

El modelo HDM-4: descripción y posibilidades de aplicación dentro de un sistema de gestión de carreteras.

Carolina Núñez; Ignacio Pérez
Universidade da Coruña. E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

1. INTRODUCCIÓN

Gestionar una carretera conlleva la realización de una serie de actuaciones planificadas con el objetivo de mantener un nivel adecuado de funcionamiento, al menor coste posible. Con el paso del tiempo, las acciones físicas y químicas provocan que el nivel de deterioro de la red aumente. Una correcta conservación debe establecer las medidas de protección y reparación más adecuadas en cada caso, teniendo en cuenta no sólo aspectos técnicos sino también sociales, económicos y medioambientales.

Para ello es necesario disponer de modelos que nos permitan prever el comportamiento del firme, con datos sobre su evolución real y su estado en un momento determinado. El objetivo de estos modelos será el de establecer el coste de las actuaciones a realizar en una red de carreteras para mantener un nivel de servicio adecuado, y así optimizar económicamente las inversiones necesarias.

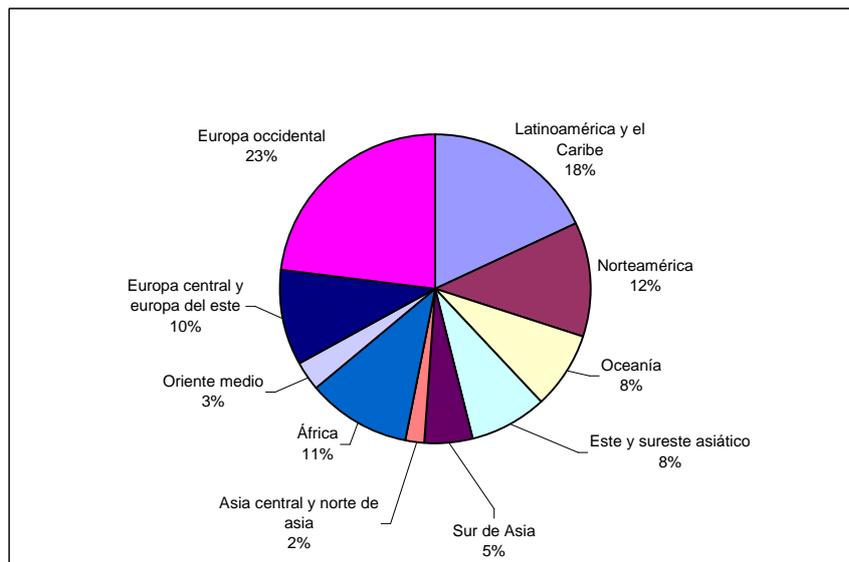
Uno de los sistemas más difundidos es el modelo denominado **HDM** (Highway Design and Maintenance Standars Model). Patrocinado por el Banco Mundial y tras más de tres décadas de experiencia y colaboración con distintas instituciones y universidades de todo el mundo, proporciona la metodología más avanzada hasta el momento para poder predecir la evolución de la vida del firme.

El objeto de este artículo es realizar una descripción del programa HDM-4 y subrayar los requisitos a exigir para su posible aplicación en la red de carreteras española. La calibración de los modelos y su inclusión dentro del sistema de gestión de carreteras, serán los aspectos a tener en cuenta.

2. ANTECEDENTES Y UTILIZACIÓN EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

Los primeros estudios para el desarrollo de un sistema de evaluación de inversiones de carreteras fueron financiados por el Banco Mundial en 1968. Varias instituciones estadounidenses en colaboración con el Transport Research Laboratory (TRL) del Reino Unido emprendieron un proyecto para evaluar los efectos que la construcción y las actuaciones de conservación tienen sobre los costes de operación de los vehículos en carreteras de bajo tráfico. Estos estudios dieron lugar al primer modelo denominado Highway Cost Model (HCM) desarrollado por el instituto tecnológico de Massachussets (MIT).

Figura 1. Utilización internacional del HDM-4



Desde entonces el modelo se ha ido mejorando, a partir de diversos trabajos realizados fundamentalmente en países en vías de desarrollo. Uno de los más importantes trabajos de campo se llevó a cabo en Kenia, con el objetivo de elaborar los modelos que evalúan el deterioro del firme y los costes para los usuarios. En Brasil, entre 1982 y 1986, se desarrollaron nuevas relaciones respecto al comportamiento del firme y los efectos de la operación de los vehículos. El HDM-III incorpora los resultados de estudios posteriores realizados en Kenia, India y el Caribe. La última versión del programa, el HDM-4, ha permitido ampliar

el campo de aplicación del mismo, tras la actualización de los modelos y la incorporación de nuevos aspectos en el análisis como la modelización del comportamiento de firmes rígidos, los efectos de la congestión, el consumo de energía y otros efectos medioambientales.

Según datos de la PIARC (Asociación mundial de la carretera), que gestiona y difunde el programa desde 1998, éste se está aplicando ya en más de 100 países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo. La distribución mundial de su utilización se muestra en la figura 1. Como puede observarse un gran porcentaje de administraciones de carreteras de países con economías no desarrolladas utilizan el modelo HDM. Si bien es muy significativo el 23% y el 12% de administraciones que lo utilizan en Europa occidental y en Norteamérica respectivamente. La intención de la PIARC es la de fomentar su uso en países en vías de desarrollo y con economías en fase de transición.

En Europa el programa se está utilizando en países como Polonia, Albania o Bosnia Herzegovina, con el objeto de adaptar su red de carreteras a los estándares exigidos por la Unión Europea. Por otro lado en Asia se ha promovido su utilización a través de programas de formación, que también se están aplicando en numerosos países de Latinoamérica. Por ejemplo, México lo ha adoptado recientemente para su empleo en los 41000 kilómetros de la Red Federal de Carreteras Libre de Peaje, en el marco de un crédito externo firmado entre el Gobierno Federal y el Banco Mundial con el fin de mejorar la planificación de la red.

