

# SISTEMAS DE GESTION DE FIRMES

AURELIO RUIZ RUBIO

Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX)

**RESUMEN.** En esta exposición se pasa revista a las metodologías de gestión de firmes de una red, entendida como la labor de planificar, coordinar y controlar las actividades encaminadas a conservar los firmes de carreteras haciendo el mejor empleo posible de los medios disponibles. Se analizan especialmente los aspectos relativos a bases de datos, definición del estado y evolución probable de los distintos tramos, definición de estrategias, análisis de costes y selección de prioridades.



## 1. INTRODUCCION

Los firmes, una vez construidos, comienzan un proceso de deterioro, debido al paso de los vehículos y a las agresiones climáticas. Es por tanto necesario realizar, prácticamente a partir de la puesta en servicio, una inversión continua y prudente en conservación y rehabilitación que haga posible la circulación cómoda y segura de los usuarios en todo tiempo, permita mantener el nivel de servicio, y proteja la inversión realizada asegurando la integridad estructural del firme que soporta el paso del tráfico.

La construcción de cada nuevo kilómetro de carretera cuesta en España cantidades que oscilan entre los 40 y los 200 millones de pesetas, depen-

diendo del tipo de vía y de las características del trazado. Los gastos anuales en conservación deberían oscilar al menos entre el 1 % y el 2 % del valor actual de la red. La aplicación de estas cifras a las redes existentes en nuestro país da idea, por un lado, del patrimonio en infraestructura viaria y, por otro, de las inversiones anuales necesarias para la conservación de este patrimonio. Ahora bien, los presupuestos del Estado tienen que responder a numerosísimas demandas. Aún reconociendo la importancia de la infraestructura de carreteras en la movilidad y accesibilidad de personas y mercancías, y por tanto en la economía del país, es necesario determinar de acuerdo con el estado de las carreteras y unos objetivos prefijados,

cuánto dinero gastar y cuándo y dónde gastarlo, dentro de un marco de escasez de recursos.

Por tanto la inversión permanente en conservación y rehabilitación, al igual que toda inversión, debe ser optimizada. Para ello deben tenerse en cuenta los costes que repercuten sobre los usuarios de la carretera y los costes para la Administración en función de los distintos niveles de servicio.

Esto da lugar a un mecanismo complejo de toma de decisiones, entre las que hay que destacar las de seleccionar el nivel adecuado de inversiones, seleccionar los proyectos prioritarios, el tipo de actuaciones en cada uno de ellos y el momento de llevarlos a cabo, es decir, es necesario desarrollar un proceso de gestión.

La gestión de los firmes de una red, entendida como la labor de planificar, coordinar y controlar las actividades encaminadas a conservar los firmes de carreteras haciendo el mejor empleo posible de los recursos de que se dispone, aunque no es una idea nueva, ha evolucionado extraordinariamente en los últimos años.

El interés manifestado por el tema es tal que se ha convertido en el núcleo de los principales Congresos de Carreteras, habiéndose celebrado numerosas reuniones internacionales monográficas, a la vez que se ha creado un ciclo de conferencias internacionales periódicas dedicado exclusivamente a la Gestión de Carreteras.

Este interés se debe a varias razones entre las que hay que destacar las siguientes:

- Las redes de carreteras de los países industrializados están terminadas en gran parte, por lo que cada día tienen mayor peso las labores de conservación.
- Los técnicos y gestores reconocen la relación directa entre la condición de las carreteras y los costes del transporte de personas y mercancías.
- Ahorros relativamente pequeños en la conservación pueden llevar a grandes perjuicios en el transporte o en la accesibilidad como muestran las curvas típicas de deterioro de los firmes.
- Los presupuestos no han aumentado paralelamente a las necesidades, de forma que se hace imperioso el que los técnicos de carreteras busquen mejores formas de optimizar los escasos recursos de que disponen.

Esta tendencia a la mecanización de la gestión es similar a la de otras ramas de la técnica o de la industria y tiene como base los principios comunes de los métodos modernos de análisis de sistemas. En éstos se establece que la formulación de una política exige la definición de objetivos (en función de las necesidades detectadas), la determinación conjunta de actuaciones y costes de actuación (elaboración y ejecución de planes y presupuestos) y el

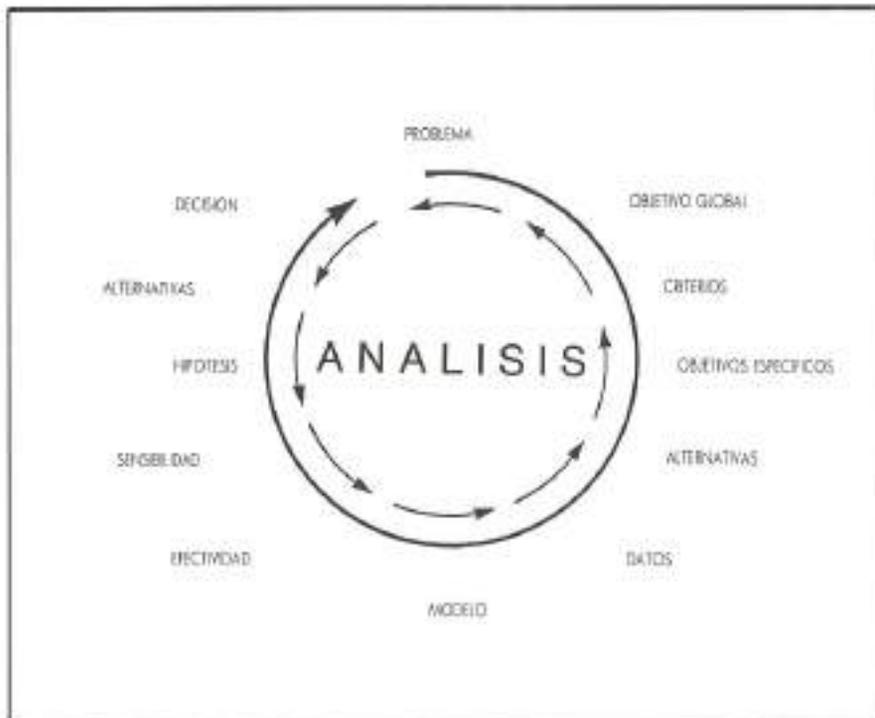


FIGURA 1.  
Análisis de sistemas.

control de la aplicación mediante indicadores adecuados que permitan determinar sistemáticamente los resultados de las actuaciones para poder llevar a cabo las medidas correctoras precisas (figura 1).

En nuestro país, aunque el tema ha despertado un gran interés y ya se han puesto en marcha algunos sistemas parciales, el único sistema completo según la definición dada es el elaborado por la Autopista ACESA. La Dirección General de Carreteras del MOPU ha decidido elaborar un sistema cuyo estudio ha encargado, a través de su Área de Tecnología, al Centro de Estudios de Carreteras.

En lo que sigue se hace un breve resumen del estado de la técnica de los sistemas de Gestión, resaltando fundamentalmente las alternativas en cada una de sus fases y las tendencias más probables.

## 2. OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS DE GESTION

La definición de objetivos es la parte más importante de los sistemas de gestión. El único camino para desarrollar un sistema efectivo es un planteamiento concreto y realista, teniendo en cuenta los medios de que se dispone y las limitaciones que concurren en el problema.

El objetivo global de los Sistemas de Gestión de Firmes es el ya enunciado de planificar, coordinar y controlar las actividades encaminadas a conservar los firmes de carreteras de forma que mantengan un nivel de servicio adecuado a lo largo de su vida de proyecto, haciendo el mejor empleo posible de los recursos de que se dispone.

Este objetivo global puede dividirse en otros más específicos, que pueden agruparse a su vez en técnicos, económicos y administrativos. Los más usuales, dentro de los SGF, son:

### A. OBJETIVOS ECONOMICOS:

- Asegurar una máxima efectividad en el empleo de los fondos de conservación y rehabilitación.
- Elaborar los presupuestos determinando los niveles de inversión más adecuados.
- Determinar los efectos de los retrasos en las actuaciones de conservación en los costes derivados de la administración y de los usuarios.

### B. OBJETIVOS TECNICOS:

- Facilitar la toma de las grandes decisiones técnicas relativas a las principales opciones de conservación.
- Constituir una base de datos completa y eficaz.
- Tener en cuenta la experiencia para mejorar la técnica.

- Definir los problemas a nivel de proyecto.
- Disponer de un modelo adecuado de previsión del comportamiento de los firmes para controlar la evolución del estado de los mismos.
- Determinar los efectos en los costes para los usuarios de los aumentos o reducciones en los criterios sobre la calidad de los firmes.

### C. OBJETIVOS ADMINISTRATIVOS:

- Definir de forma racional el estado de la red.
- Planificar o programar o definir las estrategias de las actuaciones de conservación actuales o futuras.

