



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Metodología basada en el HDM-4 para la selección de metas de desempeño en la red federal de carreteras

José Ricardo Solorio Murillo
Paul Garnica Anguas
Montserrat Montoya Ortega
Roberto Hernández Domínguez

**Publicación Técnica no. 457
San Fandila, Qro, 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Metodología basada en el HDM-4 para la selección
de metas de desempeño en la red federal de
carreteras**

Publicación Técnica no. 457
San Fandila, Qro, 2016

Este trabajo fue realizado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por el M.C. José Ricardo Solorio Murillo, el Dr. Paul Garnica Anguas, Monserrat Montoya Ortega y el M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez.

Contenido

Resumen	v
Abstract	vii
Resumen ejecutivo	ix
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2 Desempeño de carreteras	5
Capítulo 3 Aplicación de un marco de gestión del desempeño en México	15
Capítulo 4 Descripción de la metodología propuesta	19
Capítulo 5 Ejemplo de aplicación	23
Capítulo 6 Conclusiones	41
Bibliografía	43

Resumen

Las dependencias del gobierno mexicano responsables de la gestión de la red federal de carreteras, utilizan el Índice de Regularidad Internacional (IRI) como indicador principal para definir los niveles de servicio en los que se basan para evaluar el desempeño presente de la red, identificar los tramos que requieren acciones de conservación y establecer metas de desempeño. En este documento, la denominación *niveles de servicio* se refiere a intervalos de alguna medida del desempeño de las carreteras a los que se asignan descriptores como *bueno*, *regular* y *malo*. Aunque los actuales niveles de servicio reflejan de alguna manera la práctica internacional y la disponibilidad histórica de recursos, el enfoque empleado para establecer tales niveles ha sido esencialmente empírico. En este contexto, algunos actores vinculados a la operación de las carreteras federales están propugnando por la adopción de niveles de servicio en términos del IRI más estrictos, con lo cual obligan a las dependencias responsables a evaluar la viabilidad técnica y económica de un cambio de esta naturaleza. Tomando en cuenta lo anterior, se ha desarrollado una metodología basada en el HDM-4 para analizar los efectos del cambio de niveles de servicio sobre las necesidades presupuestales y sobre el desempeño de las carreteras. Esta metodología puede resumirse como sigue: a) Definir un conjunto de niveles de servicio en función del IRI; b) Utilizando un análisis de estrategias del HDM-4, obtener un programa de obra sin restricciones para un periodo de análisis congruente con los horizontes vigentes para la planeación y programación de la conservación; c) Ajustar el programa sin restricciones para una serie de escenarios presupuestales limitados, con la finalidad de evaluar las posibles consecuencias de una asignación insuficiente de recursos; d) Identificar las metas de desempeño que pueden alcanzarse para cada uno de los escenarios; e) Repetir los pasos anteriores hasta encontrar una combinación de niveles de servicio y escenario presupuestal que sea compatible con la disponibilidad de recursos prevista por la organización y con sus objetivos relacionados con el desempeño de la red. El uso de esta metodología se ilustra mediante un ejemplo de aplicación.

Abstract

The agencies of the Mexican government responsible of managing the federal road network use the International Roughness Index (IRI) as the main indicator for defining the service levels they rely on to rate current performance, identify sections requiring maintenance works and set performance targets. In this document, the term *level of service* refers to ranges of some road performance measure, which are assigned descriptors such as *good*, *fair* and *poor*. Although the service levels presently used reflect somehow the international practice and the historical availability of resources, the approach employed to define those levels has been essentially empirical. In this context, some stakeholders linked to the operation of the federal roads are advocating for the adoption of stricter levels of service in terms of IRI, thereby forcing the agencies responsible to assess the technical and economic feasibility of such a change. Taking the above into account, a HDM-4 based methodology for analyzing the effects of a change in the levels of service on budget requirements and road performance is proposed. This methodology can be summarized as follows: a) Define a set of levels of service; b) Using a HDM-4 strategy analysis, obtain an unrestricted works program for an analysis period consistent with the current planning and programming horizons for maintenance; c) Adjust the unconstrained program for a given set of restricted budget scenarios so that the potential consequences of an insufficient resource allocation can be assessed; d) Identify the performance targets that can be reached for each scenario; e) Repeat the previous steps until finding a combination of levels of service and a budget scenario that complies with the resource availability forecast by the agency and its performance-related goals. Use of this methodology is illustrated through an application example.

Resumen ejecutivo

Desde hace más de diez años, dependencias de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) han utilizado indicadores del estado de los pavimentos con el fin de diagnosticar los niveles de servicio de las carreteras federales, identificar las acciones más adecuadas para su conservación y mejora e informar sobre el estado de la red a los grupos de interés. Entre estos indicadores figuran el Índice de Regularidad Internacional (IRI), los deterioros superficiales y las deflexiones del pavimento.

El IRI ha tenido una especial relevancia, ya que ha sido prácticamente el único indicador que se ha utilizado con el fin de intercambiar información con actores vinculados a la conservación y al desarrollo de red federal, como la Secretaría de Hacienda, la Cámara de Diputados y las instituciones financieras.

En fechas recientes, algunos grupos de interés han manifestado su desacuerdo con los niveles de servicio de IRI actualmente en uso, ya que los consideran poco exigentes para promover el desarrollo económico y social del país.

Es claro que el cambio de los actuales niveles de servicio por unos más estrictos podría ser útil para mejorar la calidad de los servicios carreteros y, a la vez, para justificar un incremento en los recursos que se destinan a la conservación. Sin embargo, este cambio entrañaría, también, un riesgo muy serio si no se acompaña de objetivos y metas claros para lograr, de manera gradual, la mejora deseada.

La gestión moderna de activos carreteros proporciona un proceso formal para la revisión de niveles de servicio, el cual se conoce como *gestión del desempeño*.

El término *desempeño* vinculado a las redes de carreteras ha tenido distintos usos a través del tiempo. Tradicionalmente, se le ha utilizado para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales constitutivos de los pavimentos. Sin embargo, la evolución de las disciplinas científicas y las tecnologías vinculadas al diseño y la gestión de carreteras, han generado otros usos del término en el contexto de la ingeniería vial.

Así, durante la realización de la prueba AASHO a finales de los años cincuenta, se definió el concepto de *desempeño del pavimento* como la capacidad de este activo para prestar al tránsito un servicio satisfactorio durante un determinado periodo de tiempo. Esta capacidad, a la que se denominó *capacidad de servicio* o *capacidad funcional* (en inglés *serviceability*), se especificó en términos del *índice de servicio actual* (*present serviceability index, PSI*), un indicador que correlaciona la comodidad que experimenta el usuario al circular por la carretera con parámetros del estado del pavimento como la regularidad y el agrietamiento. Durante la prueba

AASHO, se concluyó que el uso de este tipo de medidas como criterios de intervención resultaba insuficiente si no se relacionaba con la comodidad del usuario.

La definición del desempeño de pavimentos sirvió como base para el desarrollo de la gestión de pavimentos y de otros activos. Sin embargo, en los años subsecuentes, la extensión y uso cada vez mayor de las redes de carreteras hicieron que el desempeño de los activos resultara también insuficiente como criterio para identificar políticas de conservación óptimas, a la luz de nuevos problemas como la accidentalidad, la congestión y el impacto de la infraestructura vial sobre el medioambiente. Lo anterior condujo en los últimos años a la generalización del concepto de desempeño de pavimentos para tomar en cuenta estos nuevos factores del desempeño de las carreteras, cuya importancia para los usuarios y otros grupos de interés es cada vez mayor.

En el contexto de esta generalización del concepto de desempeño, la *gestión del desempeño* es un proceso en el que los objetivos de una organización de carreteras se convierten en medidas y metas a las que se da un seguimiento continuo. Este proceso se encuentra sujeto a un desarrollo conceptual de referencia conocido como *marco de gestión del desempeño*, el cual tiene los siguientes componentes principales:

- *Objetivos institucionales.* Enunciados que describen de manera general el desempeño de las carreteras en función de atributos como la seguridad, la movilidad, la comodidad y el impacto ambiental.
- *Medidas de desempeño.* Indicadores que se utilizan para evaluar el cumplimiento de los objetivos institucionales. Las medidas de desempeño se clasifican en medidas de usuario (p. ej. “% de exposición a una superficie en buen estado”) y medidas técnicas (p. ej. el índice de regularidad internacional).
- *Metas de desempeño.* Objetivos vinculados a las medidas de desempeño, expresados como valores específicos de esas medidas que se desea alcanzar en un determinado plazo.
- *Niveles de servicio.* Intervalos de clasificación de los valores que pueden tomar las medidas de desempeño a los que se asignan descriptores cualitativos como *bueno*, *regular* y *malo*. La evaluación del desempeño se hace normalmente en términos de estos niveles de servicio.

En nuestro país, las entidades que tienen a su cargo redes de carreteras aún no adoptan un enfoque formal de gestión de activos. Sin embargo, algunos de sus procesos de asignación de recursos para la conservación incluyen elementos de los marcos de gestión del desempeño, los cuales podrían tomarse como punto de partida para el desarrollo ulterior de la gestión del desempeño en México.

En este documento se presenta una metodología para la evaluación de metas en el contexto de un marco de gestión del desempeño. Esta metodología, que utiliza el sistema HDM-4 como herramienta de análisis, permite determinar el impacto de cambios en niveles de servicio referidos al IRI sobre dos aspectos fundamentales: por un lado, las necesidades de recursos para la conservación de carreteras y, por otro, la calificación de su desempeño. La metodología puede resumirse en los siguientes puntos:

- Definir un estándar de IRI como un conjunto de niveles de servicio y de umbrales de intervención.
- Utilizando un análisis de estrategias del HDM-4, obtener un programa de obra sin restricciones presupuestales para un periodo de análisis determinado.
- Obtener programas sujetos a restricciones presupuestales, de manera que puedan estimarse los posibles efectos de una asignación de recursos insuficiente.
- Identificar las metas de desempeño que pueden alcanzarse con los presupuestos limitados.
- Repetir los pasos anteriores hasta encontrar una combinación de estándar de IRI y escenario presupuestal que sea compatible con la disponibilidad de recursos prevista por la organización y con sus objetivos de desempeño.

La metodología propuesta se ilustra mediante un ejemplo de aplicación en el que se utilizaron datos de una parte de la red federal de cuota con una longitud de 4,680 km de calzadas de dos carriles. Este ejercicio produjo hallazgos como los siguientes:

- a) Evidentemente, al aumentar el nivel de exigencia del estándar de IRI aplicado se elevan las necesidades de recursos para la conservación. Sin embargo, el efecto más notorio es el incremento de los requerimientos presupuestales en el primer año, sobre todo cuando existe una diferencia significativa entre el estándar existente y el deseado.
- b) El HDM-4 ofrece un proceso de jerarquización y optimización que permite la mejora progresiva de la red mediante la distribución óptima de un determinado presupuesto en asignaciones anuales de igual monto.
- c) Cuando se limitan en forma severa las asignaciones anuales, el proceso de mejora mencionado en el punto anterior se ralentiza e incluso puede revertirse.
- d) La aplicación de la metodología propuesta puede ser útil en la formulación de metas de desempeño relacionadas con la mejora de redes de carreteras.

- e) La implementación de programas sin restricciones presupuestales derivados de requerimientos de desempeño muy exigentes podría no ser factible aún en el caso remoto de que se contara con los recursos necesarios, ya que la magnitud de los volúmenes de obra involucrados carece normalmente de viabilidad práctica.

1 Introducción

Durante más de una década, dependencias de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) entre las que figuran la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), la Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC) y Caminos y Puentes Federales de Ingresos Federales y Servicios Conexos (CAPUFE), han utilizado indicadores de la condición de los pavimentos con propósitos como los siguientes: i) Diagnosticar el estado de las carreteras a su cargo; ii) Identificar las acciones de conservación técnica y económicamente más adecuadas para mantener determinados niveles de servicio; iii) Informar sobre el estado de la red federal de carreteras a los grupos de interés. La DGCC es responsable de la conservación de la red federal libre de peaje, mientras que la DGDC supervisa la operación de la red federal de cuota. Por su parte, CAPUFE tiene a su cargo la conservación y operación de una parte importante de la red de cuota, en la que destaca la administrada por el Fondo Nacional de Infraestructura.

Entre los indicadores empleados hasta la fecha, que en su mayoría se refieren a los pavimentos, pueden mencionarse los siguientes:

- Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- Deterioros superficiales.
- Deflexiones del pavimento.

En el caso de la DGCC, se ha sistematizado también la recopilación de indicadores para otros activos de la red, particularmente los puentes y el señalamiento vertical.

El IRI ha tenido una especial relevancia, ya que ha sido prácticamente el único indicador que se ha utilizado con el fin de intercambiar información con los grupos de interés de la red federal, que incluyen actores como:

- Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- Cámara de Diputados.
- Otras dependencias de la SCT.
- Instituciones financieras.
- Contratistas.
- Usuarios de la red.