Uno de los objetivos prioritarios para la PIARC es crear un foro mundial que permita poner en común los resultados y conclusiones obtenidos en todos los países respecto a la utilización del programa, coordinando los proyectos para la calibración del mismo y publicando los casos de estudio llevados a cabo, que pueden ser de gran utilidad para su aplicación en otros países.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

El objetivo del programa es el de optimizar el coste del transporte por carretera, entendido éste como la suma de los costes asumidos por el estado y los costes generados sobre los usuarios. Dentro de los costes de la administración hay que incluir los derivados de la construcción de la carretera y su posterior conservación y mantenimiento. Para el usuario, los costes se avalúan en términos de costes de operación del vehículo: consumo de combustible, coste del tiempo de viaje, costes derivados de accidentes, etc.

En particular, el HDM permite evaluar ambos flujos de costes para un determinado periodo de análisis. El año de inicio del análisis podrá ser el primer año de construcción, el año de puesta en servicio o simplemente el año actual. El programa determinará a lo largo de la vida útil restante del firme, la evolución de su estado. En función de dicho estado se establecen las distintas alternativas de actuación y se calculan los costes generados. El concepto más amplio del análisis del ciclo de vida se ilustra en la figura 2.

En el HDM-4 mediante un primer módulo se introducen los datos de partida, cualquier error a la hora de imponer las hipótesis de partida es detectado a este nivel e interrumpe el análisis. El segundo módulo evalúa los deterioros de la carretera y una serie de efectos. En particular se realiza una serie de análisis a partir de los modelos siguientes:

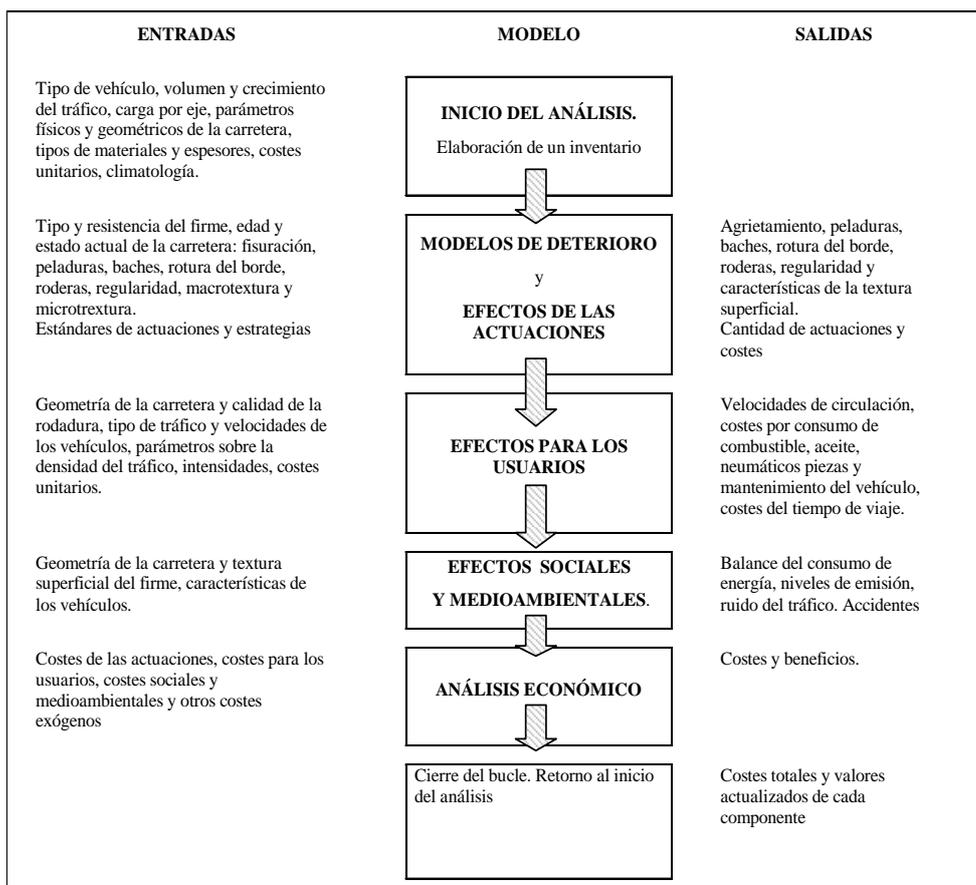
- Deterioro de la carretera (**RD**): Predice el deterioro del firme.
- Efectos de las actuaciones (**WE**): Implementa programas de actuaciones y determina sus costes.
- Efectos sobre los usuarios (**RUE**): Determina los costes de circulación de los vehículos, accidentes y el tiempo de viaje.
- Efectos sociales y medioambientales (**SEE**): Determina los efectos producidos por emisiones y ruidos y predice el número de accidentes y la cantidad de consumo de energía.

Un tercer módulo realiza el análisis económico. Calcula los indicadores económicos de las distintas alternativas de conservación planteadas. Por último, el cuarto módulo, de generación de resultados, proporciona una serie de informes sobre el estado del firme, los costes de operación de los vehículos y el análisis económico.

Por otra parte, es importante aclarar que el programa admite tres niveles de aplicación: planificación, programación y proyecto. El nivel de planificación estratégica permite un análisis global del sistema de carreteras, para la preparación de estimaciones a largo plazo sobre las necesidades de la red y las inversiones necesarias bajo distintos escenarios presupuestarios. El nivel de programación identifica y prioriza las actuaciones en distintos tramos de la red, según las disponibilidades presupuestarias en cada caso. Por último, el nivel de proyecto sería la etapa final, en la que se evalúan para un tramo en concreto los beneficios económicos de las distintas opciones de actuación para así seleccionar la más adecuada.

El modelo HDM-4 no permite la realización de la asignación y distribución del tráfico en una red de carreteras.

Figura 2. Análisis del ciclo de vida del firme con el HDM-4



Además, es muy importante tener en cuenta que para poder utilizar los modelos anteriormente mencionados es imprescindible disponer de una base de datos, que no está incluida en el programa. Ésta será tan completa como se quiera en función del grado de complejidad del análisis que se vaya a realizar. Deberá considerar, como mínimo, los siguientes aspectos:

- Sistema de referenciación.
- Tráfico.
- Clima.
- Inventario.