En el estudio de objetivos conviene distinguir entre los distintos niveles en que puede ser utilizado un sistema de gestión, es decir:

**NIVEL DE RED.** Afecta fundamentalmente a gestores o responsables principales de la red de carreteras. Su objetivo primario es proporcionar información sistemática y consistente a los que toman decisiones sobre el reparto de los presupuestos de conservación.

**NIVEL DE PROYECTO.** El nivel de proyecto se refiere a las competencias de los técnicos responsables de una parte de la red. Su principal objetivo es determinar las actuaciones de conservación o mejora más efectivas en un tramo específico en el que se ha decidido intervenir.

**NIVEL DE ANALISIS.** Permite conocer el comportamiento de las soluciones adoptadas con objeto de mejorar actuaciones y métodos.

En estos niveles pueden existir también objetivos prioritarios que hay que definir claramente.

## 3. ESTRUCTURA GENERICA DE UN SGF

Los SGF que existen actualmente difieren considerablemente entre sí incluso en aquellos casos en que sus objetivos y principios básicos son similares. Esto se debe a que todos intentan adaptarse a las redes de carreteras, experiencias, técnicas, equipos, actuaciones y necesidades propias de cada país, que en la mayor parte de los casos no son extrapolables. No existe por tanto consenso sobre la estructura de un SGF, aunque la más generalizada es la dada en la figura 2. Esta es una estructura general y amplia que puede variar considerablemente en los detalles específicos dentro de las fases o actividades principales.

La primera actividad es la de adquisición de aquellos datos que permitan determinar las condiciones de la oferta y del equilibrio oferta-demanda (inventario de la red y de su equipamiento, estado de los firmes en cuanto a comodidad y seguridad

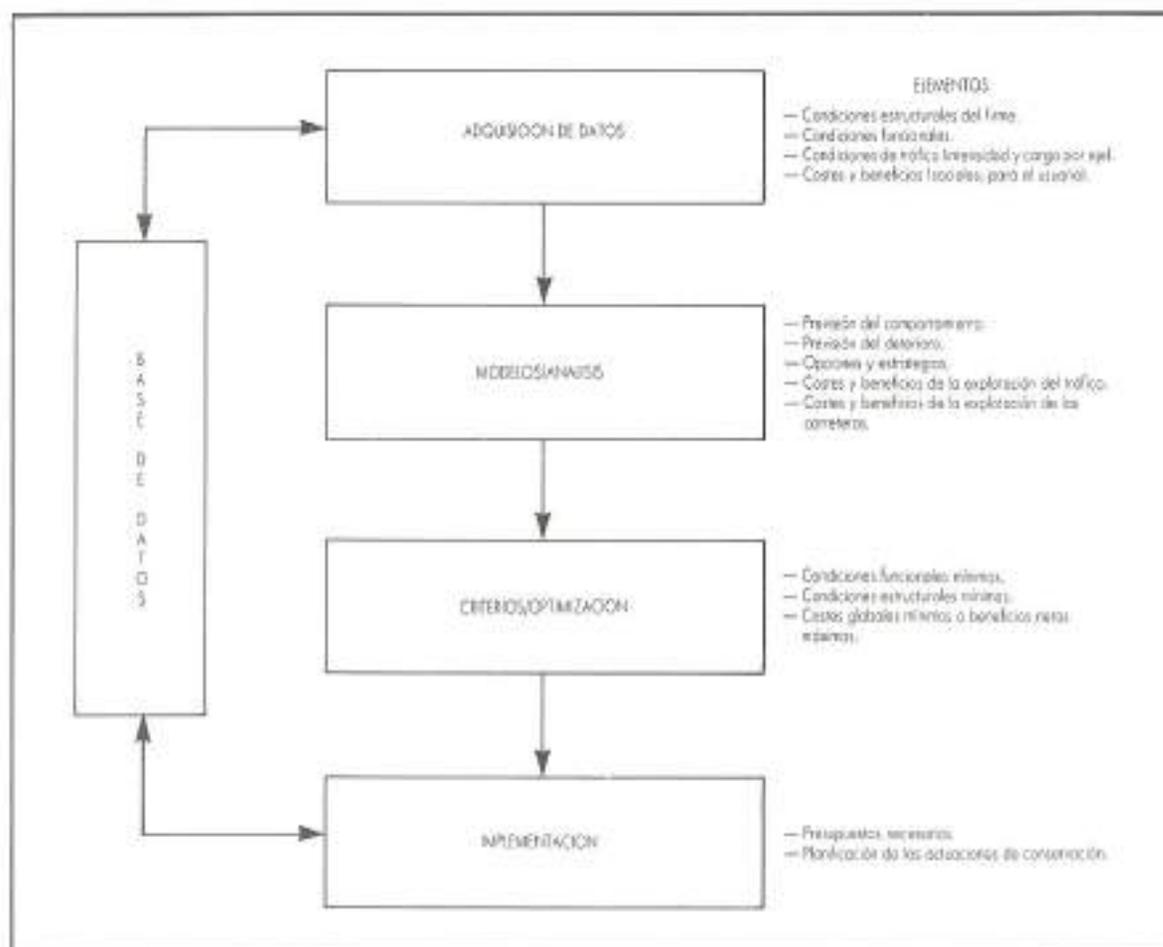


FIGURA 2. Esquema general de un S.G.P.

de la rodadura, así como los relativos al estado estructural, tráfico, accidentes, etc.).

El análisis de estos datos facilita no sólo la valoración del estado de la red y por tanto la calidad de la oferta, sino también su comparación con la demanda. De aquí podría obtenerse una primera lista de prioridades de actuación. Si se dispone de modelos de comportamiento que permitan prever la evolución de los firmes, pueden elaborarse distintas estrategias de actuación a largo plazo, y mediante un proceso de optimización, determinar la más adecuada según los criterios fijados (costes mínimos o beneficios máximos).

La última etapa dentro del proceso de gestión es la de implementación de las estrategias a corto plazo, en la que se establecen los presupuestos necesarios, se distribuyen entre las distintas actuaciones, se programan los trabajos y se recogen datos que realimentan al sistema.

#### 4. BASE DE DATOS

Las bases de datos de carreteras están compuestas por los siguientes elementos:

- Un sistema de definición de los datos incorporados a la base de datos.
- Un sistema de referenciación que permita localizar el lugar exacto en el que se han realizado las medidas.
- Los ficheros de datos, cuyo conjunto debe definir la red de carreteras, describir su estado en un momento dado y su evolución en el tiempo.
- Sistemas de tratamiento y explotación de los datos almacenados.
- Un sistema de actualización de los ficheros.

En la tabla 1 se representa el esquema general de las etapas a seguir en la creación de una base de datos.