Los informes de la DGCC sobre el estado de la red federal libre de peaje se basan en una división de la escala del IRI en tres intervalos, lo que da lugar a igual número de posibles estados cualitativos del pavimento que se identifican con los descriptores *bueno*, *satisfactorio* y *no satisfactorio*. Como se indica más adelante, dentro de un marco de gestión del desempeño este tipo de intervalos se conocen

como *niveles de servicio*. La DGCC expresa sus metas de desempeño y mide la efectividad de sus programas en función del porcentaje de longitud de la red que se encuentra en estado *bueno* o *satisfactorio*.

Por su parte, la DGDC emplea intervalos de IRI que definen únicamente dos estados posibles: *aceptable* o *inaceptable*. La frontera entre ambos estados está definida por un solo umbral de IRI, que sirve como referencia a esta Dirección para identificar los tramos que requieren ser intervenidos por parte del concesionario u operador.

En fechas recientes, algunos grupos de interés han manifestado su desacuerdo con los niveles de servicio de IRI actualmente en uso, ya que los consideran poco exigentes en relación con la calidad de servicio necesaria para impulsar el desarrollo económico y social, sobre todo si se comparan con los que utilizan otros países, particularmente los países desarrollados. Asimismo, estos grupos han propuesto la definición de niveles de servicio en términos de otros indicadores del estado físico de los pavimentos como el porcentaje de agrietamiento, la resistencia al deslizamiento o la capacidad estructural.

Sin duda, la adopción de niveles de servicio más estrictos puede ser útil para mejorar las prácticas de gestión de las entidades responsables e incluso para demostrar la necesidad de asignar mayores recursos a la conservación de la red federal. Sin embargo, este cambio puede entrañar también un serio riesgo institucional si no se acompaña de un conjunto de objetivos y metas claramente establecidos que permitan alcanzar de manera gradual la calidad de servicio deseada. En el proceso de formulación de tales objetivos y metas, se debe verificar la viabilidad de los mismos partiendo de una estimación confiable de los recursos que estarán disponibles para la conservación en el mediano plazo.

En opinión de los autores, la revisión de los niveles de servicio empleados para describir el estado de la red debe efectuarse con el auxilio de un marco general de gestión del desempeño.

El desempeño de las redes de carreteras es un aspecto fundamental en la gestión moderna de activos viales, ya que proporciona la información necesaria para dar seguimiento al cumplimiento de los objetivos de la organización responsable. El desempeño de las carreteras comprende, además de su estado físico, otros atributos que se utilizan concurrentemente para evaluar la calidad de los servicios ofrecidos, entre los que figuran la seguridad, la capacidad funcional, la sustentabilidad, la movilidad, la confiabilidad y los aspectos económicos.

En los últimos años, el seguimiento del desempeño de carreteras se ha convertido en una preocupación creciente a nivel mundial. Como resultado de ello, se han generado iniciativas como la impulsada por el gobierno de los Estados Unidos de América en 2012 a través de la Ley MAP-21 (FHWA, 2012). Esta ley obliga a los estados de ese país a definir metas específicas para un conjunto de medidas de desempeño, así como a describir la manera en que los programas y proyectos impulsados contribuirán al logro de esas metas.

La gestión del desempeño es un proceso sistemático para la definición de objetivos y la verificación periódica del avance logrado en su consecución (Simpson, et al., 2013). Este proceso se basa en un conjunto de directrices institucionales formuladas bajo el concepto de *marco de gestión del desempeño*, el cual comprende los siguientes rubros [(HMEP & UKRLG, 2013), (NAMS, 2011)]:

- *Objetivos institucionales*. Enunciados generales que describen el desempeño de las carreteras en términos comprensibles por los grupos de interés vinculados al transporte por carretera (en general: usuarios, dependencias de gobierno, legisladores, asociaciones gremiales, contratistas, instituciones financieras, etc.).
- *Medidas de desempeño*. Indicadores empleados para determinar si la organización se dirige al cumplimiento de sus objetivos institucionales y para informar sobre el desempeño de las carreteras durante un periodo determinado.
- *Metas de desempeño*. Describen el desempeño que la agencia busca alcanzar.
- *Niveles de servicio*. Intervalos de clasificación basados en los objetivos institucionales y en las medidas de desempeño a los que se asignan descriptores como *bueno*, *regular* y *malo*, lo que permite calificar el desempeño de manera que sea fácilmente comprensible para los grupos de interés.

En México, las entidades responsables de las carreteras aún no han adoptado formalmente un enfoque de gestión de activos. Sin embargo, en el caso de la DGCC, los procesos de asignación de recursos vinculados a la conservación de la red federal libre de peaje incluyen algunos elementos de un marco de gestión del desempeño, como se indica a continuación.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) y el Programa Nacional de Infraestructura (PNI), elaborados al inicio de cada administración federal, definen objetivos generales y disposiciones relacionadas con la conservación y el desarrollo de la red federal [(Gobierno de la República, 2013), (Gobierno de la República, 2014)].

Siguiendo las directrices establecidas en el PND y el PNI, la DGCC formula un plan sexenal y un programa anual de obra para la conservación de la red a su cargo. Ligadas a los anteriores instrumentos, se definen unas metas de desempeño en términos de longitudes de carretera en estado *bueno*, *satisfactorio* y *no satisfactorio*, de acuerdo con lo mencionado al inicio de este capítulo. Además de utilizarse en la definición de los niveles de servicio, el IRI se aplica también en la especificación de umbrales de intervención para, eventualmente, lograr las metas de desempeño definidas por la DGCC. Tanto el plan sexenal como el programa anual de obra se preparan empleando el HDM-4 como herramienta para el análisis de inversiones.

A pesar de lo antes expuesto, los niveles de servicio empleados en la gestión de red federal han sido seleccionados con criterios más bien empíricos. Aunque se han tomado en cuenta aspectos como la disponibilidad histórica de recursos y la práctica internacional, en realidad no existe un método formal para evaluar las consecuencias de la adopción de unos determinados niveles de servicio sobre los montos necesarios para la conservación de la red y sobre el desempeño de la misma.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha desarrollado una metodología basada en el HDM-4 para evaluar el impacto de un cambio en los niveles de servicio, la cual se basa en los principios de la gestión del desempeño, que se describen con mayor detalle en el Capítulo 2. Esta metodología, parte del bosquejo de un marco para la gestión del desempeño de la red federal de carreteras, de acuerdo con lo presentado en el Capítulo 3.

Como se mencionó previamente, la DGCC emplea el HDM-4 en la preparación de su plan sexenal y su programa anual. Otras dependencia federales, además de gobiernos estatales y operadores privados, han hecho esfuerzos para poner en operación el HDM-4 como parte de sus herramientas de análisis. Estas experiencias, junto con la capacidad del HDM-4 para jerarquizar y optimizar programas de obra de manera que maximicen los beneficios de las inversiones, llevaron a los autores a optar por el uso de este sistema en el desarrollo de la metodología propuesta.

2 Desempeño de carreteras

2.1 Aspectos generales

En ingeniería de pavimentos, el término *desempeño* se utiliza con frecuencia para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales ante unas determinadas solicitaciones. Así, en el caso de las mezclas asfálticas, el desempeño se establece en términos de la resistencia de la mezcla a la fatiga y a la deformación permanente, y se expresa como el número de ciclos de carga aplicados antes de que se presenten estos modos de falla.

A partir de la segunda mitad del siglo pasado, la evolución de los marcos conceptuales y las tecnologías vinculados al diseño y a la gestión de los pavimentos y de otros activos viales, ha generado otros usos del término *desempeño* para describir atributos de las carreteras. Entre estos usos, destacan, por un lado, las denominaciones *desempeño del pavimento* y, en general, *desempeño de los activos carreteros* para calificar el grado en que los diversos componentes de la infraestructura vial cumplen con los objetivos para los que fueron diseñados y construidos.

Por otra parte, con el desarrollo de la gestión de activos aplicada a la infraestructura carretera a partir de la década de los noventa, el término se ha vinculado a la medición del grado en el que una organización de carreteras logra unos objetivos determinados de calidad de servicio en un plazo preestablecido. Esta medición, se basa en un enfoque metodológico conocido como *gestión del desempeño*.

En los incisos 2.2 y 2.3 se presenta una descripción más detallada de los conceptos vinculados al desempeño de los activos carreteros y a la gestión del desempeño de las carreteras.

2.2 Desempeño del pavimento y desempeño de los activos carreteros

Durante la prueba AASHO, llevada a cabo en los EE.UU. a mediados del siglo pasado, se concluyó que el comportamiento mecánico de los pavimentos y, en particular, la presencia de deterioros superficiales, resultaba insuficiente para determinar el tipo de trabajos de conservación requeridos en cada caso, y que era necesario tomar en cuenta el propósito original con el que se había construido el pavimento, es decir, proporcionar a los usuarios un recorrido suave, cómodo y seguro [(Carey & Irick, 1960), en (Haas, et al., 1994)]. Esta clarificación del objetivo de los pavimentos llevó a la definición del concepto de *capacidad de servicio* o *capacidad funcional* (en inglés *pavement serviceability*) como la competencia del

pavimento para proporcionar a los usuarios un recorrido en condiciones de confort y seguridad (De Solminihac, 2001).

Durante la prueba AASHO, se encontró que el confort (también denominado calidad de la rodadura) es un aspecto subjetivo que depende de la percepción del usuario y que, por lo tanto, la capacidad funcional podía determinarse a partir de las opiniones de un grupo de evaluadores. Lo anterior dio origen a un parámetro denominado *calificación de servicio actual (present serviceability rating, PSR)*, que se calcula como el promedio de las calificaciones de los evaluadores en una escala de 0 a 5, empleando el formato mostrado Figura 2.1.

¿Aceptable?		5	Muy bueno
Sí	<input type="checkbox"/>	4	Bueno
No	<input type="checkbox"/>	3	Regular
Sin decisión	<input type="checkbox"/>	2	Malo
		1	Muy malo
		0	
Id. tramo _____		Evaluador _____	Calificación _____
Fecha _____		Hora _____	Vehículo _____

Figura 2.1. Formato para la evaluación de la calidad de la rodadura mediante el PSR.

Puesto que el método anterior resultaba poco práctico para determinar periódicamente la capacidad funcional a nivel de red, durante la prueba AASHO se buscó correlacionar el PSR con algunas características físicas del pavimento que pudieran medirse directamente (Pavia Systems, 2012). De esta manera se encontró que, en el caso de los pavimentos asfálticos, los siguientes indicadores tenían una alta correlación con la capacidad funcional:

- Regularidad del pavimento.
- Profundidad de roderas.
- Proporción de la superficie con agrietamiento.
- Proporción de la superficie con baches reparados.

Por lo que respecta a los pavimentos de concreto hidráulico, la capacidad funcional pudo correlacionarse de manera apropiada con los siguientes parámetros:

- Regularidad.
- Proporción de la superficie con agrietamiento.
- Proporción de la superficie con reparaciones.
- Pérdida de material en los bordes de juntas y grietas.

A través de análisis de regresión, se obtuvieron unas ecuaciones que relacionan la capacidad funcional del pavimento con indicadores de su estado físico, una para pavimentos asfálticos y otra para pavimentos de concreto. Para los primeros, la ecuación obtenida fue (De Solminihac, 2001):

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01(C + P)^{\frac{1}{2}},$$

donde SV , RD , C y P son, respectivamente, una medida de la regularidad (varianza de la pendiente del perfil longitudinal), la profundidad de roderas, el porcentaje de superficie agrietada y el porcentaje de superficie con baches reparados.

En el caso de los pavimentos de concreto, la ecuación resultó:

$$PSI = 5.41 - 1.78 \log(1 + SV) - 0.09(C + P)^{\frac{1}{2}}$$

En la ecuación anterior, SV es también la varianza de la pendiente longitudinal, mientras que C es la longitud total de grietas abiertas o selladas por unidad de área y P es el porcentaje de área con reparaciones.

A la variable dependiente de estas ecuaciones se le denominó *índice de servicio actual* (*present serviceability index, PSI*). Este parámetro quedó definido en la misma escala que el PSR, y fue la base para establecer el concepto de desempeño del pavimento como la capacidad de este activo para prestar al tránsito un servicio satisfactorio durante un determinado periodo, como se ilustra en la Figura 2.2 (AASHTO, 1993).

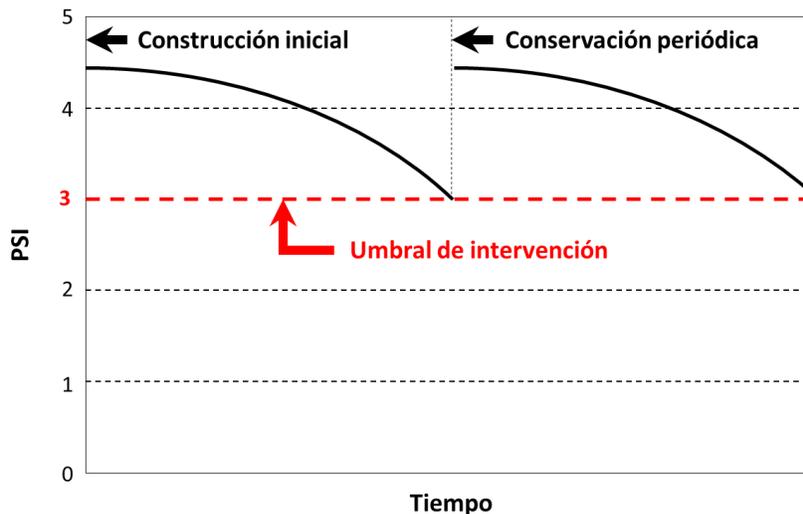


Figura 2.2 Desempeño del pavimento.