El **sistema de referenciación** debe permitir definir todas las carreteras de la red, su localización y en ellas el emplazamiento de cualquier punto. Debe tratarse de un sistema “biunívoco”, universal e independiente. La evolución del estado del firme depende de la intensidad y composición de **tráfico** que circula por la carretera y por lo tanto será necesario evaluar su influencia. Esta influencia se mide en términos de cuatro variables que intervienen muy directamente en los modelos utilizados para el análisis de la vida útil del firme:

- Intensidades, composición y tasas de crecimiento del tráfico
- Carga por eje y número de ejes equivalentes
- Capacidad y relaciones capacidad-velocidad de la carretera
- Distribución horaria de la intensidad de tráfico

El programa establece una clasificación para cada región de estudio según el tipo de **clima** predominante, teniendo en cuenta la temperatura, la humedad y la pluviometría.

En cuanto al **inventario** es imprescindible para abordar un sistema de gestión y dependerá de su coste, la precisión exigida y la posibilidad de ser mejorado a largo plazo. La información para su elaboración se puede obtener de distintas fuentes, datos históricos, proyectos originales o reformados, datos de campo e incluso de la memoria del personal que participó en la obra y en las tareas de conservación.

El contenido básico de un inventario de carreteras se compone de los siguientes aspectos:

- Características geométricas: anchuras, curvaturas, pendientes y la tramificación correspondiente.

- Características del suelo, drenaje natural y obras específicas de evacuación y canalización de aguas.
- Datos de la sección de firme: características de los materiales de cada capa y espesores.
- Historial del firme y rehabilitaciones efectuadas. Si se dispone de datos suficientes el análisis histórico puede ser muy fructífero al poder tratar y comprobar la evolución de los modelos.

En los siguientes apartados se hace una breve descripción de los modelos de deterioro y de efectos de las actuaciones, así como de los efectos de los usuarios, sociales y medioambientales contemplados en el HDM-4, ciñéndose, por razones de espacio, esta exposición al caso de firmes flexibles. No obstante, el modelo también contempla los modelos correspondientes al caso de firmes rígidos y caminos sin pavimentar.

4. DETERIORO DE LA CARRETERA (RD)

El deterioro de la carretera es una función que depende de muchos factores: el diseño geométrico y la sección de firme elegida para el tipo de carretera en estudio, capacidad estructural, calidad de la construcción, intensidad y crecimiento de tráfico, condiciones medioambientales y políticas de conservación planteadas.

Todos estos factores intervienen en los modelos que se utilizan para predecir el deterioro del firme. El modelo permite estudiar el comportamiento de cualquier tipo de firme: flexibles, rígidos y hasta caminos de tierra sin pavimentar. Los firmes rígidos fueron incorporados en la última versión del modelo. En la tabla 1 se observa una clasificación general de los materiales utilizados en la capa de rodadura y de base de firmes con pavimento bituminoso.

Tabla 1. Descripción de los materiales de la capa de rodadura y base.

Tipo de capa de rodadura		Materiales de la capa de rodadura	
Abreviatura	Descripción	Abreviatura	Descripción
AM	Mezcla bituminosa	CM	Mezcla bituminosa en frío
		HRA	Mezcla bituminosa en caliente
		PA	Mezcla bituminosa drenante
		PMA	Mezcla bituminosa en caliente con betún modificado
		RAC	Mezcla bituminosa con betún modificado con caucho de neumático.
ST	Tratamiento superficial	CAPE	Riego de sellado superficial
		DBSD	Tratamiento superficial doble
		SBSD	Tratamiento superficial sencillo.
		PM	Macadam de penetración
		SL	Lechada bituminosa.
Tipos de base		Materiales de la capa de base	
Abreviatura	Descripción	Abreviatura	Descripción
GB	Base granular	CRS	Zahorra artificial
		NG	Zahorra natural
AB	Base bituminosa	AB	Base bituminosa
SB	Base estabilizada	CS	Estabilización con cemento
		LS	Estabilización con cal

Con el fin de modelizar el deterioro del firme se adoptó un acercamiento **teórico-empírico** que utiliza tanto estudios teóricos para la elección previa de las variables que afectan al comportamiento del firme como técnicas estadísticas que cuantifican los impactos de dichas variables. Por lo tanto, los modelos resultantes combinan las bases teóricas de los modelos mecánicos con las bases experimentales de los comportamientos observados en los estudios empíricos.

El procedimiento general para poder modelizar el deterioro de cada tramo de carretera, en un año concreto, se puede estructurar según los siguientes pasos.

1. Entrada de datos: definición del estado del firme

En primer lugar es necesario conocer el estado del firme al comienzo del periodo de análisis. Para realizar una identificación rigurosa de su estado será necesario determinar los materiales y capas que lo componen, estado del drenaje, edad, actuaciones que se han llevado a cabo, condiciones medioambientales de la zona y datos de tráfico.

También, se necesita estimar la capacidad estructural del firme a través del número estructural ajustado (SNP). Este parámetro se fundamenta en el concepto del número estructural (SN) de la ASSHTO. Como es sabido, mediante este método de dimensionamiento a cada capa se le asigna un coeficiente estructural que representa la contribución de cada una de ellas al comportamiento total del firme. Para que no se sobrestime el aporte estructural de firmes con capas de un gran espesor, el SNP introduce un factor de