## CARRETERAS Y AEROPUERTOS

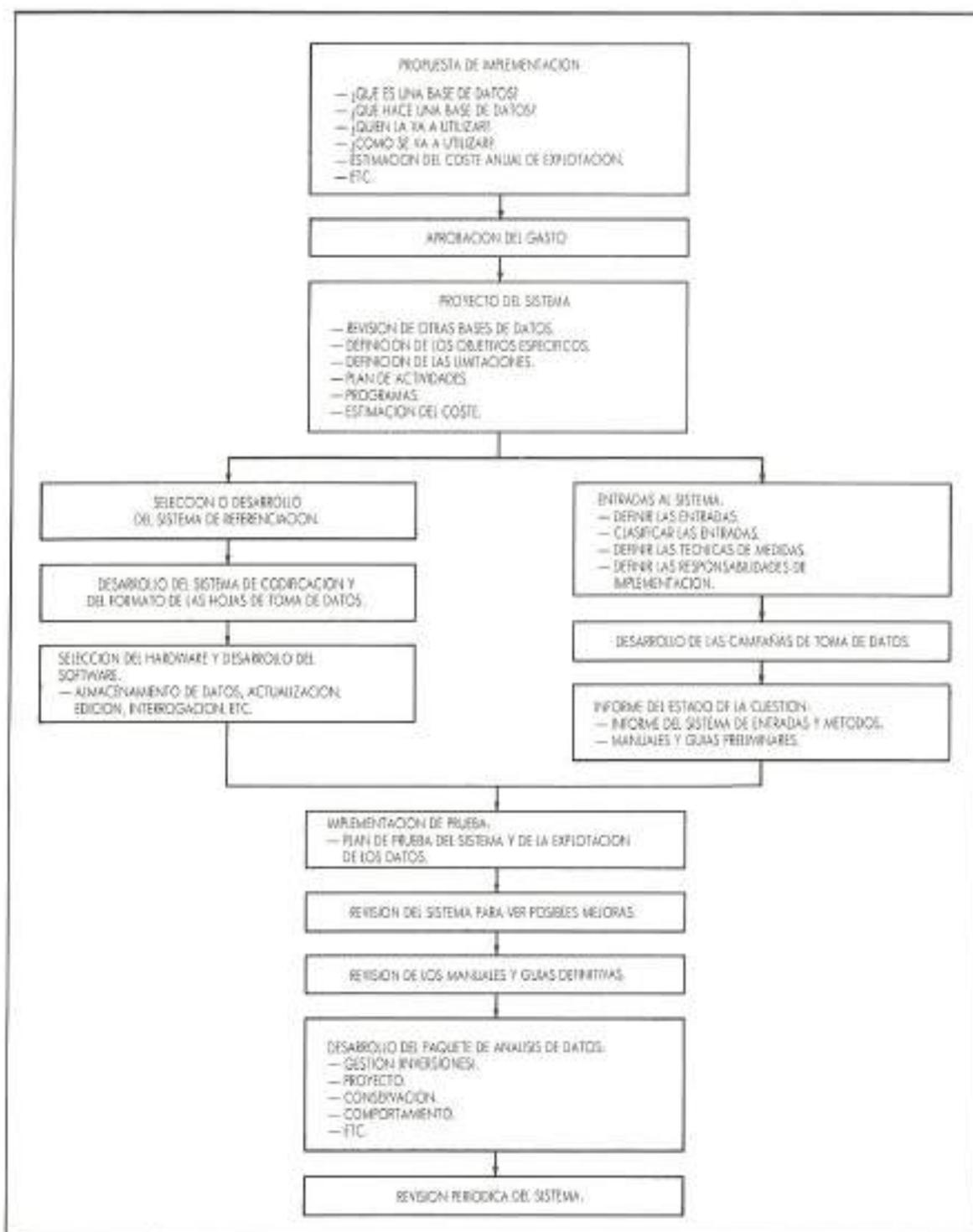


TABLA 1. Principales etapas en el desarrollo e implementación de una base de datos.

Una vez perfilado el sistema, uno de los puntos claves en su desarrollo es la decisión del sistema de referenciación de los datos.

Su objetivo principal es el permitir identificar sobre el terreno de forma inequívoca las características medidas en los distintos puntos de la red. Asimismo debe facilitar la correlación entre los datos contenidos en los ficheros, su explotación, la actualización en el tiempo y la restitución de los perfiles en la carretera. El sistema ha de ser claro y sencillo, y proporcionar una aproximación suficiente.

Existen dos grandes opciones para la referenciación (figura 3):

**REFERENCIACION POR NUDOS.** Se definen nudos dentro de la red de carreteras, que servirán de origen de coordenadas para los datos contenidos entre cada dos de ellos. Los perfiles de toma de datos se referencian por su abscisa curvilínea respecto al nudo origen del tramo.

Los nudos se localizan en general sobre puntos

singulares de ubicación presumiblemente permanente en el tiempo: intersecciones, estructuras, límites de provincia, etc. Se pueden definir por sus coordenadas geográficas o por su número de orden. Las coordenadas geográficas son preferibles en sistema tipo malla y el número de orden en redes de disposición fundamentalmente radial. En cualquier caso su localización dentro de un plano debe ser sencilla.

La principal ventaja de una organización en nudos es su estabilidad en el tiempo. Por otro lado, en la mayor parte de los casos corresponden a una división material de la red. Un inconveniente es su carácter abstracto, que dificulta la interpretación por parte del usuario. Son los más adecuados en aquellas redes en las que cabe esperar modificaciones frecuentes del trazado: variantes de poblaciones, corrección de curvas, etc.

**REFERENCIACION POR PUNTOS DE REFERENCIA.** El sistema de puntos de referencia se basa en los hitos kilométricos existentes en las

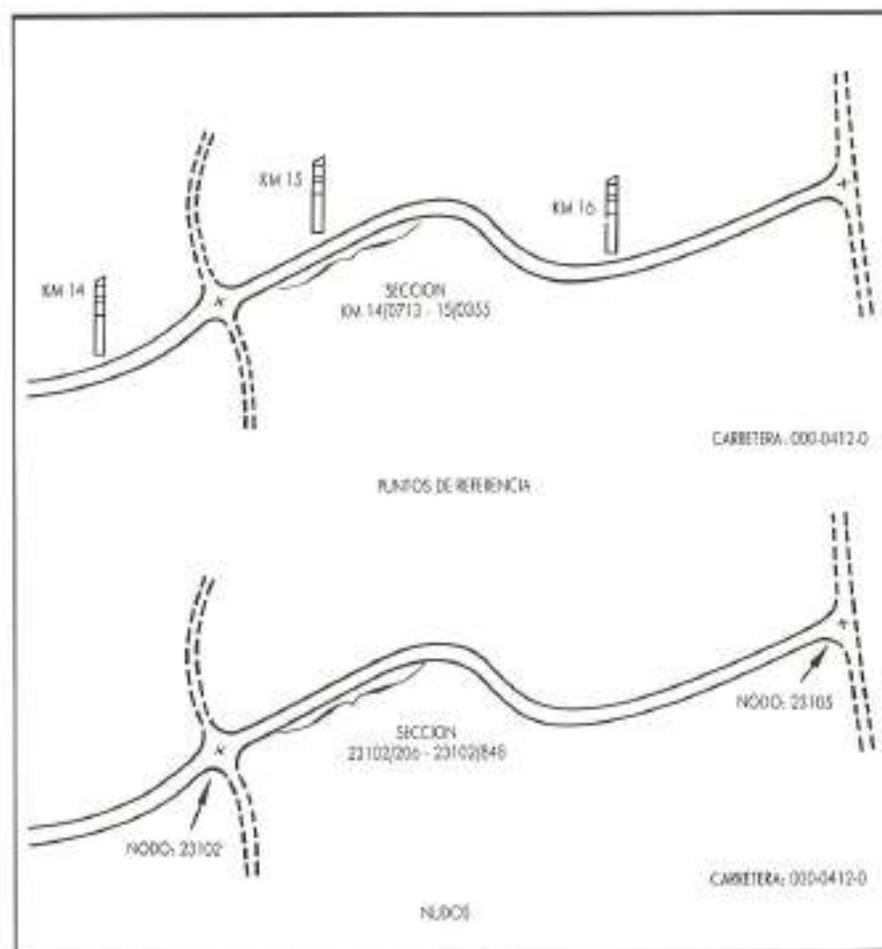


FIGURA 3. Sistemas de referenciación.

carreteras. Cada perfil de toma de datos se define por su distancia al hito anterior, con un sentimiento previamente definido.

Este método es de una gran sencillez, tanto en su definición como en su interpretación, pero presenta el grave inconveniente de la necesidad de reajustarlo cada vez que se adecuen los hitos kilométricos al trazado real. Es un sistema muy recomendable en redes con trazados definitivos (redes de autopistas, por ejemplo).

Hay cuatro procedimientos básicos para obtener la información contenida en los ficheros:

- Por acceso en el caso de que procedan de otros ficheros existentes.
- Por medida si proceden de la medida directa en campo o laboratorio.
- Por cálculo a partir de los valores obtenidos por acceso o medida.
- Por asignación, si se obtienen de forma subjetiva.

Los ficheros contenidos en cada sistema de Gestión dependen de los objetivos del mismo, del tipo de red y de los medios disponibles.

Es significativo comprobar cómo algunos países después de intentar almacenar el máximo de datos en el pasado, hoy se orientan a tomar únicamente la información necesaria para satisfacer unos objetivos preestablecidos.

Analizando los distintos sistemas de gestión, y clasificando la información en mínima, usual y ocasional tenemos los siguientes grupos:

**A. INFORMACION QUE SE ENCUENTRA PRACTICAMENTE EN TODOS LOS SISTEMAS (INFORMACION MINIMA)**

- El inventario de la red y de su equipamiento:
  - Características geométricas de las vías (anchuras, trazado).
  - Puntos particulares (obras de fábrica, travessías, intersecciones o enlaces).
- El tráfico.
- La estructura del firme (bien el detalle de las capas y el tipo y características de la explanada o bien, simplemente, el tipo de estructura y su espesor total; se indican igualmente los trabajos de conservación más recientes).
- Los deterioros superficiales del firme.

**B. INFORMACION QUE SE ENCUENTRA FRECUENTEMENTE**

- Los resultados de las medidas de regularidad y de resistencia al deslizamiento.
- Características del drenaje.
- Señalización, horizontal y vertical, y balizamiento.

**C. INFORMACION QUE SOLO SE ENCUENTRA EN FORMA OCASIONAL**

- Los resultados de las medidas de deflexión.
- Los resultados de campañas de extracción de testigos.
- La naturaleza del entorno.
- Accidentes.

En cada fichero de datos la información contenida en la base viene caracterizada, en general, por los siguientes elementos:

- Naturaleza de la información (nombre del fichero correspondiente).
- Posición de la información en la red (definida por el sistema de referencia y la división de la red).
- Cronología de la información (fecha de la toma, período de validez).
- La información propiamente dicha, caracterizada por un valor numérico (por ejemplo la deflexión) o una descripción del estado (por ejemplo la descripción de la sección transversal) o la clasificación del estado en relación con niveles de calidad (por ejemplo, fuertemente agrietado, ligeramente agrietado, poco agrietado).
- Uno o varios comentarios relativos a la información (por ejemplo, documentos de referencia, equipo utilizado, etc.).