El estudio del desempeño de pavimentos fue fundamental para el desarrollo de la gestión de pavimentos en los años subsecuentes, ya que, a través de indicadores como el PSI, proporcionó criterios objetivos para la toma de decisiones respecto al momento más oportuno para actuar en un tramo determinado. Este enfoque se

trasladó posteriormente a los puentes y a otros activos carreteros, dando origen a nuevos sistemas de gestión basados en atributos apropiados para evaluar el desempeño de cada activo, por ejemplo, medidas de la seguridad estructural en el caso de puentes, cortes o terraplenes, o de la visibilidad en el caso del señalamiento.

Sin embargo, más adelante, la creciente demanda vinculada a los sistemas carreteros y, consecuentemente, su extensión cada vez mayor, provocaron que los indicadores de desempeño de los activos también resultaran insuficientes para definir políticas de conservación óptimas desde el punto de vista técnico y económico. La falta de recursos obligó a jerarquizar la atención de los tramos, para lo cual se utilizó el desempeño de los activos como criterio principal de decisión. Con lo anterior, en muchos casos se postergó la atención de activos en buen estado, provocando que, más adelante, estos activos se sumaran a la porción de la red con estándares de servicio deficientes.

Además, este enfoque de gestión circunscrito a los detalles técnicos del desempeño de los activos, mantuvo por un tiempo en segundo plano nuevos problemas como la accidentalidad, la congestión y el impacto de la infraestructura carretera sobre el medioambiente. Los problemas anteriores, comenzaron a tener una importancia cada vez mayor para los usuarios y otros grupos de interés, al grado de igualar la que en un principio sólo otorgaban a la capacidad funcional de los pavimentos.

De este modo, ha sido necesario generalizar el concepto original de desempeño de pavimentos para tomar en cuenta estos factores adicionales del desempeño de las carreteras cada vez más importantes para los usuarios. Lo anterior ha ocurrido de manera gradual en los últimos veinte años, con el desarrollo de la Gestión de Activos Carreteros.

2.3 Gestión del desempeño

La *Gestión del desempeño* puede definirse como un proceso continuo en el que los objetivos de una administración de carreteras se convierten en medidas y metas a las que se da seguimiento para garantizar el logro de objetivos institucionales hechos del conocimiento público (International Scanning Study Team, 2010).

La gestión del desempeño implica un flujo de información “descendente” (de los niveles directivos a los operativos) mediante el cual se comunican los objetivos y metas que persigue la organización y las medidas que se utilizarán para dar seguimiento a los avances obtenidos (AASHTO, 2011). Al mismo tiempo, requiere un flujo de información “ascendente”, que supone la recopilación de un volumen considerable de datos y su procesamiento para obtener una cantidad de información menor, pero más útil, que fluye hacia los niveles superiores y se utiliza como apoyo en la toma de decisiones.

La gestión del desempeño pone a disposición de los administradores de la infraestructura carretera las herramientas necesarias para:

- Crear un vínculo entre los objetivos institucionales, las estrategias de gestión y las operaciones de conservación y mejora de la infraestructura.
- Medir el desempeño con referencia a los objetivos institucionales.
- Desarrollar estrategias de gestión para el logro de los objetivos establecidos.
- Estimar los costos y los beneficios de los servicios de manera integral.
- Informar a los grupos de interés sobre el nivel de desempeño actual y sobre cualquier cambio que se proponga para mejorarlo, incluyendo el costo correspondiente.
- Demostrar cualesquier insuficiencias en los presupuestos asignados.

En resumen, la gestión del desempeño proporciona las bases para la mejora continua del proceso de toma de decisiones vinculado a las inversiones en conservación y modernización de carreteras, en contraste con el logro de una diversidad de metas arbitrarias de corto plazo (con frecuencia inalcanzables) definidas en términos de indicadores del desempeño de los activos (International Scanning Study Team, 2010).

2.4 Marco de gestión del desempeño

En el contexto de la gestión de activos, la gestión del desempeño se basa en un desarrollo conceptual de referencia conocido como *marco de gestión del desempeño*. Este marco tiene normalmente una estructura jerárquica que define, a partir de los atributos de los servicios carreteros, objetivos institucionales, medidas de desempeño de los usuarios y medidas de desempeño técnicas, como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Jerarquía para la gestión del desempeño.

En la Tabla 2.1 se clarifican los conceptos anteriores mediante su definición y algunos ejemplos.

Tabla 2.1. Conceptos del marco de gestión del desempeño (NAMS, 2011).

Concepto	Definición	Ejemplos
Atributos del servicio	Aspectos o características del servicio	Accesibilidad, confort, seguridad, movilidad, confiabilidad
Objetivos institucionales	Lo que la administración aspira a ofrecer. Los objetivos institucionales describen los atributos del servicio desde el punto de vista de los usuarios	Proporcionar a los usuarios un recorrido confortable Asegurar que los usuarios se sientan seguros al circular por la red
Medidas de desempeño de usuario	Expresan las percepciones del usuario con respecto al servicio que recibe. Se emplean en documentos públicos, por lo que deben ser comprensibles para el ciudadano común	Exposición a una superficie regular del pavimento Claridad y suficiencia del señalamiento vertical
Medidas de desempeño técnicas	Comprenden indicadores del estado físico o de las condiciones de operación de la carretera. Se utilizan mayormente para el consumo interno de la administración	Índice de Regularidad Internacional (IRI) Retrorreflectividad de las señales Porcentaje de señales faltantes

La creación de un marco de desempeño supone establecer, para cada atributo del servicio, uno o más objetivos institucionales, y vincular a estos una o más medidas de desempeño, de usuario o técnicas, de modo que pueda darse seguimiento al cumplimiento de los objetivos.

Adicionalmente, se debe especificar para cada medida de desempeño una meta concreta, en términos de un valor cuantitativo o cualitativo, así como el periodo en el que se espera alcanzarla. Así, por ejemplo, una meta para la medida “exposición a una superficie regular del pavimento” podría definirse como el “proporción de la longitud con una regularidad de aceptable a buena mayor o igual al 95 % para 2018”. Evidentemente, las categorías *aceptable*, *buena* y cualquier otra que se defina para calificar la *regularidad*, deben expresarse en términos de medidas de tipo técnico, como el IRI.

La evaluación del cumplimiento de los objetivos institucionales, consiste en comparar los valores de las medidas de desempeño en el momento de la evaluación con las metas establecidas, lo cual provee la información suficiente para saber si la administración se encuentra en la dirección correcta o si es necesario realizar ajustes, incluyendo, en un momento dado, la revisión del marco existente.

En los incisos 2.5 a 2.8 se presenta una descripción más detallada de los objetivos institucionales, las medidas y las metas de desempeño.

2.5 Objetivos institucionales

Dentro de un marco de gestión del desempeño, los objetivos institucionales son enunciados generales que describen el desempeño de la infraestructura vial en términos comprensibles para los grupos de interés involucrados en el transporte por carretera (HMEP & UKRLG, 2013). Tales enunciados deben relacionarse con los resultados que la administración espera obtener (p. ej. “prestar servicios carreteros confiables”) y abarcar el desempeño de la red en su conjunto y no el de los activos individuales.

Es necesario hacer notar que en múltiples documentos de gestión de activos, se utiliza la denominación “niveles de servicio” para hacer referencia a los mismos enunciados generales. Aquí se ha preferido la denominación “objetivos institucionales” por considerarla más acorde con la terminología empleada en el medio carretero mexicano.

La definición de los objetivos institucionales se basa necesariamente en los objetivos estratégicos nacionales o locales, y sirve a su vez como base para la generación de objetivos operacionales más detallados (Figura 2.4).

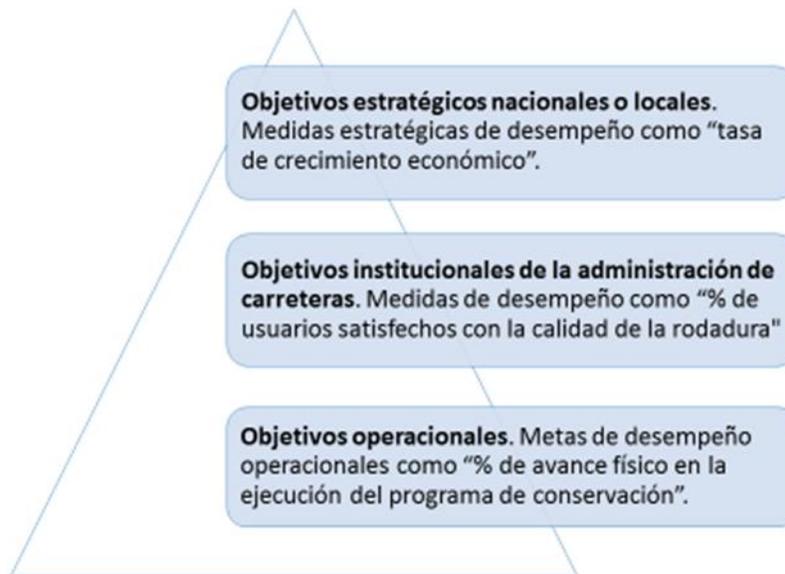


Figura 2.4. Vinculación entre distintos tipos de objetivos (NAMS, 2011).

Por otro lado, los objetivos institucionales también deben tomar en cuenta de manera puntual las expectativas de los usuarios y de otros grupos de interés.

A continuación se presentan algunos ejemplos de enunciados generales que describen objetivos institucionales (HMEP & UKRLG, 2013):

- a) “Asegurar que los usuarios de la red se sientan seguros y confíen en su seguridad personal cuando utilicen la red”:
- b) “Proporcionar a los usuarios un recorrido con el mayor nivel de confort posible, tomando en cuenta sus expectativas”.
- c) “Ofrecer a los usuarios una garantía razonable de que su recorrido por la red estará libre de incidentes y tendrá una duración predecible”.
- d) “Asegurar en la medida de lo posible la disponibilidad y accesibilidad de la red”.
- e) “Reducir progresivamente el impacto ambiental de la infraestructura carretera en beneficio de todos los usuarios”.
- f) “Garantizar que las inversiones en proyectos de conservación y mejora de carreteras produzcan los mayores beneficios a los usuarios, de acuerdo con los recursos disponibles”.

El logro de los objetivos institucionales será más factible en la medida en que estos sean del conocimiento de los actores involucrados y cuenten con su aprobación. Por lo anterior, es recomendable el uso de mecanismos de consulta durante el proceso de formulación de los objetivos institucionales. Entre tales mecanismos pueden mencionarse reuniones de alto nivel con representantes de los poderes públicos, grupos de discusión, encuestas de opinión y trabajo colaborativo con pares de organizaciones similares.

Cuando los recursos disponibles resultan insuficientes para el logro los objetivos institucionales, los marcos de gestión del desempeño proveen los elementos suficientes para demostrar las implicaciones de la falta de recursos sobre la calidad de los servicios carreteros.

2.6 Medidas de desempeño

De acuerdo con lo visto en el inciso 2.4, las medidas de desempeño se encuentran vinculadas estrechamente a los objetivos institucionales y proporcionan evidencia sobre el desempeño de la administración de carreteras. Estas medidas permiten dar seguimiento a la prestación de los servicios, almacenar información sobre su calidad y transmitirla en forma periódica a los grupos de interés.

Diversos textos sobre gestión de activos coinciden en recomendar la aplicación del enfoque *SMART* para la definición de las medidas de desempeño, es decir, procurar que cada medida sea:

- *E(s)pecífica*. Define los resultados esperados para un aspecto específico del servicio. Por esta razón, se puede definir más de una medida para cada objetivo institucional.

- **(M)edible.** Se puede expresar en términos de cantidades físicas, monetarias o a través de categorías predefinidas.
- **(A)lcanzable.** La meta correspondiente proviene de una evaluación realista del nivel de desempeño que puede lograrse, es decir, no debe ser ni muy ambiciosa ni extremadamente fácil de alcanzar.
- **(R)elevante.** Indica claramente si se está cumpliendo el objetivo institucional correspondiente.
- **Acotada en el (t) tiempo.** El cumplimiento de la meta correspondiente está sujeta a un plazo. Cuando el plazo sea largo, se deben incluir metas anuales para evaluar periódicamente el avance obtenido.

Un aspecto fundamental en la definición de medidas de desempeño consiste en aprovechar al máximo la información ya existente, de modo que la recopilación de nueva información se reduzca al mínimo indispensable. Por otro lado, las medidas deben:

- Aplicarse de manera uniforme en el tiempo, a fin de que pueda darse seguimiento a los avances y a las tendencias.
- Ser congruentes con los estándares internacionales aplicables para estar en posibilidad de llevar a cabo análisis comparativos con organizaciones similares.
- Considerar la relación entre el costo de las mediciones y el valor real de la información.

