a cabo el estudio.

a) Recomendaciones

Como resultado del estudio se elaboró un listado de actuaciones de mantenimiento recomendadas para el período 1995-2001. En líneas generales se recomienda:

- En los tratamientos superficiales, extender mezclas bituminosas a partir de 1 500 veh/día. Por debajo de este umbral, sellos simples frecuentes, y reconstrucciones en carreteras muy deterioradas.
- En las mezclas bituminosas, hacer refuerzos frecuentes (6-9 años, según el tráfico) y de reducido espesor (6 cm).
- No se justifica duplicar la calzada para tráficos medios diarios inferiores a 10 500-12 000 veh/día, según la orografía del terreno. Estas cifras no tienen un carácter general al haberse extraído de los resultados de una muestra limitada (la de los tramos objeto del estudio).

En comparación con estas recomendaciones, la Comunidad de

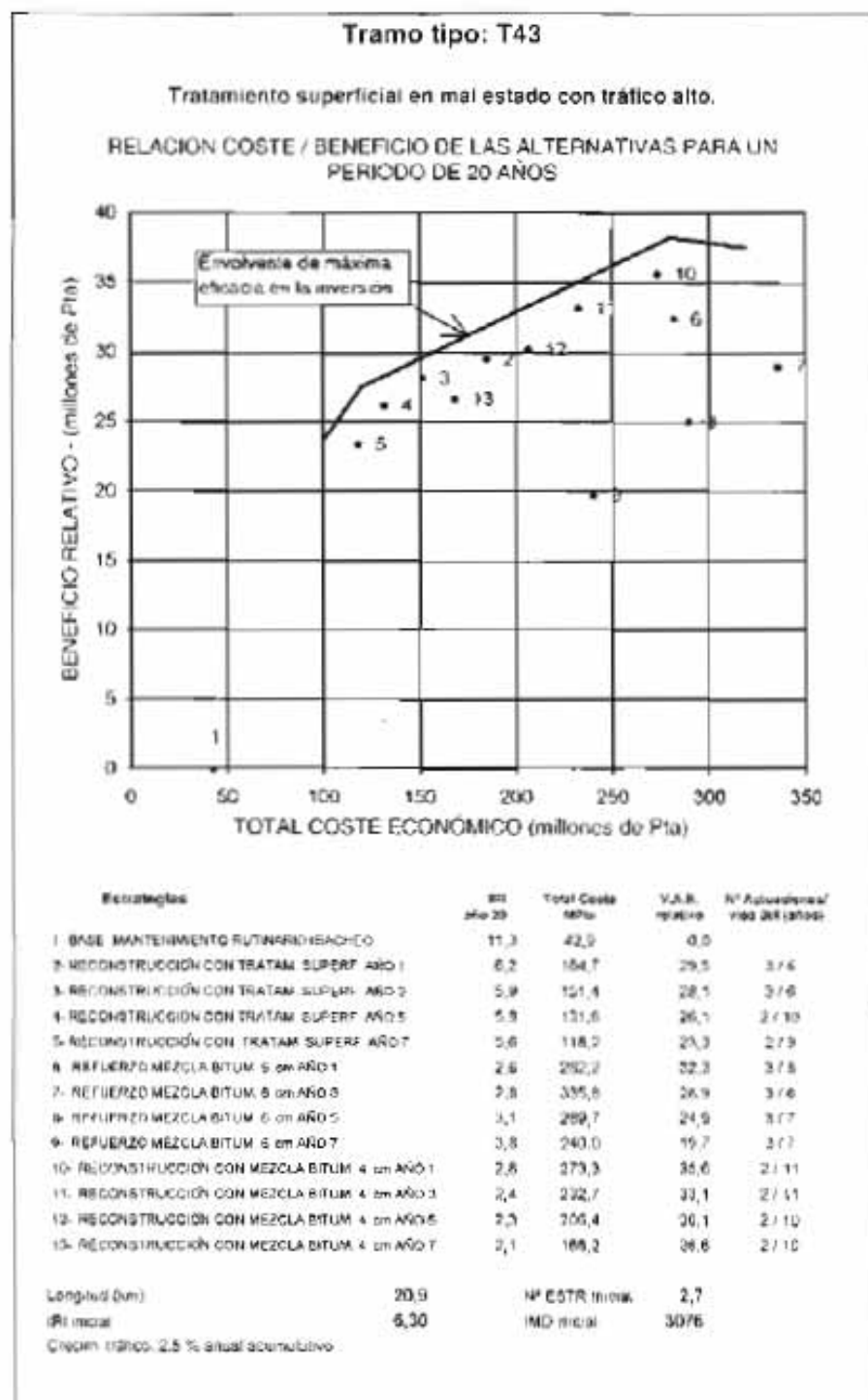


Fig. 1. Análisis de estrategias de inversión en un tramo de la red.

Madrid aplica generalmente refuerzos de mezcla bituminosa de un espesor algo mayor y más espaciados en el tiempo. También emplea preferentemente sellos dobles sobre los tratamientos superficiales, en lugar de sellos simples.

b) Conclusiones generales

Después de trabajar durante más de medio año con el modelo

lo HDM pueden apuntarse los siguientes aspectos favorables y menos favorables:

• Aspectos favorables

- Un sistema de evaluación de inversiones es una ventaja para el conjunto de la sociedad, ya que colabora a la **optimización económica de los recursos disponibles**, aumentando los beneficios al diri-

gir las inversiones hacia las actuaciones más rentables.