Los ficheros del banco de datos pueden organizarse de maneras muy variadas, aunque una muy recomendable es la de ficheros específicos con los valores puntuales, en bruto, de cada uno de los parámetros (deterioros, regularidad, tráfico, etc.) directamente utilizables a nivel de proyecto y otro fichero general o maestro, utilizable directamente en la gestión, en el que se den valores globales o que resuman la información del conjunto de ficheros, y asociados a los tramos de estudio.

La configuración de un registro de este fichero sería, por ejemplo:

**Sección n.º 46**

- Longitud: 1.000 m.
- Tráfico 1984: 540 v.d.
- Deflexión media (83): 50.
- Refuerzo en 1978, con 8 cm de M.B. tipo D, entre los puntos +450 y +925.
- Etcétera.

Un aspecto importante de este sistema es fijar la unidad física elemental de la red (tramo de estudio) a la que se asignarán todas las informaciones.

Esto puede hacerse definiendo tramos que correspondan a proyectos de construcción, a la divi-

sión en nudos de la red, a longitudes constantes (hectómetros, kilómetros, etc.) o a cualquier otro criterio.

En cualquier caso es preferible una descomposición en tramos fijos que una tramificación que busque la homogeneidad de las medidas, que puede llevar a un número muy elevado de tramos homogéneos en el conjunto de parámetros y dificultar la comparación año a año por los distintos solapes, complicando por tanto la explotación de resultados.

Una vez realizada la tramificación se le asigna a cada tramo la información correspondiente, que se irá renovando según las distintas campañas de toma de datos o guardando de forma jerarquizada en función de la edad de las medidas si se van a considerar los índices de evolución (figura 4).

Esta organización permite utilizar el sistema en distintos niveles, facilitando la consulta del responsable de la gestión en los ficheros maestros y la más detallada del encargado directo de la conservación o rehabilitación, o del investigador en los ficheros específicos. En cualquier caso debe establecerse un sistema claro y sencillo que permita la correlación de los ficheros.

Hay un gran número de sistemas que dan respuesta a los problemas de recuperación de la infor-

mación, realimentación o análisis de la misma, dentro de la técnica general de tratamiento de bases de datos por lo que este aspecto depende del soporte informático de cada sistema, no presentando características específicas.

La explotación de la base de datos no se refiere únicamente al análisis de los datos dentro del esquema general del Sistema de Gestión, sino que es usual organizar salidas periódicas, que suelen ser volcados del fichero maestro, o listados de parámetros para temas concretos (curvas con radio menor de uno especificado, zonas con problemas de resistencia al deslizamiento, etc.).

### 5. ANALISIS DE LOS DATOS Y DEFINICION DE ESTRATEGIAS

En relación con la conservación, el modelado del estado de los firmes de la red y de las posibles actuaciones, base para la selección de prioridades, consta de las siguientes etapas:

- Definición del estado de los distintos tramos de estudio en que se ha descompuesto la red.
- Previsión de la evolución posible o probable de los distintos tramos.
- Definición de las posibles estrategias.
- Análisis del coste de cada una de ellas.

CS	BEG	END	D	SR	BEG	END	LENG	FC	L	HT	RDW	RSH	LSH	CONT#	TY	SF	TK	M	YR	BASE	79	ADT	GRW	SU	CM
2719	0	396	3	5	13354	13950	396	US	R	34	48	10	10	08603	20	40	33	5	70	11	78	300	56	4	6
GEN	SIDE	ECSMP	RUTT WEAR	WAVE SAGS	ALG CRK	RAV FLU	LONG CRK	TRNS CRK	PTCH	BUMPS	BUMP SPEED	ADJ BUMPS	RIDE RATNG												
71	R	100	1	11	1N	31	1N	1N	1N	277	50	274	1.00												
71	R	200	1	12	1N	31	1N	1N	1N	458	50	584	1.00												
71	R	300	1	11	1N	31	1N	1N	1N	445	50	561	1.00												
71	R	396	1	12	1N	31	1N	1N	1N	884	50	1312	0.98												
73	R	100	1	11	1N	31	1N	1N	1N	329	50	74	1.00												
73	R	200	1	11	1N	31	1N	1N	1N	357	50	96	1.00												
73	R	300	1	11	1N	31	1N	1N	1N	366	50	103	1.00												
73	R	396	1	11	1N	31	1N	1N	11	919	50	544	1.00												
75	R	100	N	12	1N	21	11	1N	1N	291	50	291	1.00												
75	R	200	N	11	1N	21	1N	1N	11	385	50	385	1.00												
75	R	300	N	11	1N	21	1N	1N	1N	288	50	288	1.00												
75	R	396	N	12	1N	21	1N	1N	11	853	50	853	0.99												
77	R	100	N	1N	1N	1N	11	1N	1N	413	50	413	1.00												
77	R	200	N	1N	1N	1N	1N	1N	1N	531	50	531	1.00												
77	R	300	N	1N	1N	1N	11	1N	1N	393	50	393	1.00												
77	R	396	N	1N	1N	1N	1N	1N	21	868	50	868	0.99												
79	R	100	2	1N	1N	32	31	1N	1N	453	0	453	1.00												
79	R	200	2	1N	1N	32	21	1N	1N	549	0	549	1.00												
79	R	300	1	1N	1N	32	21	1N	1N	365	0	365	1.00												
79	R	396	1	11	1N	12	21	1N	1N	1255	0	1255	0.98												

FIGURA 4. Fichero jerarquizado.

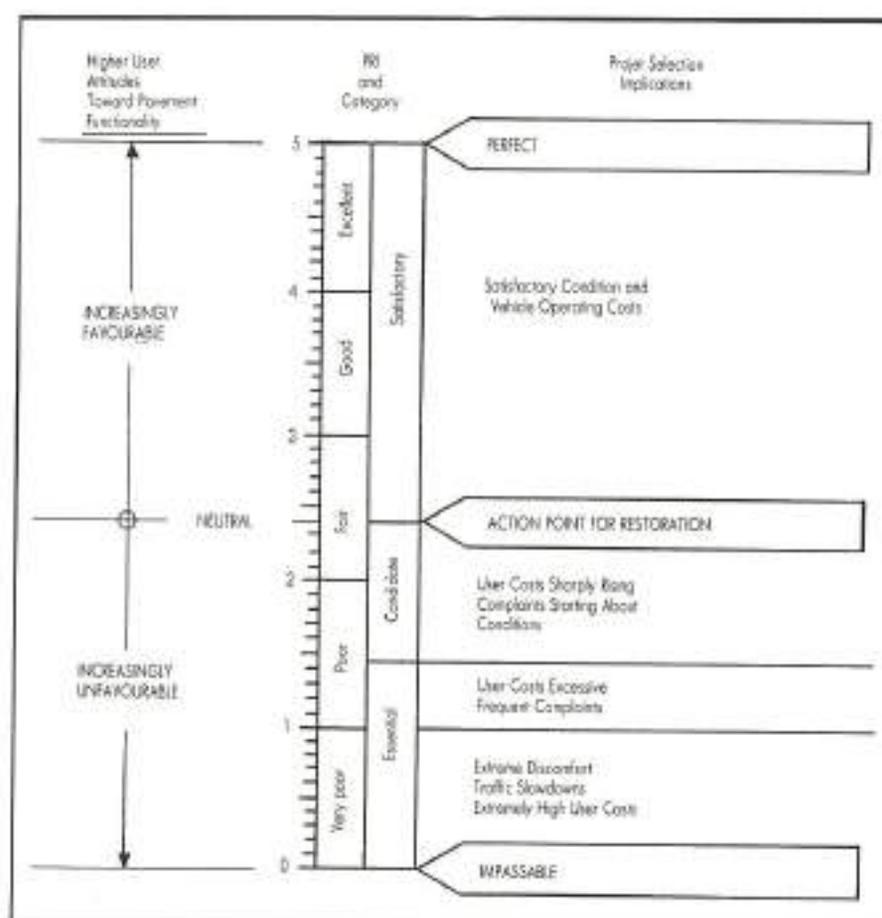


FIGURA 5. Indicador global.

### 5.1. DEFINICIÓN DEL ESTADO DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO

La definición del estado de los distintos tramos que componen la red puede llevarse a cabo mediante indicadores globales o paramétricos.

**A. INDICADORES GLOBALES.** Con ellos se trata de definir mediante un único indicador, el estado del firme. En general, engloban los conceptos de degradación estructural, valorada en función de los deterioros superficiales y el de comodidad del usuario dado por la medida de la regularidad superficial (figura 5).

**B. INDICADORES PARAMÉTRICOS.** Con este sistema se definen indicadores individuales para los parámetros o grupo de parámetros que caracterizan una cualidad específica del firme (regularidad, capacidad estructural, resistencia al deslizamiento) (figuras 6, 6bis y 7).