Adicionalmente, es necesario tener siempre presentes las diferencias entre las medidas de desempeño de usuario y las medidas técnicas. Las primeras están enfocadas a determinar la manera en que el usuario percibe el servicio y, por lo tanto, se utilizan principalmente para medir el desempeño de la administración en el cumplimiento de su misión e informar sobre este aspecto a grupos de interés diversos como la entidad que asigna los recursos, la legislatura y el público en general.

Las medidas técnicas, en cambio, describen el desempeño de los activos, el cual constituye un ingrediente básico que la administración utiliza en el diseño las estrategias de gestión más adecuadas para cumplir con las metas definidas para las medidas de usuario. De este modo, por ejemplo, medidas técnicas del desempeño de pavimentos como las deflexiones y la calidad de la subrasante permiten identificar las opciones de intervención que maximizan los beneficios para los usuarios, pero prácticamente carecen de significado para los grupos de interés.

2.7 Metas de desempeño

Las metas de desempeño describen las aspiraciones de la administración de carreteras con respecto a la calidad de servicio que desea ofrecer. De acuerdo con el Manual Internacional de Gestión de Infraestructura (NAMS, 2011), el establecimiento de las metas de desempeño es una decisión organizacional crítica, por lo que, con frecuencia, se utilizan como opción por defecto metas cercanas a la situación existente.

En cualquier caso, durante la definición de las metas de desempeño se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El desempeño pasado y presente de la red.
- La factibilidad de nuevas metas en el corto, mediano y largo plazo, la cual debe estimarse a partir de un conocimiento razonable de los recursos que estarán disponibles en esos plazos.
- Las enseñanzas derivadas del incumplimiento de metas de desempeño en el pasado.

2.8 Niveles de servicio

Una vez que se han definido unas medidas de desempeño apropiadas para los distintos objetivos institucionales, se pueden establecer intervalos de la escala que corresponde a cada medida para determinar su nivel mediante descriptores del tipo *bueno*, *regular* y *malo*. Esto permite describir el desempeño de manera que sea fácilmente comprensible para todos los grupos de interés.

En el enfoque de gestión de activos predominante en los Estados Unidos de América, los intervalos del párrafo anterior se denominan *niveles de servicio*, y se llama *umbrales* a los límites inferior y superior de cada intervalo. La Tabla 2.2 muestra, a manera de ejemplo, los niveles de servicio propuestos para la medida *% de viajes a tiempo* incluida en una guía para la definición de niveles de servicio desarrollada en ese país (TRB, 2010).

Tabla 2.2. Ejemplo de la definición de niveles de servicio (TRB, 2010).

Medida de desempeño	Niveles de servicio				
	A	B	C	D	F
% de viajes a tiempo	100 – 80	79 - 60	59 - 40	39 - 20	19 - 0

Asimismo, se pueden asignar factores de ponderación a las distintas medidas definidas para cada objetivo institucional, a fin de que el avance en el cumplimiento de los objetivos pueda expresarse a través de un valor único.

3 Aplicación de un marco de gestión del desempeño en México

3.1 Situación actual

En México, la discusión sobre el desempeño de las carreteras federales se ha centrado en la modificación de los niveles de servicio existentes para el IRI, así como en la creación de nuevos niveles de servicio para otras medidas técnicas del estado de los activos carreteros.

De acuerdo con lo visto en el capítulo 2, la definición de niveles de servicio constituye la última fase del desarrollo de un marco de gestión del desempeño, de modo que la sola modificación de umbrales, sin transitar por las fases previas, equivale a establecer niveles de servicio al margen del contexto institucional, lo que puede limitar seriamente la posibilidad de la organización para el logro de metas referidas a esos niveles.

Los niveles de servicio actualmente en uso y los que se pretende añadir, comprenden esencialmente dos atributos de los servicios carreteros: la capacidad funcional y los aspectos económicos. Tomando en cuenta la complejidad inherente a la gestión del desempeño, se estima que las dependencias que tienen a su cargo la gestión de carreteras federales deberían abordar el desarrollo de un marco de gestión del desempeño de manera gradual, considerando en una primera etapa los atributos antes mencionados.

3.2 Capacidad funcional

En lo que se refiere a la capacidad funcional, aunque este aspecto se considera de manera indirecta en documentos como el Manual de Organización de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la SCT y los informes anuales de CAPUFE, en realidad no existen objetivos institucionales que se refieran específicamente a este atributo. Con base en lo anterior, podría tomarse el ejemplo dado en el inciso 2.5 como punto de partida para la definición de un objetivo institucional relativo a la capacidad funcional, es decir:

Proporcionar a los usuarios un recorrido con el mayor nivel de confort posible, tomando en cuenta sus expectativas

Es claro que el indicador relativo al porcentaje de la longitud de la red en estado *bueno* y *aceptable* que actualmente utiliza la DGCC, el cual se calcula a partir del IRI, podría aplicarse para medir el desempeño de la red federal con respecto a la capacidad funcional. Sin embargo, para enfatizar el atributo del servicio que se

evalúa a través del IRI, sería recomendable cambiar la denominación de esta medida a “porcentaje del recorrido con un nivel de confort bueno y aceptable (o regular)”.

Otra medida del confort que puede ser muy relevante es la opinión directa de los usuarios, obtenida a través de encuestas al lado del camino. En este sentido, la DGCC realiza este tipo de encuestas desde el año 2010, abarcando distintos rubros del desempeño de la red libre. Cabe mencionar que, además de la regularidad, el rubro *confort* incluye las características *estado superficial* y *baches*, las cuales también podrían incluirse en la definición de medidas de usuario y técnicas que describan el desempeño en lo referente a la capacidad funcional.

3.3 Aspectos económicos

El IRI, el conjunto de deterioros superficiales y las deflexiones del pavimento constituyen medidas de desempeño técnicas que, como se ha mencionado anteriormente, están destinadas principalmente al consumo interno de las administraciones de carreteras. Sin embargo, estas medidas proporcionan información muy útil para la formulación de estrategias de conservación orientadas al logro de objetivos de índole económica, por lo que se considera que deberían formar parte del conjunto de medidas de desempeño definidas en este ámbito. Uno de los objetivos institucionales relacionado con estos aspectos podría ser similar al también presentado como ejemplo en el inciso 2.5, es decir:

Garantizar que las inversiones en proyectos de conservación y mejora de carreteras produzcan los mayores beneficios a los usuarios, de acuerdo con los recursos disponibles.

Además de estas medidas técnicas, deberían considerarse medidas de usuario de tipo económico, como el beneficio marginal de la inversión.

Dentro del mismo rubro de los aspectos económicos, con mucha frecuencia se hace referencia a la infraestructura carretera como un medio para aumentar la competitividad de los países. Así, se podría formular un objetivo institucional adicional en los siguientes términos

Minimizar los sobrecostos de los usuarios debidos al estado físico y a las condiciones de operación de las carreteras en los corredores viales con mayor importancia económica.

Una medida de desempeño para este objetivo podría ser el costo de operación vehicular promedio anual por kilómetro. En la Figura 3.1 se agrupan los elementos de este bosquejo inicial de un marco para la gestión del desempeño de la red federal de carreteras.

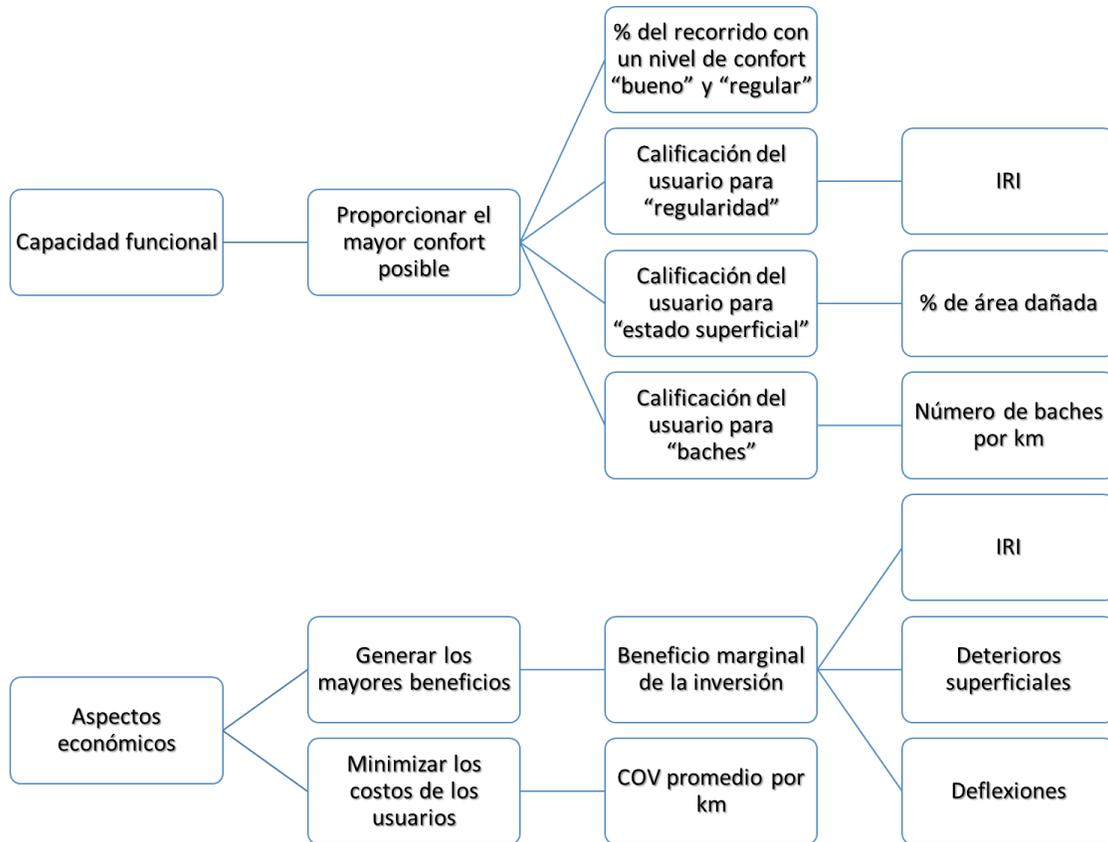


Figura 3.1. Bosquejo inicial de un marco para la gestión del desempeño de la red federal de carreteras.

3.4 Niveles de servicio y metas

El problema de la definición de niveles de servicio y metas para las medidas de desempeño implica, o bien calcular los recursos necesarios para lograr ciertas metas, o bien identificar las metas que pueden alcanzarse dado un monto de recursos previamente definido. La metodología presentada en este trabajo utiliza un enfoque mixto en el que, en primera instancia, se calculan los flujos presupuestales necesarios para lograr las metas deseadas en un periodo preestablecido y, más adelante, se determina la manera en la que la presencia de restricciones presupuestales puede afectar la consecución de estas metas. En el capítulo 4 se presentan los detalles de la metodología propuesta, la cual se complementa con el ejemplo de aplicación que se describe en el capítulo 5.

4 Descripción de la metodología propuesta

La metodología que se presenta a continuación se encuentra vinculada con los siguientes objetivos institucionales definidos en el capítulo anterior:

Proporcionar a los usuarios un recorrido con el mayor nivel de confort posible, tomando en cuenta sus expectativas (capacidad funcional).

Garantizar que las inversiones en proyectos de conservación y mejora de carreteras produzcan los mayores beneficios a los usuarios, de acuerdo con los recursos disponibles (aspectos económicos).

En relación con el primer objetivo, en este trabajo se propone utilizar el análisis de estrategias del HDM-4, a fin de optimizar los programas de obra empleando como función objetivo la maximización de la reducción del IRI al menor costo, la cual solo se encuentra disponible en este tipo de análisis. Cabe mencionar que el análisis de estrategias resulta el más apropiado para la implementación de la metodología, ya que la revisión de metas de desempeño es un asunto relacionado con las políticas de las organizaciones de carreteras.

Asimismo, con referencia a los beneficios para los usuarios, dado que la adopción de nuevos niveles de servicio es una decisión que afecta la gestión de las carreteras a nivel de red, la rentabilidad de las inversiones debe evaluarse a este mismo nivel, y no a nivel de proyecto.

Se hace notar que, en relación con el diagrama de la Figura 3.1, esta metodología solo toma en cuenta las medidas denominadas *% del recorrido con un nivel de confort "bueno" y "regular"* para el primer objetivo institucional, y *beneficio marginal de la inversión* para el segundo.

El procedimiento propuesto consta de los siguientes pasos principales: preparación de datos, definición del análisis de estrategias del HDM-4, generación del programa de obra sin restricciones, obtención de escenarios presupuestales restringidos y análisis de resultados.

4.1 Preparación de datos

Supone la recopilación y procesamiento de los siguientes elementos de información:

- *Red de carreteras.* Siguiendo las directrices para la realización de análisis de estrategias con el HDM-4, la red de carreteras se representa mediante la

agrupación en familias de tramos con valores similares de atributos clave, es decir, parámetros de diseño geométrico, tipo y estado del pavimento, volumen y composición del tránsito, y datos medioambientales.