- Su implantación, como en **todo** proceso de planificación, obliga a la **racionalización y centralización de todos los datos** referentes a la construcción y conservación de las carreteras y a la creación y mantenimiento de un completo historial de la red.
- Su empleo obliga a establecer unos **planes de actuación a medio y largo plazo**, creando así en la Administración un hábito de planificación.
- Este sistema es una importante ayuda para la **elaboración y posterior justificación** de los presupuestos.
- A pesar de no ser el único sistema existente, el HDM está avalado por importantes centros de investigación internacio-



Operación de reconstrucción.

nales y una dilatada experiencia.

PLANTEAMIENTO DEL BENEFICIO SOCIAL DE LAS INVERSIONES EN EL MANTENIMIENTO DE LAS CARRETERAS

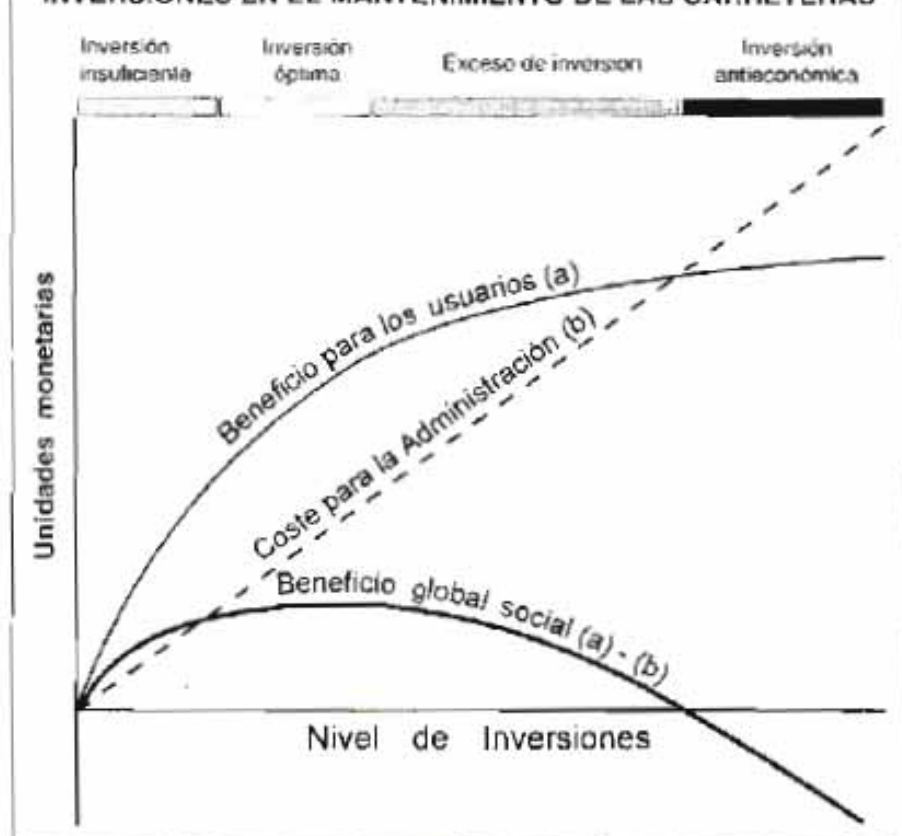


Fig. 2. El beneficio global para la sociedad disminuye a partir de un cierto nivel óptimo de inversión.

- La flexibilidad del sistema permite evaluar también la rentabilidad de actuaciones como duplicaciones de calzada, variantes de trazado, etc.

• Aspectos menos favorables

- La implantación de un sistema de gestión supone un **gasto inicial**, destinado al conocimiento del estado actual de la red, que puede resultar importante. Sin embargo, representa un gasto modesto comparado con el beneficio que su aplicación puede reportar.
- Los resultados en los primeros años pueden **desviarse ligeramente** del óptimo, ya que puede no existir la información histórica suficiente para llevar a cabo una calibración exhaustiva. El aprovechamiento del modelo será tanto mayor cuantos más recursos se dediquen a su calibración y adaptación a las condiciones locales.
- Debe tenerse en cuenta que el modelo HDM no pretende ser un GES.

TOR INTEGRAL de la red (no contempla el mantenimiento de la señalización, del balizamiento, de las estructuras, las decisiones de diseño, etc.). Su objetivo es evaluar la rentabilidad de diferentes actuaciones en carreteras mediante un criterio homogéneo.

- Requiere una **actualización permanente** y un esfuerzo de rigurosidad y continuidad.
- Su implantación puede colisionar con ciertos **hábitos adquiridos** y con la normal resistencia que se opone a todo cambio.
- Hay algunas **limitaciones a su aplicación** (firmas rígidas y semirígidas, explanada helada), que se pretenden solucionar en futuras versiones.

En definitiva, el trabajo efectuado no es sino un paso más hacia la sistematización de la



Operación de mantenimiento refuerzo

gestión de la conservación de las carreteras, que se espera que pueda servir de base para estudios y desarrollos posteriores. ■

José Manuel Ruiz, Inocsa; y
Juan Santos Tie, Symconsult.