De la comparación de ambos sistemas se deduce que el método del indicador global presenta una serie de ventajas como son:

- Permite clasificar de forma muy simple unos firmes respecto a los otros.
- Ofrece una visión sencilla del estado general de las carreteras a los gestores.
- Permite obtener un modelo general de comportamiento del firme.

Sin embargo, presenta inconvenientes importantes:

- Pueden darse situaciones de deterioro muy diferentes, definidas por el mismo valor del índice.
- Existe una gran dificultad práctica en la determinación de los pesos relativos de los distintos elementos constitutivos.

Actualmente no está clara la tendencia hacia uno u otro sistema. En América predomina el primero mientras que en Europa lo hace el segundo. No obstante, el sistema paramétrico lleva de una forma u otra a un indicador global, como es el criterio de prioridad en función de la política de conservación (figura 7).

## CARRETERAS Y AEROPUERTOS

INDICADORES DE ESTADO		PARAMETRO CONSIDERADO	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
ADHERENCIA		Coefficiente de rozamiento transversal (C.R.T.)	Inferior a 0,25	Entre 0,25 y 0,45	Entre 0,45 y 0,55
REGULARIDAD		Tipo de regularidad (en longitud de onda corta y media: 1 a 3,3 m y 3,3 a 13 m)	1-2 a 3	4 a 5	
DETERIORS	Rodera de pequeño radio	<ul style="list-style-type: none"> <li>Profundidad media de rodera</li> <li>Porcentaje de longitud de rodera</li> </ul>	más de 20 mm más de 30 %	15 a 20 mm más de 30 %	
	Descomodera-Evadación-Pulido	Porcentaje de longitud de firma afectada	superior a 30 %	10 a 30 %	

FIGURA 6. Seguridad-comfort. (Niveles de los indicadores de estado)

NOTA: 1. En los deterioros, los diversos porcentajes (longitud de firma con rodadas, etc.) se consideran en el perfil más degradado y se aplican a la longitud total del tramo.  
2. Si la tasa de regularidad en el intervalo de longitud de onda larga (de 13 a 40 m) es baja y los trabajos son programados por otras razones, conviene examinar en qué medida se puede obtener una mejora en el conjunto de trabajos de mantenimiento.



FIGURA 6 bis. Esquema tipo itinerario (francés).

TIPO DE DETERIORO		CATEGORIA DE PRIORIDAD		
		TRAFICO		
		> 5000	1000 A 5000	< 1000
REGULARIDAD ≥ 45	PROBLEMAS ESTRUCTURALES GRAVES Y REGULARIDAD INACEPTABLE: PIEL DE COCODRILO B = 31-29 % Y BACHEOS > 10 % PIEL DE COCODRILO B ≥ 30 %	1	2	11
	PROBLEMAS ESTRUCTURALES MENOS GRAVES Y REGULARIDAD INACEPTABLE PIEL DE COCODRILO B = 11-29 % Y BACHEOS ≤ 10 % PIEL DE COCODRILO B ≤ 10 % Y BACHEOS > 10 %	3	4	12
	SOLO REGULARIDAD INACEPTABLE	5	6	
REGULARIDAD < 45	PROBLEMAS ESTRUCTURALES GRAVES: PIEL DE COCODRILO = 11-29 % Y BACHEOS > 10 % PIEL DE COCODRILO ≥ 30 %	7	8	13
	PROBLEMAS ESTRUCTURALES MENOS GRAVES: PIEL DE COCODRILO = 11-29 % Y BACHEOS ≤ 10 % PIEL DE COCODRILO ≤ 10 % Y BACHEOS > 10 %	9	10	14

FIGURA 7. Criterios de prioridad en el Estado de California (USA).

5.2. EVOLUCION POSIBLE O PROBABLE DE LOS DISTINTOS TRAMOS

El estudio se basa en los modelos de comportamiento.

Un modelo de comportamiento es la descripción matemática de los valores que se prevén para un atributo o un indicador del estado de la carretera durante el período de análisis. Es decir, establecen una relación entre éstos y el tiempo.

En la figura 8 se presenta la forma general de un modelo de comportamiento.

El tipo de curvas más utilizado hasta el momento para la representación del comportamiento es la exponencial, dada de forma general bien por curvas decrecientes en el tiempo (nivel de servicio inicial alto y disminuye con el tiempo). O en el caso de los deterioros, por curvas crecientes en el tiempo.

$$I = C \cdot (e^t - 1) \quad (\text{Figura 9})$$

siendo  $I$  el indicador de estado en el momento  $t$ .

Sin embargo, en la actualidad se ha llegado a la conclusión de que presenta algunas deficiencias. En principio, la curva de comportamiento debe tener un máximo (o mínimo si es de deterioro) en el momento cero, y debe ser ascendente (descendente) según avanza el tiempo. Por otro lado, no se puede predecir valores negativos (o áreas de deterioro superiores al 100 %). En consecuencia, debe partir de un punto máximo (mínimo) y aproximarse asintóticamente al valor mínimo (máximo). Por tanto, la curva de ser en S.

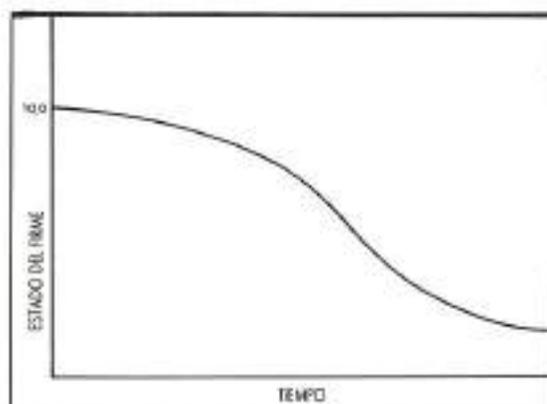


FIGURA 8. Modelo de comportamiento.

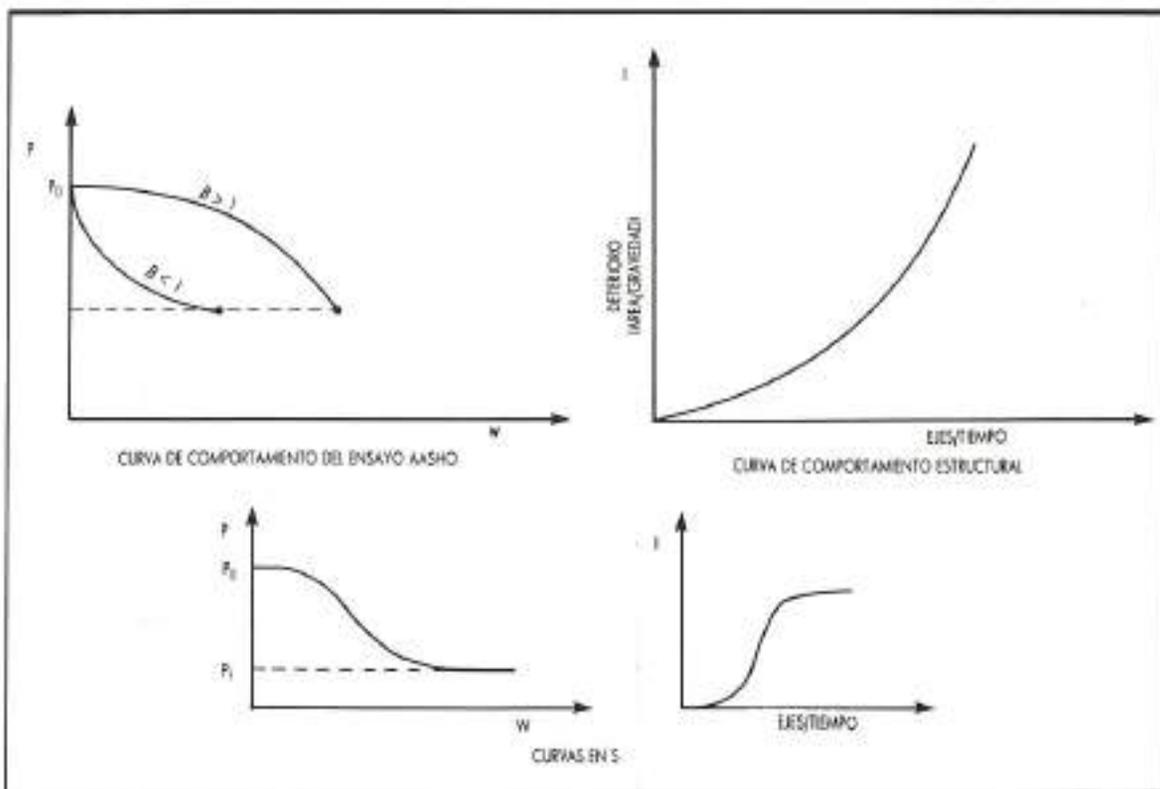


FIGURA 9. Curvas de comportamiento.

Los modelos de comportamiento pueden obtenerse mediante:

**ANALISIS TEORICOS PUROS.** Se obtienen a partir de desarrollos matemáticos. Los más usuales son los de formación de roderas y fatiga por efectos térmicos o por el paso de las cargas.