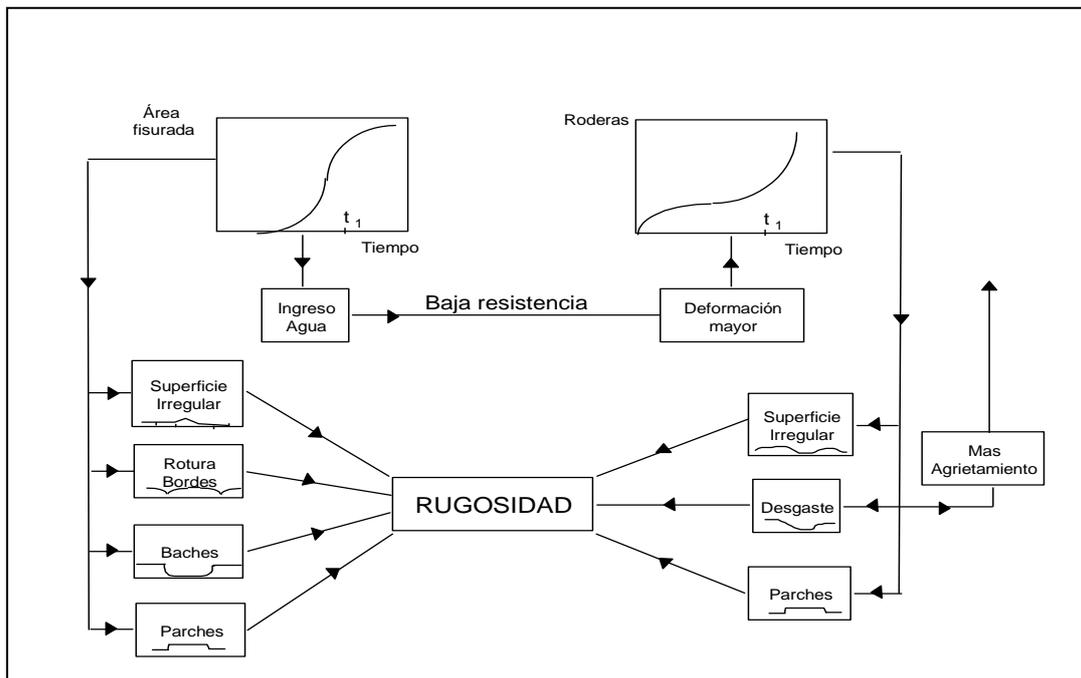
ponderación que reduce, al aumentar la profundidad, la contribución de la subbase y de la explanada. También, se tiene en cuenta los efectos del drenaje en la capacidad estructural del firme mediante un factor de drenaje.

De forma simplificada se puede calcular el valor del **SNP** a partir de las medidas de las deflexiones obtenidas mediante la viga Benkelman o con el deflectómetro de impacto.

Otro parámetro a tener en cuenta en el estudio del estado del firme es lo que se denomina *calidad de construcción*. Una construcción de mala calidad da lugar a una gran variabilidad, tanto en el funcionamiento como en las propiedades de los materiales. Este concepto se evalúa a través de tres parámetros:

- ❑ **COMP:** Determina el grado de compactación relativa entre la capa de base, subbase y explanada.
- ❑ **CDS:** Es un indicador de los defectos de construcción en capas de rodadura bituminosas. Representa, en general, el nivel de contenido de betún y la rigidez relativa del material.
- ❑ **CDB:** Indica los defectos de construcción en la base. Se utiliza al evaluar las áreas con baches.

Figura 3 Mecanismos de interacción



2. Cálculo de las variaciones en el estado del firme y determinación del incremento producido para cada tipo de deterioro así como del valor medio al final del período de análisis.

El modelo tiene en cuenta los siguientes deterioros (ver figura 3 mecanismos de deterioro):

Fisuración: Distingue dos tipos de fisuración:

- ❑ **Fisuración estructural:** Debida a las cargas del tráfico, edad y condiciones medioambientales. Fisuras estrechas: 1-3 mm de ancho. Fisuras anchas > 3 mm de ancho.
- ❑ **Fisuración térmica:** Causada, generalmente, por cambios extremos de temperatura o por condiciones de congelación-deshielo, por lo que ocurrirá solamente en algunos climas.

Se modeliza por separado cada tipo de fisuración con el objeto de prever la fase de inicio y la fase de progresión de las grietas. Una de las variables a tener en cuenta es el indicador de defectos de construcción, CDS. Los modelos de fisuración predicen la suma de áreas rectangulares que circunscriben el deterioro, expresada como un porcentaje del área total de la calzada.

Desprendimiento del árido: Este tipo de deterioro varía considerablemente según las diferentes regiones en los que ocurra debido a los métodos de construcción aplicados, especificaciones técnicas, disponibilidad de materiales y prácticas locales. Los modelos para calcular el inicio y evolución del desprendimiento dependerán fundamentalmente del indicador de los defectos de construcción (CDS) y del número de ejes equivalentes. Los modelos predicen el área de pérdida de material en la superficie de rodadura como un porcentaje del área total de la calzada.

Baches: Los baches se definen dentro del programa como aquellas cavidades producidas en la superficie de la carretera con un diámetro medio igual o superior a 150 mm y al menos 25 mm de profundidad. El comienzo y la evolución de la formación de baches se modeliza a partir del nivel de fisuración y del porcentaje de la superficie del firme con desprendimiento, calculados previamente. En los modelos intervienen además los siguientes parámetros:

- Espesor de la capa de rodadura.
- Indicador de los defectos de construcción (CDS).
- Número de ejes equivalentes.
- Precipitación media mensual.

El resultado se expresa en términos de número de baches con un área de 0,1 m² por kilómetro. La capacidad de cada uno de estos baches se asume que es de 10 litros (es decir, 100 mm de profundidad).

Rotura del borde: Tiene lugar en carreteras de calzada estrecha con arcenes sin pavimentar donde las ruedas de los vehículos pasan por encima o muy cerca del borde del firme. El modelo prevé que ésta no ocurrirá en carreteras con una anchura de calzada superior al máximo de 7,5 metros.

Los parámetros a tener en cuenta a la hora de evaluar la rotura son:

- IMD.
- Porcentaje de tiempo durante el cual los vehículos utilizan el arcén debido a la anchura de la carretera.
- Escalón existente entre el firme y el arcén.
- Precipitación media mensual.
- Velocidad media de circulación.
- Anchura de la calzada.

El modelo predice la pérdida de material expresada en m²/km al año.

3. Verificación

Al evaluar el deterioro del firme es importante asegurar que la suma de la superficie dañada y la no dañada sea igual al 100 %, en cualquier año de análisis. El área total considerada estará afectada por:

- Fisuración.
- Desprendimiento del árido.
- Baches.
- Rotura del borde.
- Área sin desperfectos: Esta área consiste en la capa de rodadura original que está aún en buen estado desde la última actuación y en el área que ha sido tratada.

4. Cálculo de las características superficiales del firme

Para predecir las características superficiales se aplican modelos continuos que son función de los deterioros estudiados previamente (ver figura 3). Se estudian las roderas y la regularidad superficial. También, se evalúa la textura y su comportamiento ante el deslizamiento.