- *Flota vehicular.* Colección de vehículos representativos que circulan por la red de carreteras. Para cada vehículo, es necesario especificar una serie de características físicas y costos de unitarios. El HDM-4 utiliza esta información para calcular los costos de operación vehicular y otros costos para el usuario de la carretera, además de los indicadores de rentabilidad para las alternativas de inversión consideradas.
- *Estándar de IRI.* Conjunto de niveles de servicio expresados en términos del IRI y definidos con el propósito de calificar el desempeño de los tramos de carretera, mediante una escala del tipo *bueno-regular-malo*. El estándar contiene también los umbrales de IRI utilizados como referencia para desencadenar la ejecución de obras de conservación periódica o reconstrucción.
- *Estándar de conservación.* Catálogo de obras, con los siguientes datos vinculados: parámetros de diseño, criterios de intervención, costos unitarios y efectos de los trabajos. Los criterios de intervención son equivalentes a los umbrales definidos como parte de los estándares de IRI. En esta metodología solo se consideran dos estándares de conservación: mantenimiento de rutina y conservación periódica.
- *Datos de configuración.* Datos complementarios necesarios para llevar a cabo el análisis con el HDM-4. Comprenden información sobre la distribución horaria del tránsito, la capacidad de la carretera, las tasas de accidentalidad y las zonas climáticas. Muchos de los datos anteriores son irrelevantes para el tipo de análisis considerados en la metodología, por lo que se utilizan valores por defecto del HDM-4 en la mayoría de los casos.

4.2 Definición del análisis de estrategias del HDM-4

El HDM-4 permite realizar tres tipos de análisis: de proyectos, de programas y de estrategias. Como se mencionó al inicio del capítulo, el análisis de estrategias resulta el más adecuado para implementar la metodología propuesta, ya que su propósito específico es la evaluación de opciones de inversión a nivel de red, en el mediano y largo plazo, empleando datos agregados.

Para ejecutar el análisis de estrategias, se debe proporcionar la siguiente información adicional:

- Función objetivo para la optimización presupuestal. Las opciones disponibles son: maximizar el valor presente neto, maximizar la mejora del IRI y minimizar el costo para un objetivo de IRI. Puesto que el presente estudio se basa en

el logro del mejor desempeño para los recursos disponibles, se ha seleccionado la segunda opción.

- Parámetros para el análisis económico: año de inicio, periodo de análisis y tasa de actualización. Actualmente, las evaluaciones de proyectos de inversión en el país se efectúan con una tasa de actualización del 10 %.
- Tramos del análisis, que corresponden a las longitudes de carretera resultantes de la agregación de tramos individuales, según se señala en el inciso 4.1.
- Alternativas de intervención. Una alternativa de intervención del HDM-4 consiste en un conjunto de estándares de conservación cuya aplicación se inicia en un año dado. Como se mencionó anteriormente, la metodología solo considera dos estándares de conservación: mantenimiento de rutina y conservación periódica. A partir de estos, se pueden definir inicialmente dos alternativas: una *alternativa base* para el mantenimiento rutinario y una *alternativa de proyecto* para la conservación periódica. Sin embargo, si se difiere el año de inicio del estándar de conservación periódica en incrementos de un año, es posible definir un total de alternativas igual al periodo de análisis más uno, como se muestra en el inciso 5.3.1. Al definir las alternativas de esta manera, una intervención no seleccionada en un año dado por falta de recursos, puede aplicarse en otro año cualquiera durante el análisis de los escenarios presupuestales restringidos, siempre y cuando se disponga de los fondos suficientes.

4.3 Generación del programa de obra sin restricciones

La realización del análisis de estrategias del HDM-4 produce un listado de obras (con sus correspondientes costos) programadas de modo que nunca se rebasen los umbrales de IRI especificados en el estándar de conservación periódica. Esta relación se denomina *programa de obra sin restricciones* porque no considera ninguna limitación presupuestal.

Usualmente, cuando los nuevos niveles de servicio son más exigentes que los niveles actuales, el programa de obra sin restricciones tiende a concentrar obras (y, consecuentemente, necesidades de recursos) en los primeros años del periodo de análisis.

La generación del programa de obra sin restricciones se basa en los modelos de deterioro del HDM-4, los cuales predicen la evolución del IRI en el tiempo y permiten aplicar los trabajos según los umbrales especificados en los estándares de conservación.

4.4 Obtención de escenarios presupuestales restringidos

Dentro del HDM-4, los escenarios restringidos se especifican mediante *periodos presupuestales*, definidos como parejas de periodos de tiempo (con formato de año inicial – año final) y montos de recursos disponibles para cada periodo.

Quizá la mejor manera de representar la práctica actual para la elaboración de presupuestos de conservación en México sea a través de periodos anuales, con un monto de recursos más o menos igual para todos los años. Puesto que el presupuesto se encuentra siempre limitado en los escenarios restringidos, el principal producto de esta parte del análisis es el desempeño resultante de la red de carreteras.

4.5 Análisis de resultados

La factibilidad de cada escenario restringido puede determinarse a partir del monto de recursos involucrado y del correspondiente desempeño de la red. Una vez que se ha obtenido un escenario que pueda considerarse factible, las metas de desempeño se establecen utilizando como referencia el estándar de IRI empleado para generar ese escenario en particular.

Cuando no exista una solución aceptable en primera instancia o cuando sea necesario optimizar una solución dada, el análisis puede aplicarse iterativamente, utilizando diferentes combinaciones de estándares de IRI y periodos presupuestales.

En lo que sigue, se presenta un ejemplo de aplicación basado en datos de la red federal de carreteras en el que se consideran tres estándares de IRI. En el inciso 5.2, se proporcionan detalles sobre los datos utilizados y sobre su procesamiento. El inciso 0 contiene una descripción de los programas de obra sin restricciones generados para cada uno de los estándares de IRI. Más adelante, en el inciso 5.4, se introducen las restricciones presupuestales a través de tres escenarios correspondientes a diferentes niveles de disponibilidad de recursos. Estos escenarios se aplican a cada uno de los estándares de IRI, lo que produce nueve diferentes programas de obra con restricciones.

5 Ejemplo de aplicación

5.1 Planteamiento del problema

Supóngase que se desean evaluar los estándares de IRI definidos en la Tabla 5.1. De acuerdo con lo descrito en el inciso 4.1, la especificación de un estándar de IRI comprende un conjunto de niveles de servicio que definen calificaciones de desempeño empleando una escala *bueno-regular-malo*. Cada estándar contiene también umbrales para la ejecución de obras de conservación periódica, elegidos de manera que la calificación del desempeño no llegue al nivel de servicio caracterizado como *malo*. Asimismo, los estándares de IRI están vinculados con los estándares de conservación periódica que se definen en el inciso 5.2.3.

Tabla 5.1. Estándares de IRI.

Nombre	Nivel de servicio (IRI, m/km)			Umbrales de intervención (IRI, m/km)	
	Bueno	Regular	Malo	Conservación periódica	Reconstrucción
Estándar 1	≤ 2.5	2.5 – 3.5	> 3.5	3.0	4.5
Estándar 2	≤ 2.0	2.0 – 3.0	> 3.0	2.5	4.0
Estándar 3	≤ 1.5	1.5 – 2.5	> 2.5	2.0	3.5

Para cada estándar considerado se desea:

- Conocer el presupuesto anual necesario para mejorar el desempeño de la red tan pronto como sea posible, de modo que el 100 % de las carreteras se encuentre en un nivel de servicio bueno o regular y se mantenga así por un periodo de doce años.
- Describir el desempeño general de la red.
- Obtener un escenario presupuestal definido de manera que el presupuesto sin restricciones calculado para los primeros seis años se distribuya en asignaciones anuales de igual monto. Eliminar las restricciones presupuestales a partir del año siete.
- Obtener dos escenarios presupuestales adicionales con el 75 y el 50 % del total del presupuesto de los primeros seis años, distribuido también en asignaciones anuales de igual monto. Como en el caso anterior, no considerar restricciones a partir del año siete.

- e) Determinar las consecuencias en términos presupuestales y de desempeño de la red de los escenarios con presupuesto restringido, especialmente en lo que corresponde al segundo subperiodo sexenal.

Con el uso de un periodo de análisis de doce años y su división en dos subperiodos sexenales, se busca evaluar las consecuencias que las decisiones tomadas por una determinada administración federal podrían tener para la gestión de la red durante la siguiente administración.

5.2 Datos de entrada

5.2.1 Red de carreteras

Para este ejemplo se utilizó una red de carreteras generada a partir de un subconjunto de la red federal de autopistas de cuota, dada la mayor disponibilidad de datos para esta parte de la red. El subconjunto seleccionado contiene autopistas de cuatro carriles, las cuales comprenden la mayor porción de las autopistas existentes. La información utilizada corresponde al año 2010, y cubre 4,680 km de calzadas separadas de dos carriles.

Los datos originales se agregaron empleando los siguientes atributos: IRI, TDPA, deflexión central medida con FWD (D_0) y precipitación media mensual (PPM). Para cada atributo se definieron niveles identificados con las etiquetas *bajo*, *medio* y *alto*, a los que se asignó un valor representativo según lo mostrado en la Tabla 5.2. La combinación de atributos y niveles produjo un total de 81 tramos con datos agregados, de los cuales solo 47 resultaron con una longitud de carretera mayor a cero.

Tabla 5.2. Atributos para la agregación de datos.

Atributo	Nivel del atributo (valor representativo)		
	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>
IRI (m/km)	< 2.00 (1.80)	2.00 – 3.50 (2.60)	> 3.50 (3.90)
TDPA	< 5000 (3,150)	5000 – 15,000 (7,450)	> 15,000 (19,200)
D_0 (mm)	< 0.250 (0.195)	0.250 – 0.500 (0.375)	> 0.500 (0.720)
PPM (mm)	< 50 (20)	50 – 135 (80)	> 135 (180)

Para los atributos de la carretera no incluidos en la Tabla 5.2 se utilizaron valores por defecto, elegidos en función de los niveles de tránsito, IRI y D_0 .

5.2.2 Flota vehicular

La flota vehicular se definió a partir de los siete tipos de vehículo considerados en los aforos de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, ya que, además de que solo se cuenta con información sobre el volumen y composición vehicular para esos tipos de vehículo, el Instituto Mexicano del Transporte ha recopilado la mayoría de los datos de la flota vehicular requeridos por el HDM-4 para esos mismos

tipos (Arroyo, et al., 2014). La Tabla 5.3 muestra los tipos y descripciones de los vehículos que integran la flota empleada en el análisis.

Tabla 5.3. Flota vehicular empleada en el análisis.

Tipo de vehículo	Descripción
A	Vehículo ligero
B3	Autobús de tres ejes
C2	Camión de dos ejes
C3	Camión de tres ejes
T3-S2	Camión articulado con un remolque y cinco ejes
T3-S3	Camión articulado con un remolque y seis ejes
T3-S2-R4	Camión articulado con doble remolque y nueve ejes

5.2.3 Estándares de conservación

En general, la colección de estándares de conservación fue integrada de manera que, en cualquier año, el HDM-4 pudiera seleccionar, o bien un estándar de mantenimiento rutinario, o bien uno de conservación periódica. Sin embargo, es necesario mencionar que se crearon instancias separadas del estándar de conservación periódica, a fin de contar con estándares apropiados para cada uno de los estándares de IRI. Lo anterior dio como resultado un catálogo con un total de cuatro estándares de conservación.

Los estándares de conservación periódica incluyen los siguientes trabajos:

- Mantenimiento de rutina.
- Fresado y reemplazo de carpeta.
- Reconstrucción del pavimento.

Como una variante adicional, se formularon especificaciones separadas de los trabajos de fresado y reemplazo y de reconstrucción para tomar en cuenta los tres diferentes niveles de tránsito considerados en la generación de la red agregada de carreteras. El esquema general de la colección de estándares de conservación se concentra en la Tabla 5.4.

En esta tabla, el espesor de mezcla asfáltica y el costo unitario (trabajos de fresado y reemplazo y de reconstrucción) dependen tanto del estándar de conservación como del nivel de tránsito. La Tabla 5.4 muestra también que los efectos de los trabajos son diferentes para los tres estándares de conservación periódica.

Tabla 5.4. Esquema general de la colección de estándares de conservación.