**ANALISIS EMPIRICO-TEORICOS.** Utilizan un modelo teórico para calcular las respuestas del firme ante las sollicitaciones. Posteriormente se correlacionan las respuestas calculadas con los datos existentes mediante análisis de regresión.

**ANALISIS EMPIRICOS.** Se basan en análisis estadísticos de la experiencia con firmes a escala real, a través de los cuales se obtienen ecuaciones matemáticas que modelan el comportamiento o fallo del firme.

Estos métodos se desarrollan mediante:

- Construcción de las curvas de comportamiento y sus bandas de posible variación.
- Determinación de las probabilidades de alcanzar distintas condiciones en el firme siguiendo actuaciones alternativas de rehabilitación.
- Determinación de las distribuciones de probabilidad de la velocidad de deterioro.

Los métodos empíricos son los más extendidos en la práctica, cuando se tienen datos de un número suficiente de años, recurriéndose a los otros en caso contrario o a nivel académico para una aproximación teórica al problema.

Un subgrupo del tipo de análisis empírico, muy utilizado en la actualidad cuando se carece de da-

tos con antigüedad suficiente, es el de los paneles de expertos que basan el desarrollo de los modelos en la opinión de técnicos.

Todos estos modelos deben desarrollarse para cada firme, en función del estado del indicador, y para cada actuación de rehabilitación, de forma que pueda preverse la mejora en el nivel del parámetro y la evolución en el tiempo para una actuación determinada.

Hay que señalar por último que los modelos de comportamiento se utilizan tanto a nivel de proyecto, en cuyo caso son necesarios modelos específicos y de detalle para prever la evolución de una sección determinada, como a nivel de red, en el que bastan modelos de precisión media para estimar el comportamiento de los firmes clasificados según tipos generales.

### 5.3. DEFINICION DE LAS POSIBLES ESTRATEGIAS

Una estrategia es un plan o método de tratar todos los aspectos de un problema específico. Por tanto, una estrategia de conservación de firmes de carreteras será un plan o método para la aplicación de las técnicas de conservación a un tramo o conjunto de tramos de carretera de forma que cumplan unos objetivos predeterminados.

El objetivo del estudio de estrategias es determinar entre todas las posibilidades, la óptima según los criterios establecidos y con las limitaciones impuestas.

La elaboración de una estrategia requiere en primer lugar conocer el estado de los firmes a conservar, y prever su comportamiento futuro. En función de estos datos, y con ayuda de un listado

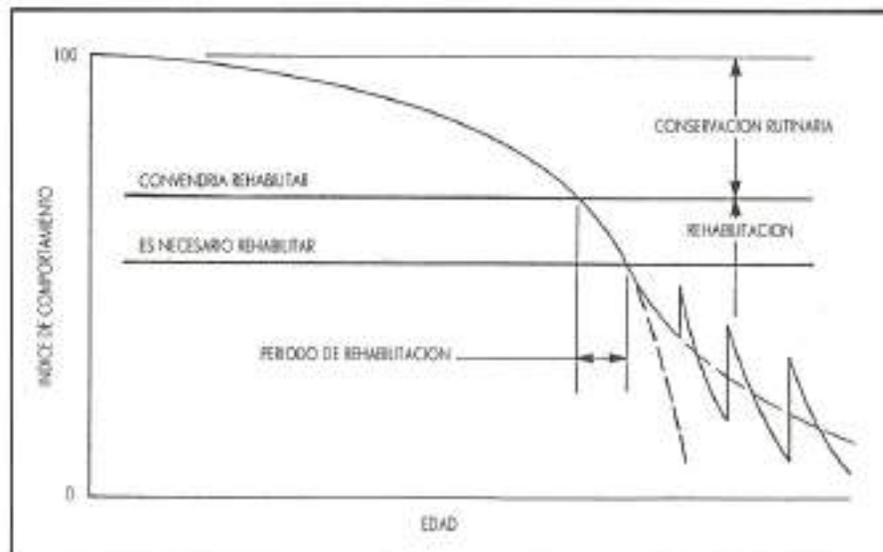


FIGURA 10.  
Niveles de actuación.

de posibles actuaciones de rehabilitación para cada tipo de deterioro de su efecto sobre el firme y su vida de servicio se pueden elaborar distintas estrategias para el período de análisis, que finalmente se optimizarán.

Es necesario, asimismo, definir los niveles de alerta, y los niveles límite para cada indicador paramétrico o para el indicador global (figura 10).

En las estrategias de tipo estático, se supone conocido el comportamiento del firme a partir de la actuación de rehabilitación. Es decir, se ignora la posibilidad de un comportamiento mejor o peor del esperado.

En la figura 11 se presenta un ejemplo. Supongamos que la decisión sobre la posible actuación de un firme se toma en base a un único indicador

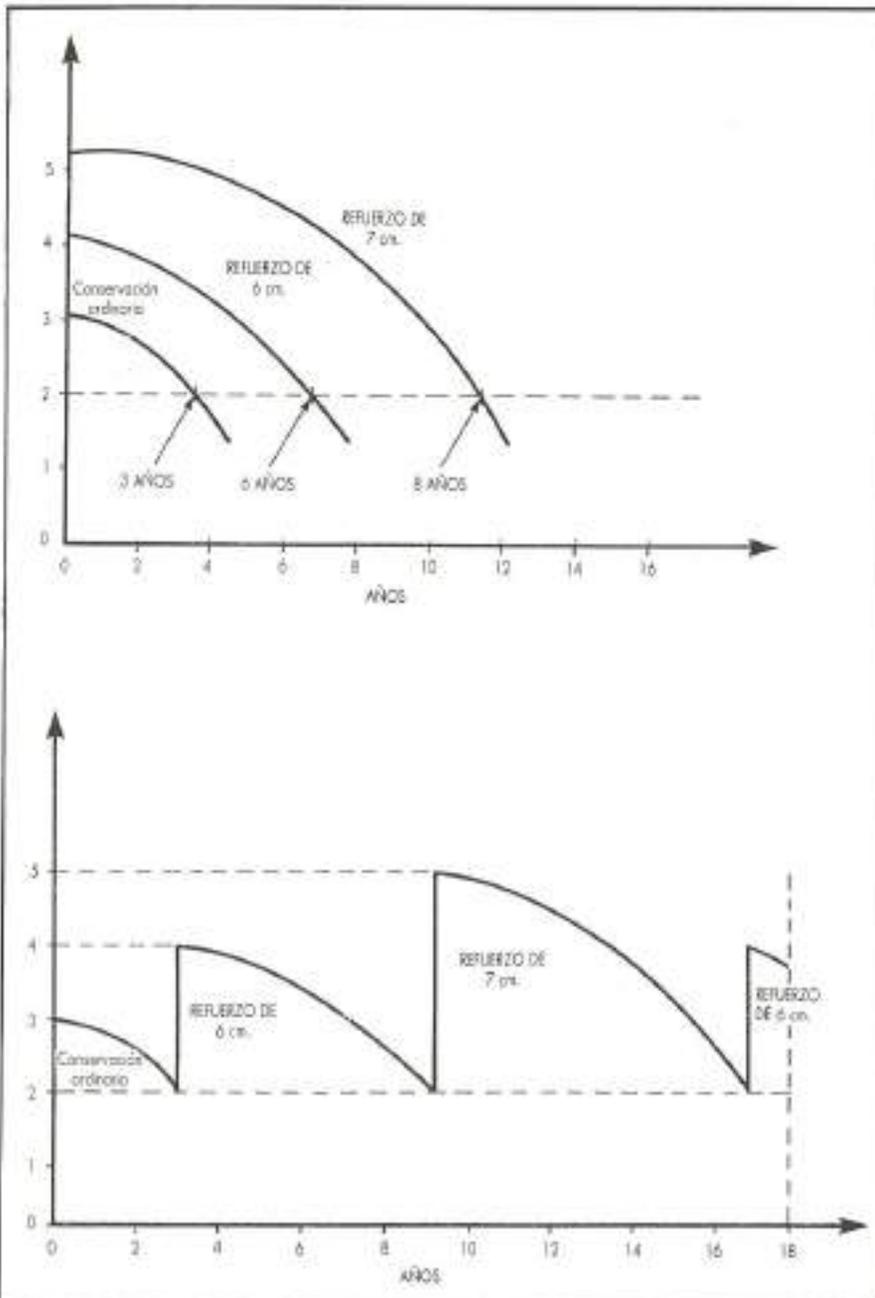


FIGURA 11.  
Estrategias estáticas.

de estado I, cuyo nivel máximo es 2. Sea 3 el nivel actual y 5 el nivel máximo. El período de análisis es de 18 años.

Una estrategia podría ser una conservación ordinaria inicial, un esfuerzo de 6 cm en el año 3, uno de 7 en el año 9 y uno de 6 en el año 17. Esta estrategia mantendrá el estado del firme a un nivel de  $I = 2$  o por encima de él durante los 18 años.