Roderas: Se evalúan al final del año de análisis una vez calculados los valores de los deterioros superficiales. La profundidad de la rodera se mide en mm. y se define como la suma de cuatro componentes:

- Densificación inicial, que depende del grado de compactación de la base y la sub-base (COMP).
- Deformación estructural, evaluada antes y después del agrietamiento. Dependerá del número estructural ajustado (SNP), el número de ejes equivalentes y la media mensual de precipitación.
- Deformación plástica. Obedece a cambios en las características de los materiales. Depende del *punto de reblandecimiento* del betún y del *porcentaje de huecos en mezcla*.
- Utilización de neumáticos con cadenas o clavos. Su efecto sobre las rodadas dependerá del porcentaje de vehículos con cadenas, de la utilización de sal para evitar la formación de hielo, de la velocidad media de circulación y del ancho de la calzada.

Una rodera se expresa como la profundidad máxima (en mm) bajo una regla de 2 metros colocada transversalmente al recorrido de las ruedas.

Regularidad superficial (Rugosidad en Latinoamérica): El modelo que predice la variación en la regularidad superficial dependerá de cinco aspectos:

- La capacidad estructural del firme, que se evalúa a través del número estructural ajustado (SNP).
- El grado de fisuración del firme.

- La profundidad de las roderas.
- El número de baches por kilómetro.
- Las condiciones ambientales, que incluyen temperatura, variaciones de humedad y deformación del terreno.

Los modelos predicen el incremento de la regularidad superficial en función de la suma de estos cinco factores, expresado mediante el índice internacional de regularidad en **IRI** (m/km). El programa determina, a partir del valor inicial, el incremento de la regularidad para el periodo de análisis especificado (normalmente un año) y el valor final de la regularidad.

Textura superficial: El modelo evalúa por separado la macrotextura y la microtextura. Determina la variación de estas dos propiedades a lo largo de la vida útil del firme. La profundidad de la textura, es decir la macrotextura, se mide en mm (mediante el ensayo de la mancha de arena) y depende fundamentalmente del número de ejes equivalentes que circulan por la carretera. La predicción de la resistencia al deslizamiento, caracterizada por la microtextura, depende de la intensidad de tráfico y de la velocidad media de circulación. Se mide de forma continua el coeficiente de rozamiento transversal con el equipo SCRIM y el coeficiente de rozamiento puntual medido con el péndulo Británico del TRL.

5. Almacenamiento de los resultados

Los valores obtenidos se almacenan con tres fines:

- Utilización posterior en los siguientes modelos: efectos de las actuaciones, efectos para los usuarios y efectos sociales y medioambientales (ver figura 1).
- Actualización de datos para el siguiente periodo de análisis.
- Realización de los informes pertinentes sobre la evolución del estado del firme.

5. EFECTOS DE LAS ACTUACIONES (WE)

Será necesario definir los tipos de actuaciones de conservación que se van a ejecutar de acuerdo con los objetivos de la administración. Para modelizar sus efectos se deberán distribuir a lo largo del periodo de análisis. Una serie de modelos matemáticos estimarán las mediciones de cada tipo de actuación. De esta forma se estimará la financiación necesaria por parte de la administración de carreteras para el desarrollo y conservación de la red.

Tipos de actuaciones

El programa clasifica los tipos de actuaciones por categorías. De esta forma se definen dos categorías diferentes: la conservación y el desarrollo (tabla 2).

La **conservación** del firme incluye la realización de aquellas actividades necesarias para contrarrestar el deterioro de la carretera y para disminuir los costes de los usuarios. Debe permitir mantener la carretera en condiciones óptimas para su utilización permanente. En esta categoría se incluye: **la conservación rutinaria**, que comprende actuaciones que se realizan todos los años, **la conservación periódica**, que incluye actuaciones planificadas para ser realizadas a intervalos de varios años y **actuaciones especiales**, definidas como aquellas cuya frecuencia no se especifica con anterioridad. Dentro de las especiales se incluyen los trabajos de emergencia y las operaciones de vialidad invernal.

Las actuaciones de **desarrollo** están dirigidas a aumentar la capacidad y los niveles de servicio de la red, al proporcionar un firme de mejor calidad y al mejorar las características geométricas de la carretera. Todo ello con la intención de disminuir el coste total del transporte y mitigar los impactos medioambientales. Incluye las actuaciones de **mejora** y de **construcción**. Las de mejora tienen por objetivo aumentar la capacidad de la carretera cuando ésta cercana al final de su vida útil o cuando ha sufrido un cambio imprevisto en su utilización; mientras que las de construcción van dirigidas principalmente a la creación de un tramo nuevo de carretera.

Estándares de las actuaciones.

Los estándares fijan los niveles de conservación que la administración de la carretera desea alcanzar, con la intención de cumplir unos objetivos funcionales. Un estándar es una alternativa de conservación que agrupa un conjunto de actuaciones, con un criterio de intervención que determina cuándo las mismas deben ser ejecutadas. En términos generales, los niveles de intervención establecen el nivel mínimo de servicio permitido.

Cada estándar se define en función del tipo de capa de rodadura, características del tráfico y la operatividad, teniendo en cuenta una serie de aspectos ingenieriles, económicos y medioambientales. Los estándares se agrupan en los dos tipos siguientes:

- Estándares de conservación. Por ejemplo, un estándar de conservación rutinaria o básico puede estar compuesto de las actividades siguientes: limpieza, bacheo y sellado de fisuras. Generalmente un

estándar de mayor envergadura implica la definición de actividades de conservación rutinaria. Por ejemplo, se puede definir un estándar de refuerzo de la manera siguiente: limpieza, bacheo, sellado de fisuras y refuerzo de 6 cm al alcanzar un IRI de 3 m/km.

- Estándares de mejora o construcción. Por ejemplo, ensanche, adición de carriles, un desdoblamiento.