Nombre del estándar	Trabajos	Espesor de CA (mm)	Costo unitario (\$/m ²)	Intervención	Efectos (IRI, m/km)
Rutina	Bacheo	NA	118	Anual	NA
	Sellado de grietas	NA	56	Anual	NA
Estándar 1	Bacheo	NA	118	Anual	NA
	Sellado de grietas	NA	56	Anual	NA
	Fresado y reemplazo (3)	70 a 150	223 a 335	IRI ≥ 3.5	2.0
	Reconstrucción (3)	70 a 150	343 a 515	IRI ≥ 5.5	1.5
Estándar 2	Bacheo	NA	118	Anual	NA
	Sellado de grietas	NA	56	Anual	NA
	Fresado y reemplazo (3)	70 a 150	246 a 318	IRI ≥ 3.0	1.75
	Reconstrucción (3)	70 a 150	378 a 567	IRI ≥ 4.5	1.25
Estándar 3	Bacheo	NA	118	Anual	NA
	Sellado de grietas	NA	56	Anual	NA
	Fresado y reemplazo (3)	70 a 150	268 a 402	IRI ≥ 2.5	1.25
	Reconstrucción (3)	70 a 150	412 a 618	IRI ≥ 3.5	1.0

5.3 Programa de obra sin restricciones

5.3.1 Definición de alternativas y ejecución del análisis con el HDM-4

Los estándares de IRI definidos en el inciso 5.1 se evaluaron mediante análisis de estrategias separados. Utilizando el estándar de mantenimiento rutinario y el de conservación periódica correspondientes a cada estándar de IRI, se creó un conjunto de 13 alternativas de intervención para cada análisis, como se explica a continuación.

En primer lugar, se definió una *alternativa base* a partir del estándar de mantenimiento rutinario, con un año de inicio igual al del comienzo del periodo de análisis, esto es, 2016. Enseguida, se añadió un grupo de doce *alternativas de proyecto*, asignando a cada una el estándar de conservación periódica con diferentes años de inicio, desde 2016 hasta el año final del periodo.

En las alternativas de proyecto con año de inicio posterior a 2016 se incluyó también el estándar de mantenimiento de rutina, efectivo desde el comienzo del periodo. El propósito de esta asignación adicional fue cubrir el periodo que va desde 2016 hasta el año de aplicación del estándar de conservación periódica. Como se indicó en el inciso 4.2, esta manera de definir las alternativas busca proporcionar opciones adicionales para que los trabajos sean seleccionados durante el análisis de escenarios presupuestales restringidos. La Tabla 5.5 resume la definición de alternativas antes descrita.

Tabla 5.5. Definición de alternativas.

Alternativa	Asignaciones de estándares de conservación	
	Estándar	Año de inicio
Alternativa base	Rutina	2016
Alternativa de proyecto - 2016	Periódica	2016
Alternativa de proyecto - 2017	Rutina	2016
	Periódica	2017
Alternativa de proyecto - 2018	Rutina	2016
	Periódica	2018
(...)	(...)	(...)
Alternativa de proyecto - 2027	Rutina	2016
	Periódica	2027

El conjunto de alternativas fue, a su vez, asignado a cada uno de los tramos de la red de carreteras preparada para el estudio. Completado este paso, se ejecutaron los análisis de estrategias correspondientes a cada estándar de IRI. De estos análisis resultaron los programas de obra sin restricciones, cuyas necesidades de presupuesto y efectos en el desempeño de la red se examinan en los siguientes incisos.

5.3.2 Necesidades presupuestales por estándar de IRI

El HDM-4 ensambla los programas de obra sin restricciones a partir de los trabajos definidos en los estándares de conservación. En este ejemplo en particular, los trabajos pueden haberse extraído, o bien del estándar de mantenimiento rutinario, o bien del de conservación periódica. La elección depende de la contribución de cada tipo de trabajos al mejoramiento del IRI, minimizando a la vez los costos para la entidad responsable.

Los programas sin restricciones incluyen los costos unitarios y las cantidades de obra, de manera que es posible calcular el presupuesto de cada programa. La Tabla 5.6 contiene la estimación de los recursos anuales necesarios para llevar a la práctica el programa de obra sin restricciones correspondiente a cada estándar de IRI. Estos mismos resultados se representan en la Figura 5.1. La Figura 5.2 muestra los presupuestos totales calculados, junto con los recursos estimados para el primer año.

Como lo indica la Tabla 5.1, el *Estándar 3* representa el estándar de IRI con el nivel de desempeño más alto. Aunque este hecho se refleja en el costo total, el impacto más notorio ocurre sobre el presupuesto correspondientes al primer año del periodo de análisis, lo que pone de manifiesto las diferencias entre el nivel de desempeño actual y el representado por el *Estándar 3*.

Con respecto al *Estándar 2*, el costo total de ejecución es comparable al del *Estándar 3*, al igual que la relación del monto requerido en el primer año con respecto al monto total.

Tabla 5.6. Necesidades anuales de presupuesto (millones de pesos).

Año	Estándar 1	Estándar 2	Estándar 3
2016	620.931	6899.110	7700.909
2017	261.442	215.896	800.268
2018	2314.209	0.000	902.530
2019	1850.473	20.021	635.323
2020	250.430	446.647	0.000
2021	647.390	705.381	153.092
2022	146.185	808.859	329.428
2023	430.478	0.000	360.892
2024	721.321	808.154	28.408
2025	311.402	229.034	525.485
2026	558.176	776.759	644.666
2027	510.138	284.513	415.979
Total	8622.575	11194.371	12496.980

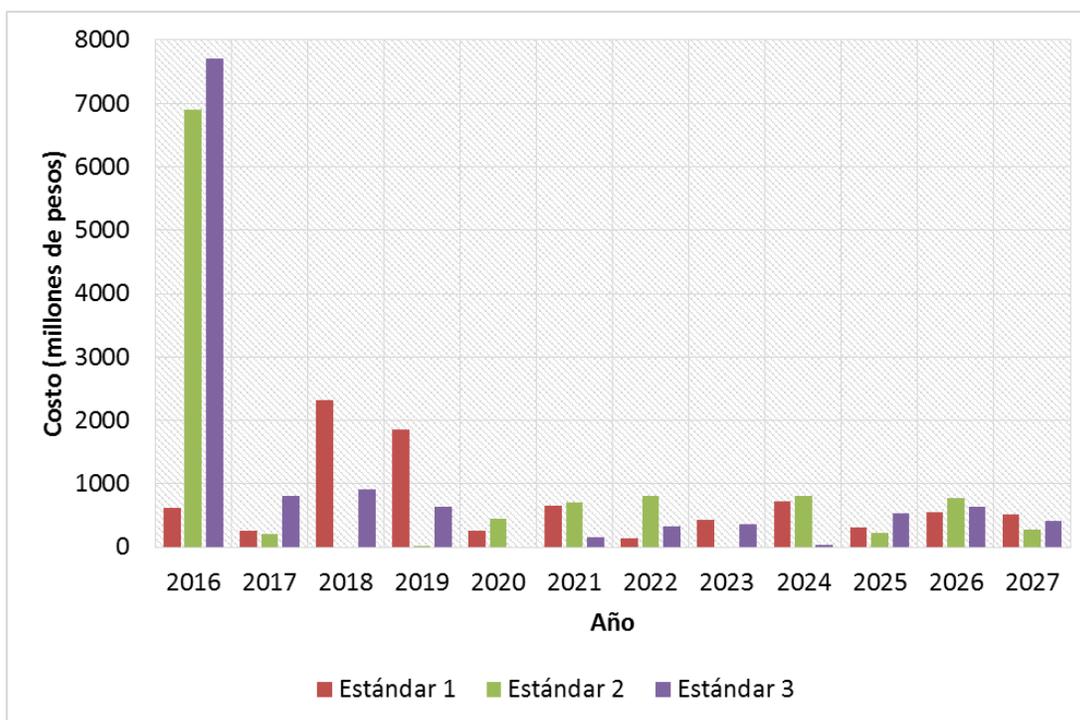


Figura 5.1. Necesidades anuales de presupuesto

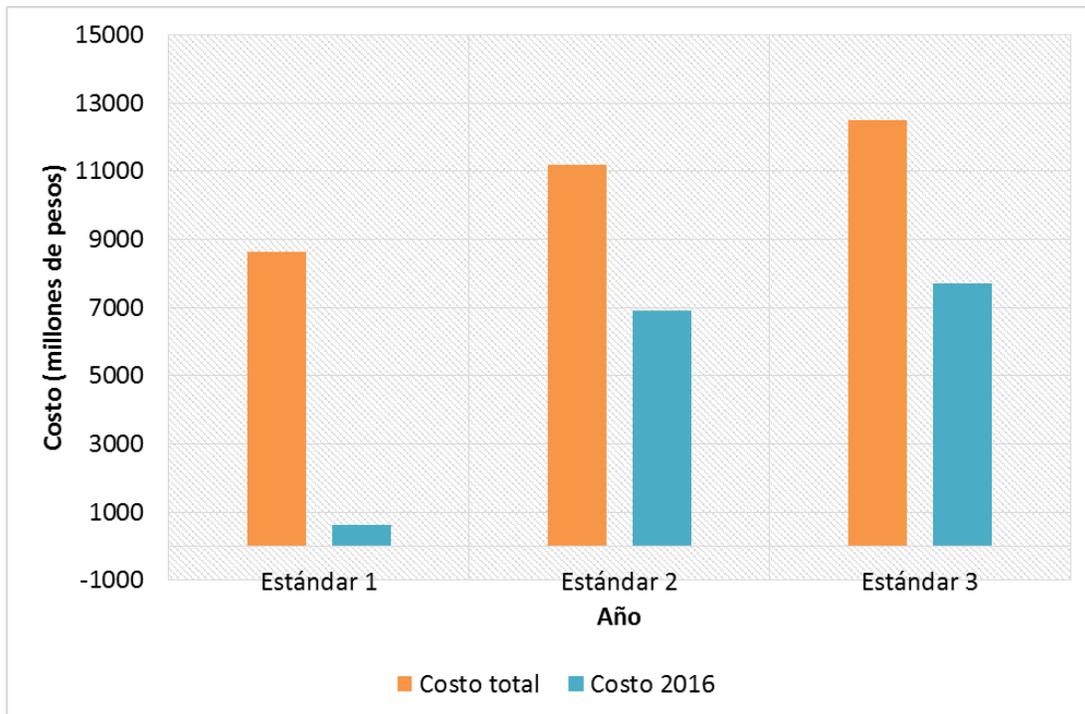


Figura 5.2. Presupuestos totales y recursos necesarios en 2016.

5.3.3 Desempeño global de la red

En lo referente a los efectos de los estándares de IRI sobre el desempeño de la red, la Figura 5.3 ilustra la evolución del IRI promedio de la red (ponderado por longitud) para cada estándar. Se proporciona también, como referencia, la tendencia de deterioro vinculada con la alternativa base.

En general, como se observa en la Figura 5.3, un mayor gasto se traduce consistentemente en mejores niveles del IRI promedio de la red. Nótese que estos niveles se mantienen en la vecindad del umbral que define el nivel de servicio establecido como *bueno* para cada estándar de IRI.

5.4 Escenarios presupuestales restringidos

5.4.1 Preparación de los escenarios

En esta parte del análisis se determinaron los efectos de las limitaciones presupuestales definidas en el inciso 5.1, consistentes en la limitación del presupuesto anual durante los primeros seis años a 1/6 del 100 %, el 75 % y el 50 % del presupuesto sin restricciones necesario para implementar los diferentes estándares de IRI durante esos años. Los presupuestos anuales resultantes se identificaron con las etiquetas, *alto*, *medio* y *bajo*, respectivamente.

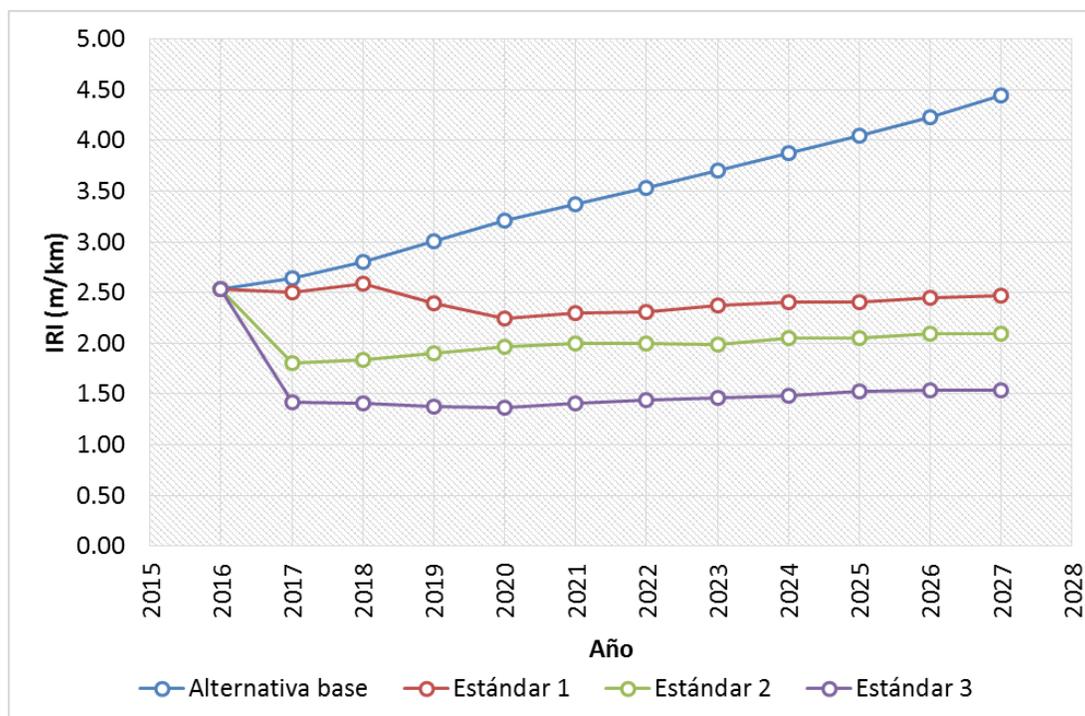


Figura 5.3. Patrones de evolución del IRI para los diferentes estándares de IRI y para la alternativa base.