Igualmente pueden definirse otras estrategias también, o con esfuerzo, o con reciclado, etc. y calcular los costes de cada una de ellas durante el período de análisis, en base a los costes de construcción, conservación, del usuario y valor residual del firme. Posteriormente se clasificarían en base a estos costes, eligiéndose los de coste mínimo o beneficio máximo.

En este método estático debe tenerse en cuenta que probablemente las actuaciones futuras no puedan llevarse a cabo en el momento previsto porque el firme se comporte mejor o peor de lo esperado. Es decir, las actuaciones futuras pueden no ser las adecuadas. Existe por tanto una gran probabilidad de no elegir la estrategia óptima.

En un modelo de decisión dinámico se supone como hipótesis básica que no se conoce con certeza el estado del firme después de la actuación de rehabilitación. Lo que se pretende estimar son las probabilidades de alcanzar distintos estados. Además sólo es necesario tomar la decisión sobre la actuación en el momento del análisis. La decisión

de futuras actuaciones serán dependientes del comportamiento del firme. En la figura 12 se presenta un modelo dinámico en forma de árbol de decisiones.

Un árbol de decisiones está formado por dos tipos de nudos —nudos de decisión y nudos de coyuntura— y varias alternativas representadas como ramas en cada uno de los nudos. En los nudos de decisión, las ramas representan las actuaciones alternativas posibles. En los de coyuntura, los posibles resultados de la actuación decidida en el nudo previo de decisión.

En el ejemplo anterior, con un nivel inicial del indicador igual a 3, supongamos como primera actuación una conservación ordinaria. Consideremos que el resultado al final de un período de tiempo sea que el estado del firme sea bueno (por ejemplo mayor de 3), regular (2 a 3) o malo (menor de 2). Estos tres resultados se presentan como ramas alternativas en el primer nudo de coyuntura. Según estos resultados se seleccionan las actuaciones alternativas. Este proceso se continúa hasta que se alcanza al final del período de análisis.

El estudio de un árbol de decisiones exige la estimación de las probabilidades y costes de los distintos resultados en cada nudo de coyuntura.

Si el período de análisis es  $n$ , se calculan los costes esperados en cada uno de ellos al final del período  $n$ -ésimo. En los nudos de decisión del comienzo del período  $n$ -ésimo se seleccionan las actuaciones alternativas con los costes mínimos.

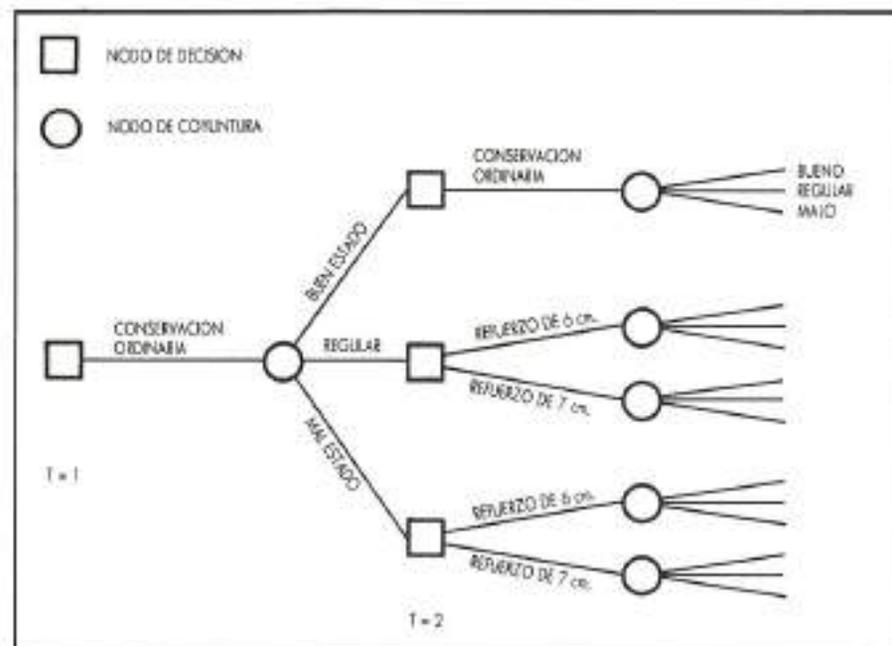


FIGURA 12. Árbol de decisiones.

Luego se consideran los nudos de coyuntura al final del período ( $n - 1$ )-ésimo. Se calculan de nuevo los costes esperados suponiendo que las actuaciones de coste mínimo se seleccionarán en el nodo de decisión siguiente. Las actuaciones de coste mínimo vuelven a seleccionarse en el nodo de decisión del comienzo del período ( $n - 1$ )-ésimo y se continúa el proceso hasta que se analiza el primer nodo de decisión para seleccionar la actuación que tiene el mínimo coste.

En el problema real, el tamaño del árbol puede ser excesivo. El problema se complica al tomar no sólo un firme sino una red. En estas situaciones sería prácticamente imposible analizar un árbol de decisiones con una completa enumeración de sus partes. En estos casos, una herramienta adecuada son los procesos de decisión de Markov, muy utilizados actualmente. Como esta metodología no incorpora directamente las limitaciones presupuestarias para desarrollar un plan de gestión económicamente abordable, debe utilizarse en combinación con otras técnicas que se verán posteriormente.

#### 5.4. ANALISIS DE COSTES

Tradicionalmente los factores de coste se reparten en dos grandes categorías:

- Costes que incumben al responsable de la red (construcción, conservación, rehabilitación), teniendo en cuenta el valor residual del firme al final del período de análisis.
- Costes relacionados al usuario (funcionamiento del vehículo, retrasos, etc.). Suelen incluirse los efectos secundarios, favorables o no, debidos a la circulación.

Existen diversos métodos de análisis económicos que han venido utilizándose para comparar las posibles estrategias. El más sencillo y de uso más generalizado hasta hace unos años es el del estudio del coste inicial sin tener en cuenta los costes futuros. Pero para inversiones a largo plazo, como en el caso de los firmes, el coste inicial puede no ser el más crítico. Es por ello que cada vez cobra más ímpetu el análisis de costes a lo largo de la vida de servicio. En estos análisis los costes dependen de los factores de coste ya señalados. Las técnicas de análisis más utilizadas son las del flujo de caja descontado en sus modalidades del valor actual, anualización o tasa de retorno, según que los gastos futuros se traduzcan a una base de costes actuales, de costes anuales uniformes o se identifique la tasa de descuento para la que dos alternativas tengan valores actuales o costes anuales iguales.

Los aspectos fundamentales de que depende la bondad del análisis son la determinación de la inflación y de la tasa de descuento de cálculo.

El acertado pronóstico de la tasa de descuento, por ejemplo, tiene una gran influencia en las decisiones, puesto que los valores bajos favorecen estrategias con fuertes inversiones iniciales y costes reducidos de conservación y explotación, mientras que un valor alto de la tasa favorece estrategias inversas.

#### 6. SELECCION DE PRIORIDADES

El empleo eficaz de los recursos disponibles necesita de un planeamiento que responda a los objetivos previstos. Esta función se realiza en general mediante una clasificación de las posibles actuaciones por orden de prioridad.

El resultado final del análisis debería permitir dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Qué actuaciones son prioritarias? (selección de proyectos).
- ¿Cómo deben llevarse a cabo las actuaciones? (selección de estrategias alternativas).
- ¿Cuándo deben llevarse a cabo? (programación de actuaciones).

Los sistemas de selección de prioridades de actuación para la conservación y mejora de la red se han basado durante muchos años en el empirismo derivado del juicio de los administradores.

Actualmente existen un gran número de métodos disponibles, de complejidad variable de forma que cada organismo puede elegir el más adecuado a los medios de que dispone, tipo de red y objetivos, teniendo en cuenta los beneficios a obtener si utiliza los más complejos.

Conviene distinguir entre los métodos de clasificación o de optimización.

Los métodos de clasificación vienen dados en la figura 13. Todos los métodos se basan en la información sobre el estado de la red, como elemento de comparación entre tramos. A partir de aquí se seleccionan estrategias, preferiblemente dinámicas, para determinar las alternativas de conservación o rehabilitación, teniendo en cuenta los modelos de comportamiento y los umbrales de actuación. Posteriormente se analizan los costes de cada estrategia para determinar la de menor coste o mayor beneficio o una mezcla de ambos.

Una vez realizada esta labor para cada tramo de la red, se puede hacer una lista ordenada y seleccionar las prioridades mediante criterios de ponderación (tráfico, interés del itinerario, capacidad, potencial de accidentes, etc.).