Tabla 2. Clasificación de las actuaciones

Categoría	Clase	Tipo	Actividad/Operación
Conservación	Conservación rutinaria	Actuaciones sobre el firme	Bacheo, reparación del borde, sellado de fisuras, relleno puntual, reparación de los arcenes, etc.
		Drenaje	Reparación de alcantarillas y limpieza de drenajes
		Rutinas diversas	Control de la vegetación, marcas viales, señalización, etc.
	Conservación periódica	Tratamiento preventivo	Sellado de humo, rejuvenecimiento, ajuste de pasadores de transferencia de carga, sellado de juntas, etc.
		Renovación superficial o restauración	Tratamiento superficial, lechada bituminosa, sellado de la capa de rodadura, reemplazo de la losa, molida de diamante, etc.
		Rehabilitación	Refuerzo fino, fresado y reemplazo, incrustación, refuerzo.
		Reconstrucción	Reconstrucción parcial, reconstrucción total del firme.
	Actuaciones especiales	Emergencia	Limpieza de escombros, limpieza y reparación de socavones, retirada de accidentes, etc.
		Invierno	Retirada de nieve, adición de sal, gravilla, etc.
	Desarrollo	Mejora	Ampliaciones
Mejora del trazado			Mejoras geométricas verticales y horizontales, mejoras geométricas en las intersecciones.
Obras fuera de la calzada			Adición y mejora de arcenes, adición de carril para TNM, mejora del drenaje lateral, etc.
Construcción		Aumento de capacidad	Cambio del tipo de capa de rodadura y mejora geométrica longitudinal y transversal de una carretera existente.
		Tramos nuevos	Construcción de un tramo de carretera nuevo o desdoblamiento de una existente.

Cálculo de los efectos de las actuaciones

El efecto de cada tipo de estándar de conservación se evalúa con el proceso de análisis siguiente:

Definición de los criterios de intervención

Los criterios de intervención determinan el curso y los límites de las actuaciones a realizar. Cada criterio se puede definir de forma *programada*:

- A intervalos de tiempo entre intervenciones (por ejemplo, tratamiento superficial monocapa cada cuatro años, refuerzo de 6 cm cada 5 años, sellado de grietas cada cuatro años).
- En un momento específico de la vida útil del firme (por ejemplo, ensanche en el año 2005).

También se puede definir como *respuesta* a niveles críticos del umbral especificado por el usuario en función de la condición del firme, estado del drenaje, velocidad de los vehículos, intensidad de tráfico y accidentes. Por ejemplo, refuerzo de 8 cm cuando se alcance un IRI de 3.5 m/km; tratamiento superficial monocapa al tener una superficie de grietas mayor del 20% del área total de la calzada.

El modelo determina el estándar que es aplicable en el año. Solamente un estándar de mantenimiento o de mejora se puede aplicar a una sección en cualquier año de análisis. Examina los criterios de intervención y los límites definidos para determinar la necesidad de ejecutar los trabajos en el orden siguiente: Primero intervención programada, después intervención tipo respuesta.

Duración de las actuaciones

La duración de las actuaciones determina cuándo hay que considerar sus efectos dentro del periodo de análisis. Algunas actuaciones tienen una duración menor de un año (normalmente todos los estándares de conservación), en cuyo caso los efectos comenzarán a ser efectivos al comienzo del año siguiente del análisis. Otras actuaciones son de duración superior a un año, asumiendo que las características de la carretera no se modifican hasta que finaliza el año en el que concluyen los trabajos.

Costes unitarios de las actuaciones

Para llevar a cabo el análisis económico las cantidades físicas de las actuaciones proyectadas se multiplicarán por los costes unitarios de las mismas. Los costes se especifican en distintos términos según

el tipo de actividad. Por ejemplo, el coste de un refuerzo se define por metro cuadrado mientras que el coste de las actuaciones sobre el drenaje se define por kilómetro.

Efectos de las actuaciones

Los efectos a corto plazo se referirán al estado del firme y, por lo tanto, habrá que reajustar los parámetros que afectan a su resistencia y estado. Por ejemplo, después de un refuerzo la fisuración se ajusta a cero; mientras que la regularidad se ajusta a 2 m/km (IRI). También, si procede, después de las obras se debe ajustar el tipo de sección del firme. Estas modificaciones, a largo plazo influirán a la hora de evaluar la tasa de deterioro de la carretera, los costes sobre los usuarios, el consumo energético y el impacto medioambiental (ver figura 1).

Así, ambos efectos, el inmediato y el de largo plazo, se combinan para determinar los beneficios de la realización de distintas combinaciones de estándares de actuaciones en diferentes momentos a través del período analizado.

6. EFECTOS SOBRE LOS USUARIOS DE LA CARRETERA (RUE); EFECTOS SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES (SEE)

Los efectos sobre los usuarios de la carretera se evalúan en términos de costes de operación de los vehículos (VOC), de costes de los accidentes y de valor del tiempo de viaje.

6.1 Costes de operación de los vehículos

Será necesario hacer una identificación de los tipos de vehículos que circulan por la red. El programa los clasifica en motorizados y no motorizados. El modelo calcula las velocidades de circulación bajo diversas hipótesis de relación velocidad-intensidad. En la última versión del modelo se ha introducido condiciones de tráfico congestionado. Los costes de circulación se estiman en función de las características de cada tipo de vehículo y de la geometría, tipo de capa de rodadura y estado de la carretera. Éstos se obtienen multiplicando las cantidades físicas de los diferentes componentes por sus costes unitarios.

Para evaluar estos costes el modelo RUE considera los siguientes componentes:

- Consumo de combustible
- Consumo de aceite
- Neumáticos y repuestos
- Mantenimiento del vehículo
- Depreciación
- Interés
- Horas de conductor/chófer
- Gastos generales

Costes de accidentes

Los costes derivados de los accidentes son muy difíciles de evaluar. Aún así el programa HDM incluye un procedimiento consistente en definir una serie de **tablas de comparación** de escalas de accidentes. Estas tablas son, básicamente, descripciones generales de los índices de accidentes previstos, establecidas de acuerdo a un grupo de propiedades del tráfico y de la carretera. Por ejemplo, tipo y diseño geométrico, intensidad de tráfico y presencia de transporte no motorizado.

Coste del tiempo de viaje

El tiempo de viaje de los usuarios se evalúa a partir de la velocidad media de circulación, la distancia y el coste unitario de la hora de viaje del usuario. La velocidad media de circulación será a su vez función del estado del firme, anchura de la carretera y trazado. El valor del tiempo de viaje dependerá del país dónde se esté realizando el análisis y su influencia en el coste total sobre los usuarios puede llegar a ser muy importante.