Como en el caso de los presupuestos sin restricciones, el análisis se llevó a cabo separadamente para cada estándar de IRI. Los resultados relativos a las necesidades presupuestales y el desempeño esperado de la red se examinan en los incisos 5.4.2 y 5.4.3.

5.4.2 Necesidades de recursos por estándar de IRI y escenario presupuestal

Los resultados de las asignaciones presupuestales por escenario para cada estándar de IRI se presentan gráficamente en las Figuras 5.4 a 5.6.

En primera instancia, estas gráficas muestran que, sin importar el estándar de IRI, la distribución del 100 % del presupuesto sin restricciones del primer sexenio a través de asignaciones anuales durante este periodo no tiene consecuencias drásticas sobre los recursos necesarios en el año siete. Este escenario corresponde a la serie de datos identificada con la etiqueta *alto*. Sin embargo, y de nuevo independientemente del estándar de IRI, cuando se restringen los presupuestos anuales, los fondos requeridos después del año seis se incrementan considerablemente, lo que en términos prácticos crea un potencial problema presupuestal para la siguiente administración sexenal.

La ausencia de consecuencias presupuestales drásticas del escenario presupuestal “alto”, sugiere que este escenario siempre debería ser estudiado.

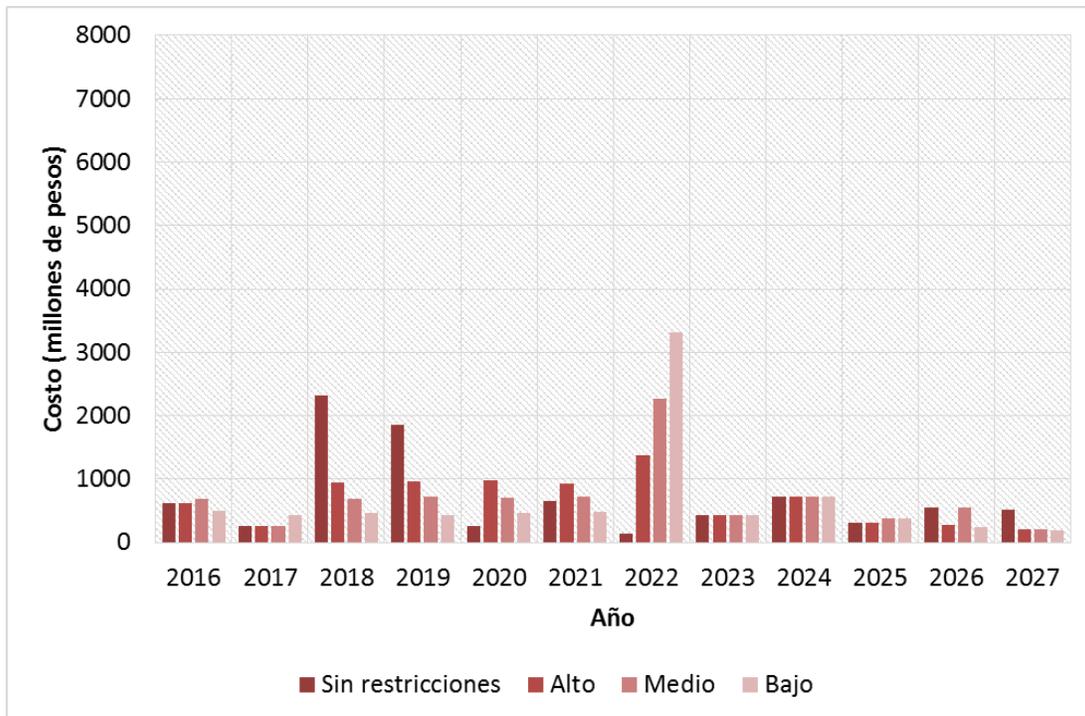


Figura 5.4. Escenarios presupuestales restringidos para el *Estándar 1*.

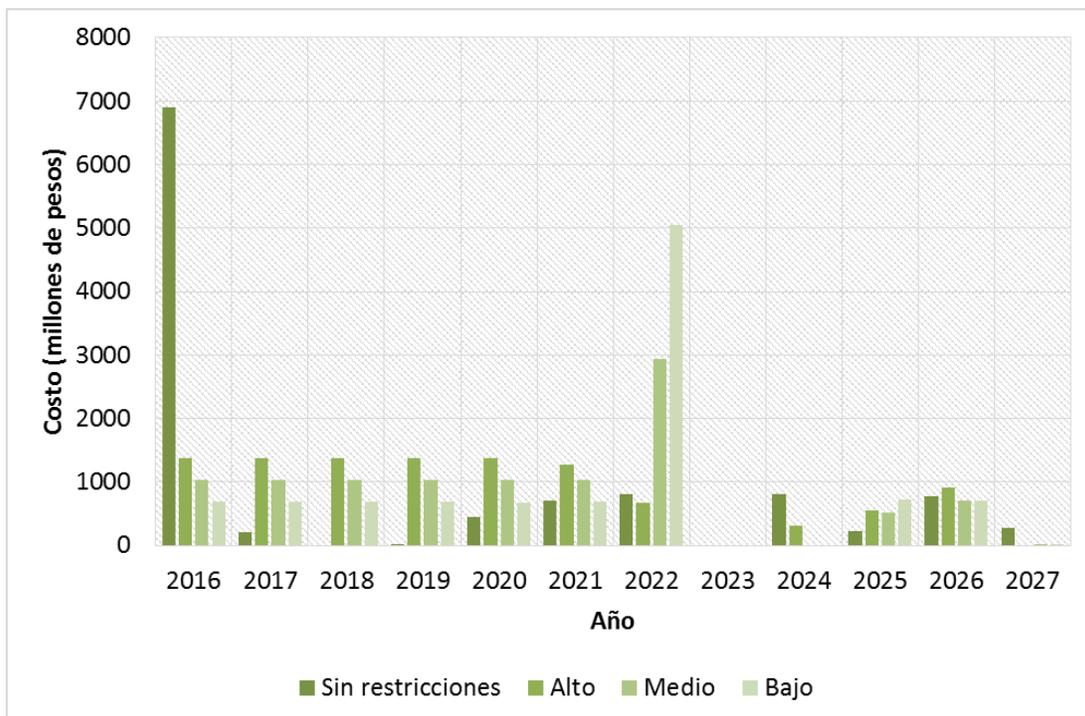


Figura 5.5. Escenarios presupuestales restringidos para el *Estándar 2*.

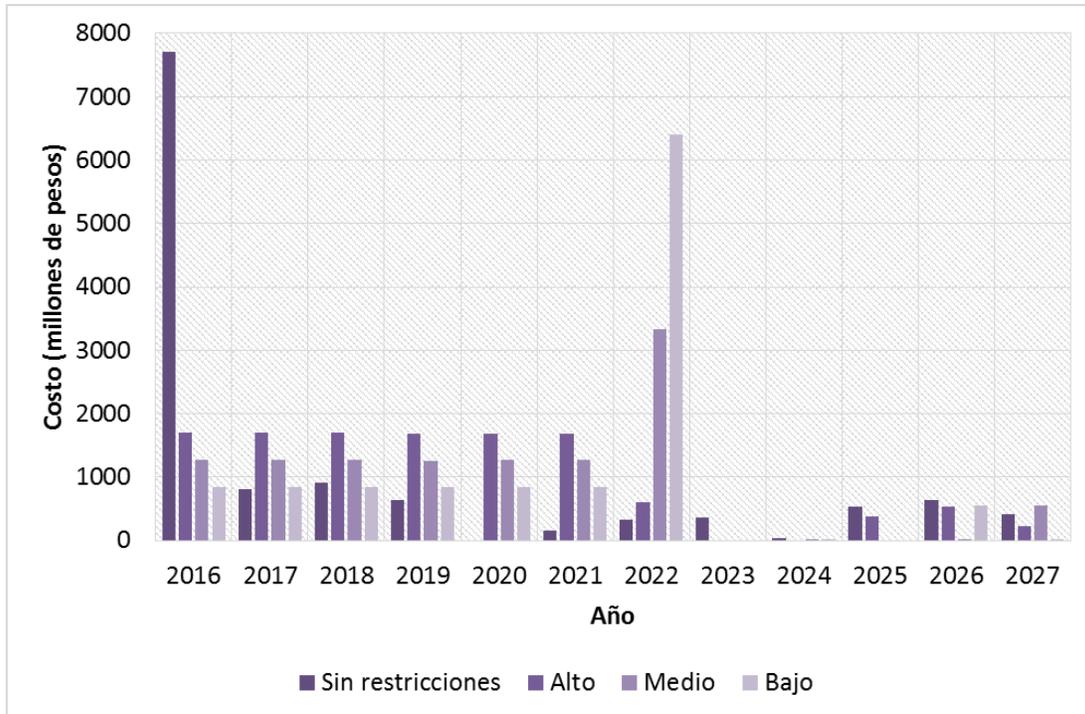


Figura 5.6. Escenarios presupuestales restringidos para el Estándar 3.

5.4.3 Desempeño esperado de la red

Con el propósito de determinar los efectos de los escenarios presupuestales restringidos en el desempeño de la red, se creó un conjunto de gráficas que representan el porcentaje de longitud de la red en estado *bueno*, *regular* y *malo*, de acuerdo con la definición de cada estándar de IRI. Las Figuras 5.7 a 5.18 contienen las gráficas obtenidas para los diferentes estándares. Cuando se comparan las gráficas que corresponden a los escenarios sin restricciones y *alto*, resulta evidente que el periodo de espera necesario para que la red tenga un desempeño *bueno* será mucho más largo si el presupuesto se asigna en forma anual. Sin embargo, es necesario hacer notar que la mejora pronunciada que corresponde al presupuesto sin restricciones, normalmente no es asequible ni técnicamente viable.

Por otro lado, las gráficas correspondientes a los presupuestos *medio* y *bajo* de cada figura muestran que una reducción significativa del presupuesto anual puede conducir a severos problemas de sustentabilidad del enfoque de gestión de carreteras. Como se observa en las gráficas, con estos niveles presupuestales el proceso de mejora de la red se ralentiza e, incluso, se revierte durante los primeros seis años.

Para el año siete, los escenarios con presupuestos *medio* y *bajo* han creado rezagos importantes, que solo pueden ser superados mediante inversiones considerables en el año siete.

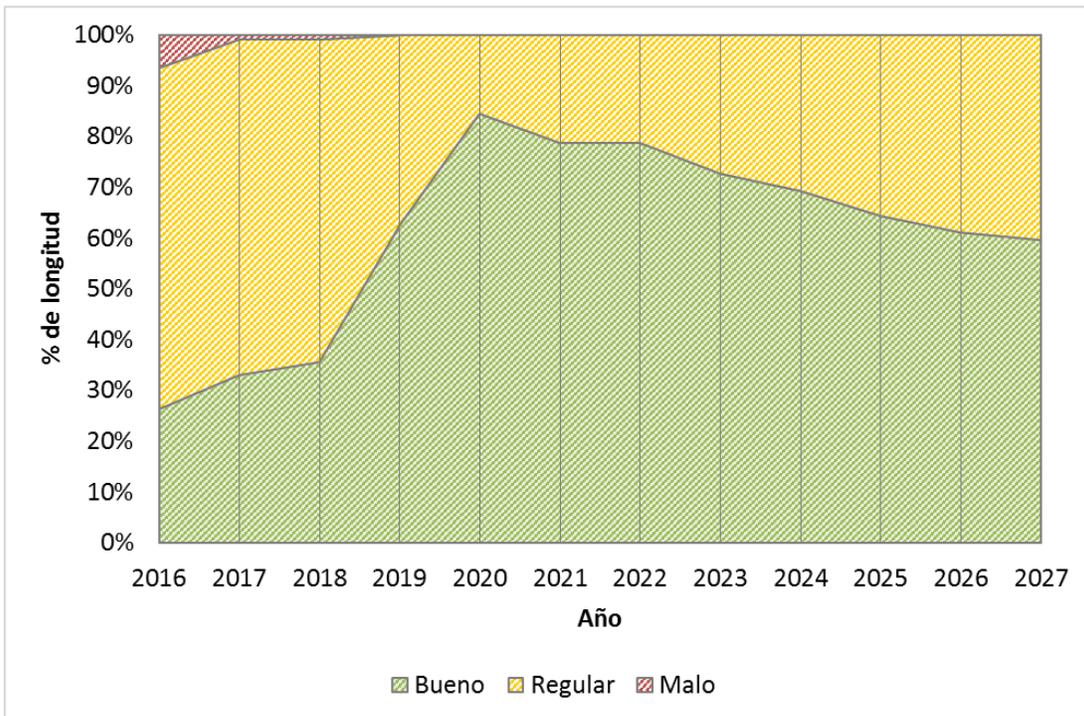


Figura 5.7. Estándar 1, escenario sin restricciones.