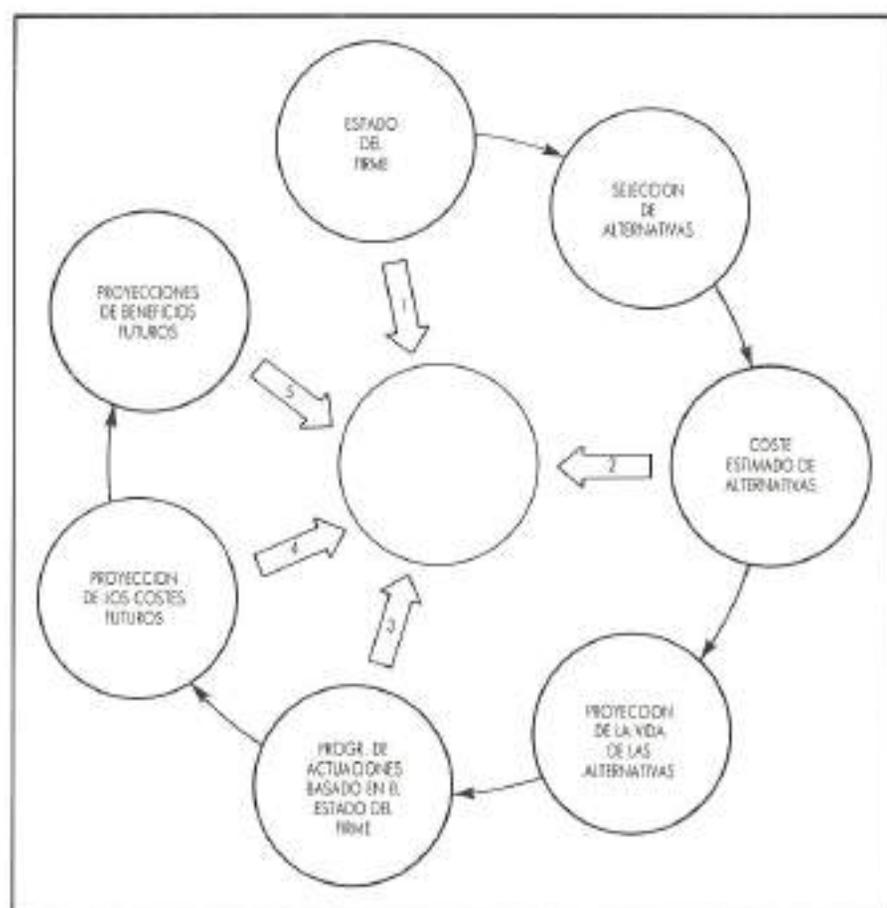


FIGURA 13.  
Métodos de clasificación.

Según se ve en la figura, la clasificación puede hacerse a varios niveles:

TIPO N.º	TIPO
1	Clasificación por condición.
2	Clasificación por coste inicial.
3	Clasificación por coste y momento de actuación.
4	Clasificación por coste a largo plazo.
5	Clasificación por coste/beneficio.

El procedimiento más sencillo es el primero, creciendo los demás en dificultad según su número.

Los métodos denominados de optimización pueden dividirse a su vez en dos:

#### MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN ANUAL.

Coinciden con los anteriores hasta la etapa de estimación del coste de las alternativas en el primer año. A partir de aquí definen una función de objetivos (minimización del coste total de un programa

anual, maximización del beneficio derivado del empleo de unos fondos, etc.), en la que éstos se plantean en términos matemáticos.

Las funciones objetivo tienen a su vez sus restricciones (nivel mínimo de los parámetros, utilización de un fondo fijo, etc.), y los beneficios tendrán definiciones distintas en función de la política de cada administración.

En estos métodos el objetivo principal es seleccionar los proyectos a iniciar en el año del estudio, no intentándose determinar el momento más adecuado para una actuación determinada. El estudio se repite año a año.

#### MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN REAL.

En este caso el estudio contempla las posibles secuencias de actuaciones de rehabilitación o conservación en un horizonte prefijado.

Se suelen considerar los estudios desde el punto de vista probabilístico, según las teorías de Markov, curvas de supervivencia o el método de Monte Carlo.

ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL

EVALUACION DE ALTERNATIVAS

VALORACION DE IMPACTOS

MEDIDAS CORRECTORAS

PLANES DE RESTAURACION

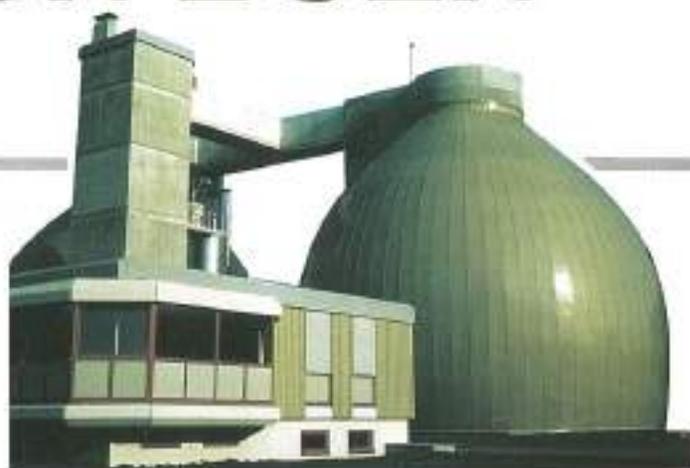


GESTION Y ASISTENCIA TECNICA DE ESTUDIOS AMBIENTALES

PLAZA DEL CONDE DEL VALLE SUCHIL, 15  
TELEFONO: 433 67 99  
28015 MADRID

# UN BUEN PROYECTO MERECE UN BUEN FINAL.

EQUIPOS E INSTALACIONES  
PARA LA PROTECCION DEL  
MEDIO AMBIENTE



El desarrollo de un buen proyecto precisa de unos medios técnicos y productivos que garanticen una buena finalización.

ATEINSA - Aplicaciones Técnicas Industriales, S.A., cuenta con modernos y potentes medios de producción y personal altamente cualificado que aseguran un

trabajo fluido y eficaz durante todo el proceso, desde el diseño hasta la entrega "llave en mano".

- Tamizados y pre-tratamientos.
- Aire-flotación.
- Tratamientos físico-químicos.
- Tratamientos biológicos.
- Digestión Anaerobia de lodos y residuos.
- Instalaciones de secado y manipulación de fangos.
- Plantas standard de bajo coste.
- Compactadora de residuos sólidos "TANA"



**ATEINSA**

APLICACIONES TÉCNICAS INDUSTRIALES, S.A.

Zurbano, 70 • Teléf. 419 95 50  
Apartado 3276 • Telex 22055 ATI E  
Telegr. ATEINSA • 28010 MADRID

Se definen, al igual que en el método anterior, la función de objetivos y las restricciones. Estas últimas suelen ser del tipo de un programa presupuestario definido, condición mínima de los firmes, etc.

Los métodos de optimización más usuales son los matemáticos (programación lineal o no lineal, por enteros o dinámicos) o los heurísticos (aproximados o de prueba error) que necesitan en cualquier caso una comprobación con los matemáticos para demostrar su consistencia.

### 7. PUNTO FINAL

Los métodos de gestión de firmes han pasado de una etapa académica a otra práctica, y a través de su aplicación han demostrado que con su utilización:

1. Aumentan las probabilidades de adoptar decisiones «adecuadas» al considerar los factores principales de una forma coordinada y tener en cuenta las distintas alternativas. Se minimiza la toma intuitiva de decisiones.
2. Mejoran la tecnología y la eficacia de las actuaciones al estudiar el problema de forma global.

Como recomendaciones generales para la im-

plementación de un Sistema General puede decirse que:

- El éxito o fracaso de un sistema de gestión radica en la definición de sus objetivos y en la consistencia de éstos con los medios disponibles y el tipo de red. Esta es la fase que necesita más tiempo de análisis y no la creación de la base de datos, que es un problema informático de sencilla solución una vez delineado el esquema general.
- El sistema debe incorporar, al mismo nivel, los análisis económicos y los ingenieriles, sin dar un peso prioritario a uno o a otro.
- En el desarrollo del sistema deben colaborar todas aquellas personas que de una u otra forma intervendrán en su implementación.

Y, finalmente, señalar los puntos clave específicos, una vez definidos los objetivos:

- Escalas de clasificación del estado y de los umbrales de actuación.
- Plan de toma de datos y base de datos bien estructurados.
- Datos fiables y uniformes.
- Modelo de evaluación de estrategias.
- Análisis de costes a lo largo de la vida de servicio.



Un aliado  
muy rentable.

---

## Motobasculantes



14 Modelos de 1000 a 3000 Kgs.  
Diferentes sistemas de descarga,  
Tracción a 2 y 4 ruedas.



---

## Carretillas Elevadoras

De 1000 a 2500 Kgs.



---

## Pala Cargadora

Modelo standard: 400 litros.  
Versiones con pinzas para troncos,  
retro excavadora, etc.



---

## Auto- hormigonera

Capacidad de amasada: 750 litros.



APART. P.O.B. 194  
TEL. (93) 874 73 11  
TELEX 53102 AUDU E  
MANRESA (Barcelona) ESPAÑA