6.2 Efectos sociales y medioambientales

Los costes sociales y medioambientales se evalúan a partir del consumo energético y el nivel de emisiones de los vehículos. Su consideración permite adoptar soluciones para reducir sus efectos, obteniendo beneficios, tales como, la disminución de los costes de circulación, reducciones en el nivel de contaminación y un descenso en los niveles de importación de energía y por lo tanto una reducción del déficit en la balanza de pagos.

Balance energético

Los parámetros a tener en cuenta a la hora de evaluar el consumo de energía se clasifican en tres categorías:

- Energía empleada por vehículos motorizados

- Energía empleada por vehículos no motorizados
- Energía empleada para la construcción y conservación de la red.

Emisiones

El programa determina el nivel de emisiones en función del consumo de combustible, que a su vez dependerá de la velocidad de circulación, parámetro que se calcula a partir de las características de la carretera y del propio vehículo. Los modelos consideran los siguientes componentes:

- Hidrocarburos
- Monóxido de carbono
- Óxido de nitrógeno
- Dióxido de sulfuro
- Dióxido de carbono
- Partículas
- Plomo

6.3 Otros costes exógenos

Existe otro tipo de costes, directamente relacionados con el tipo de carretera en estudio, que deben ser incluidos en el análisis económico. Por ejemplo, los beneficios derivados del desarrollo socio-económico de una determinada zona tras la mejora en su red de carreteras; como el aumento de la actividad industrial o agrícola, el incremento de puestos de trabajo, la reducción de los niveles de ruido (será incluido en la próxima versión), etc. Dichos costes no pueden ser calculados a partir de modelos empíricos, ya que dependen de muchas variables que habrá que determinar en cada caso concreto. Sin embargo deben incluirse en el análisis como costes exógenos ya que su influencia es decisiva a la hora de seleccionar una alternativa de conservación.

7. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del flujo de costes y beneficios se utiliza para comparar la viabilidad económica de las diferentes alternativas. También proporciona criterios que ayudan a la hora de tomar decisiones sobre las alternativas más adecuadas. Asimismo, el análisis económico se puede aplicar, también, para determinar cómo los estándares técnicos y las estrategias de actuación influyen en el comportamiento del firme a lo largo de su vida útil. El análisis incluye las siguientes fases:

1. Formulación de las alternativas y estándares de conservación.
2. Identificación y cuantificación de los costes y beneficios en los que se incurrirá a lo largo de la vida útil de la carretera.
3. Modelización de los impactos futuros sobre la carretera y sobre el flujo del tráfico de las alternativas.
4. Comparación económica de las diferentes alternativas, incluyendo:
 - Descuento de los flujos anuales de costes y beneficios para el año base elegido.
 - Comparación del flujo de costes entre cada par de alternativas.
 - Cálculo de los indicadores económicos: valor actualizado neto (VAN), tasa interna de rendimiento (TIR), relación beneficio-coste y beneficios en el primer año.

7.1. Clasificación de los beneficios

Los costes y los beneficios debidos a las mejoras en la carretera, se clasifican dentro de tres amplias categorías:

1. **Beneficios y costes expresados en términos monetarios.** Por ejemplo, costes de la circulación de los vehículos, ahorros en tiempo de viaje, costes de accidentes, etc.
2. **Beneficios y costes expresados en términos no monetarios.** Por ejemplo, seguridad de la circulación vial, contaminación de las emisiones de los vehículos, ruido del tráfico, etc.
3. **Beneficios y costes no cuantificados.** Por ejemplo, mayor bienestar social, impactos ecológicos, etc.

El análisis económico considera, directamente, sólo los beneficios y los costes expresados en términos monetarios. Los otros costes y beneficios deben ser tenidos en cuenta, como ya se ha indicado, como costes y beneficios exógenos.

7.2. Optimización

El propósito del análisis económico es calcular los beneficios que se obtendrán para distintas opciones de conservación o mejora y seleccionar el grupo de inversiones que se realizará en el tramo analizado. Por tanto, se trata de un problema de optimización. Aunque, normalmente, no se consideran todas las posibles soluciones. Las opciones de inversión sobre cualquier tramo de la carretera están relacionadas.

Las tres funciones objetivas que permiten definir la alternativa óptima son:

1. **Maximización de los beneficios económicos, a través del VAN.** Selección de una combinación de estrategias de inversión; que, aplicada a diferentes tramos, maximice el *Valor Actual Neto* (VAN) de toda una red de carreteras. El coste de financiación es menor que el presupuesto disponible.
2. **Maximización de la mejora en el estado de la red.** En lugar del VAN se utiliza la reducción del IRI en cada tramo de carretera multiplicado por la longitud del tramo.
3. **Minimización del coste de las actuaciones para lograr un objetivo respecto al estado de la red.** Esta opción se usa para llevar a cabo la planificación estratégica. Durante el periodo analizado se especifica un objetivo sobre el promedio del IRI de los tramos de carretera. El procedimiento de optimización se reduce a una selección de las estrategias de actuación para las cuales el promedio de IRI es igual o algo menor al IRI fijado y que tiene el mínimo coste total de financiación.

8. POSIBILIDADES DE UTILIZACIÓN EN ESPAÑA

Implantación dentro de un sistema de gestión

No hay que olvidar que el HDM-4 no es más que una herramienta para la realización del análisis económico de las distintas opciones de inversión para una red de carreteras. Es decir, constituye una parte, muy importante, dentro de un sistema de gestión de carreteras. Pero un sistema de gestión debe incluir también otros aspectos entre los cuales cabe destacar:

- La elaboración de una base de datos completa y actualizada sobre la red de carreteras que se quiere gestionar.
- El establecimiento de un sistema de auscultación, que permita conocer en cada momento los parámetros que definen el estado de deterioro de la carretera.
- La definición de los criterios a imponer en cuanto a la política de gestión y conservación de la red, según las disponibilidades económicas y las previsiones de desarrollo social y territorial de cada zona en estudio.

Calibración

Hay que tener en cuenta que los modelos en los que se fundamenta el programa han sido desarrollados en países con condiciones tecnológicas, medioambientales y económicas muy concretas. Por ello para su utilización será necesario la adaptación de dichos modelos a las circunstancias particulares de cada país. La fiabilidad de los resultados dependerá por tanto de dos aspectos. Por un lado, la entrada de datos, es decir la correcta interpretación de los datos necesarios para llevar a cabo el análisis y el ajuste de los mismos a las condiciones reales de partida. Por otra parte habrá que evaluar si los resultados se corresponden con el comportamiento real del firme observado.

En el caso de España la adaptación y calibración de los modelos es fundamental. Ello requiere la recopilación de una gran cantidad de datos sobre el comportamiento de los firmes de cada región. Está claro que existirán diferencias muy obvias entre la evolución de un firme en el norte de España, en donde el régimen de lluvias es muy abundante y por lo tanto la presencia agua es un factor fundamental a la hora de evaluar el fallo de una sección de carretera, que en Andalucía donde las altas temperaturas que se alcanzan en los meses de verano tienen una gran influencia en los deterioros. Una posible clasificación climática podría establecerse a partir de las zonas térmicas estivales y de las zonas con precipitación anual semejante, definidas en la norma 6.3-IC para la corrección de las deflexiones. Asimismo, es evidente que influirán en los modelos del HDM-4 las características de los materiales y los terrenos de las diferentes zonas peninsulares.

Para llevar a cabo esta calibración serán necesarios, como mínimo, datos de deflexiones, índice de regularidad superficial y estado del drenaje. Estos datos deben extenderse a varios años de evaluación para poder comparar los resultados predichos con los modelos del HDM-4 y el comportamiento real del firme observado. De todas formas, el programa admite distintos niveles de detalle a la hora de calibrar los parámetros en función del tipo de análisis que se pretende acometer.

Tipología de firmes

Un inconveniente, que ha sido eliminado en la última versión del modelo, consistía en las secciones de firme que consideraba el programa. En este sentido, cabe decir que en las primeras versiones los firmes eran flexibles con capa de rodadura conformadas por tratamientos superficiales o mezclas bituminosas sobre capas de materiales granulares. Lógicamente, esta tipología de firmes está en concordancia con la existente en las redes de carreteras de los países en vías de desarrollo donde, en principio, se calibraron los modelos. Actualmente, este inconveniente ha sido subsanado ya que en la última versión ya existe la posibilidad de estudiar redes de carreteras con firmes semiflexibles, semirrígidos y rígidos.

Metodología

Casi todos los parámetros que utiliza el modelo HDM-4 son de plena utilización en nuestro país en el proyecto, construcción y rehabilitación de firmes de carreteras. Una de las excepciones es el número

estructural ajustado (**SNP**); que, como se ha dicho, está basado en el número estructural (**SN**) empleado por la **ASSHTO** en su *Guide for Design of Pavements Structures*, que no tiene aplicación en España.

9. CONCLUSIÓN

El **HDM-4** no es un sistema de gestión en sentido estricto, sino más bien un procedimiento para la evaluación de inversiones para la conservación de carreteras. En resumen, define cómo emplear un determinado presupuesto para el mantenimiento y explotación de las carreteras para que el beneficio sea óptimo. El modelo **HDM-4** contempla simultáneamente tres aspectos de la carretera:

- Las características de diseño, la calidad de construcción y los costes de ejecución.
- Las técnicas utilizadas en la conservación, la influencia de cada una de ellas en el comportamiento y en el estado de la superficie, y los costes correspondientes en cada caso.
- Las características del tráfico de vehículos de las diferentes categorías y los costes de operación correspondientes.

A partir de esta información el programa permite predecir a lo largo de la vida útil del firme, que suele durar entre 15 y 40 años, la evolución del estado de la carretera. En función de dicho estado se establecen distintas alternativas de actuación y se calculan los costes para poder así elegir la alternativa óptima.

Los parámetros económicos obtenidos del análisis se utilizarán, por tanto, como uno de los criterios a tener en cuenta dentro el proceso de toma de decisiones. No es imprescindible su utilización, ya que el análisis puede realizarse también mediante técnicas más sencillas que simplifican mucho el procedimiento. Sin embargo constituye una herramienta muy potente a la hora de modelizar y evaluar el comportamiento del firme y permite llevar a cabo un análisis completo y continuo sobre el estado de la red.

Por otro lado la adaptación de los modelos a las condiciones de las carreteras españolas en un aspecto fundamental que no se puede obviar. Para ello es necesario disponer de una gran cantidad de información en un periodo de tiempo suficientemente dilatado. Información que en algunos casos no se dispone y que puede llegar a ser muy difícil de obtener técnica y económicamente hablando. Es necesario por tanto estandarizar los procedimientos para poder elaborar un inventario muy exhaustivo sobre el estado de la red. En contrapartida el HDM-4 tiene la ventaja de ser un marco de análisis aceptado internacionalmente con una gran transparencia de análisis, existiendo suficiente experiencia técnica para la realización de la calibración local. Además, tiene la ventaja del apoyo internacional para su puesta al día, ya que los sistemas personalizados caducan rápidamente y son muy caros de actualizar.

Por último, solamente quedar hacer hincapié en que es fundamental priorizar de forma racional las actuaciones de conservación a la hora de asignar los recursos disponibles con el objeto de evitar el deterioro de la carretera. La red de carreteras de un país es uno de sus activos más importantes y por ello hay que evitar su deterioro, ya que su devaluación puede llegar a tener consecuencias muy graves a medio plazo.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Kerali, H.R. HDM-4 Volume 1. Highway Development and Management Series. The World Road Association (PIARC) La Grande Arche, Paris Nord, niveau 8, 92055 La Defense Cedex France.
- Kerali H.R. Economic appraisal of road projects. M.Sc. in Highway Management and Engineering. The University of Birmingham, 2003.
- Nuñez Cuaresma, C. Inclusion of Work Zone Effects in Road Project Appraisal. M.Sc. in Highway Management and Engineering. The University of Birmingham, 2003.
- N.D. Lea International, Ltd. Modelling Road User Effects in HDM-4. RETA 5549-REG Highway Development ed. Vol. Final Report, Asian Development Bank, 1995.
- Odoki, J.B. and Kerali, H.R. HDM-4 Volume 4. Highway Development and Management Series. The World Road Association (PIARC) La Grande Arche, Paris Nord, niveau 8, 92055 La Defense Cedex France.
- Paterson, W.D.O. Road deterioration and maintenance effects: Models for Planning and Management. Publicación del Banco Mundial, John Hopkins University Press, 1987.