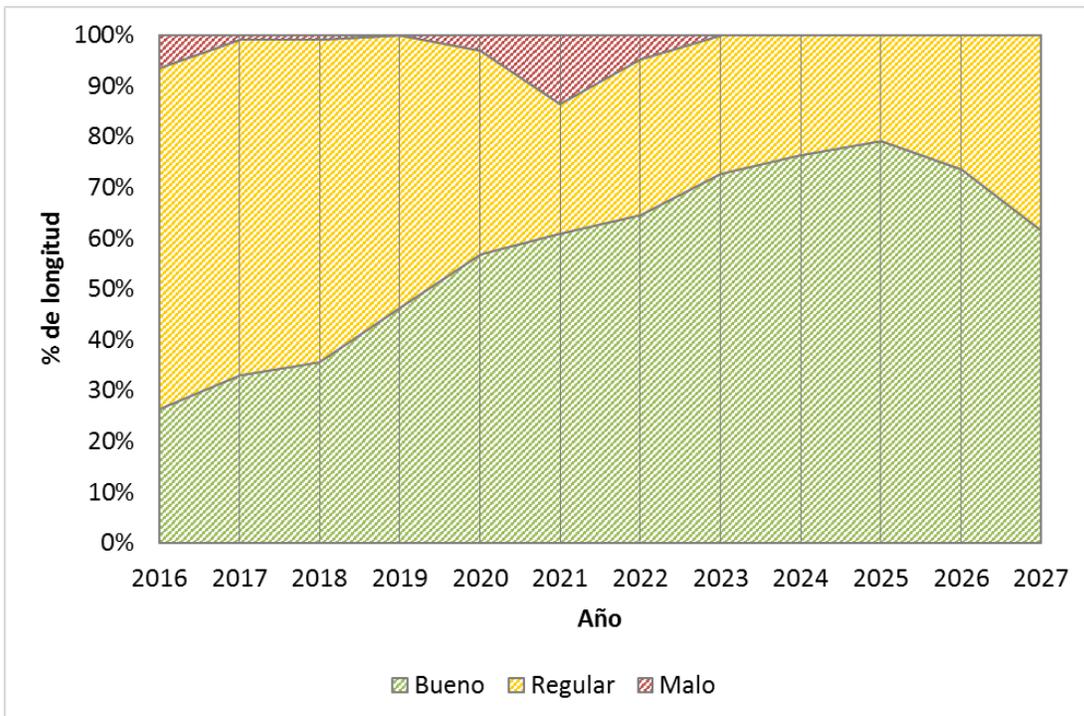


Figura 5.8. Estándar 1, escenario *alto*.

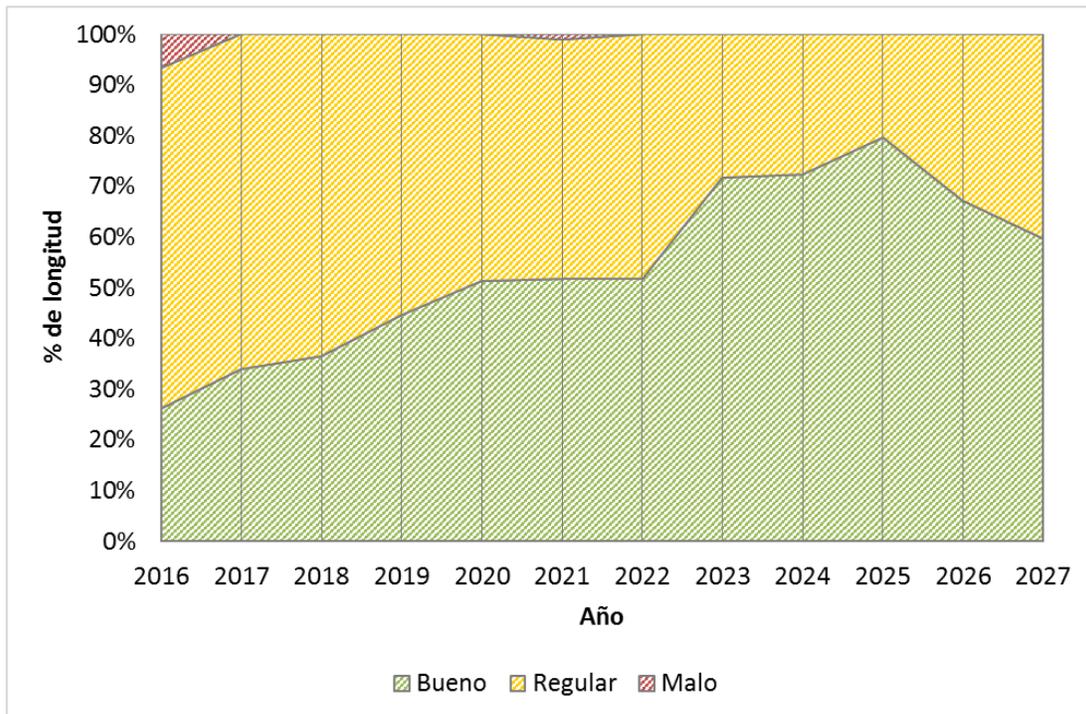


Figura 5.9. Estándar 1, escenario *medio*.

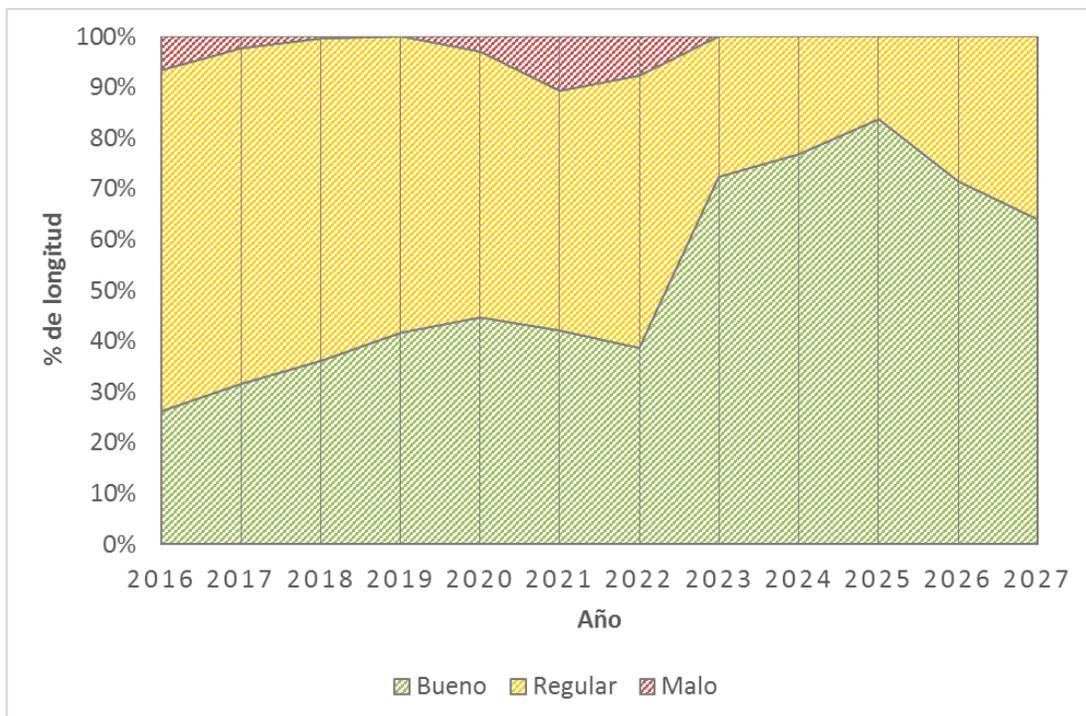


Figura 5.10. Estándar 1, escenario *bajo*.

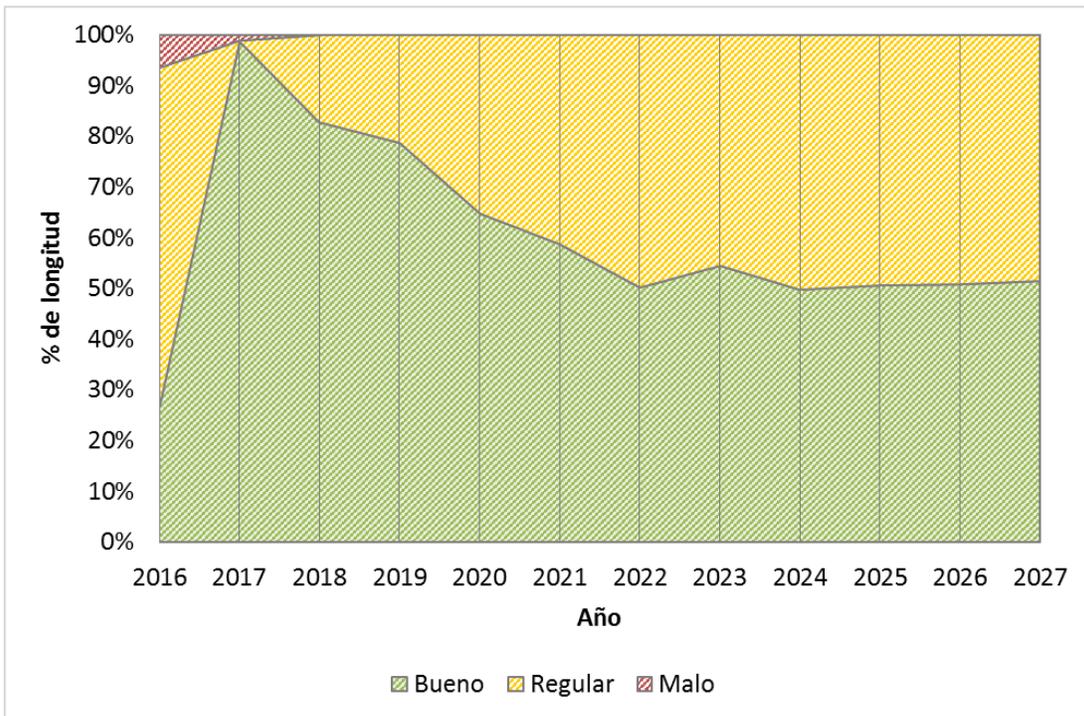


Figura 5.11. Estándar 2, escenario sin restricciones.

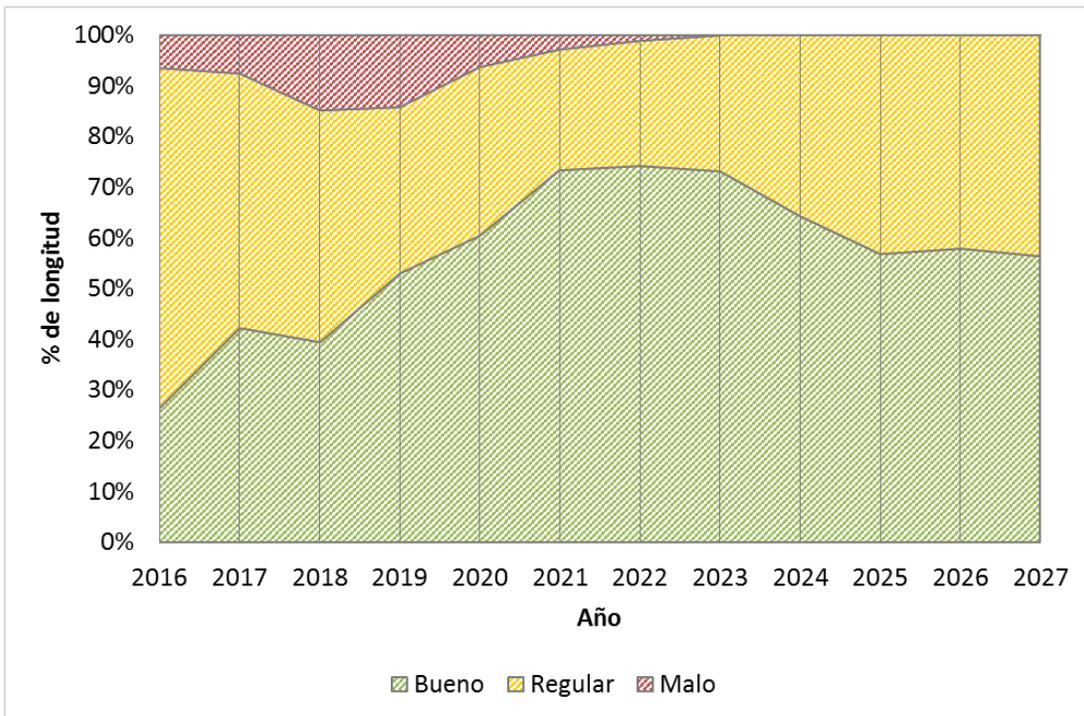


Figura 5.12. Estándar 2, escenario alto.

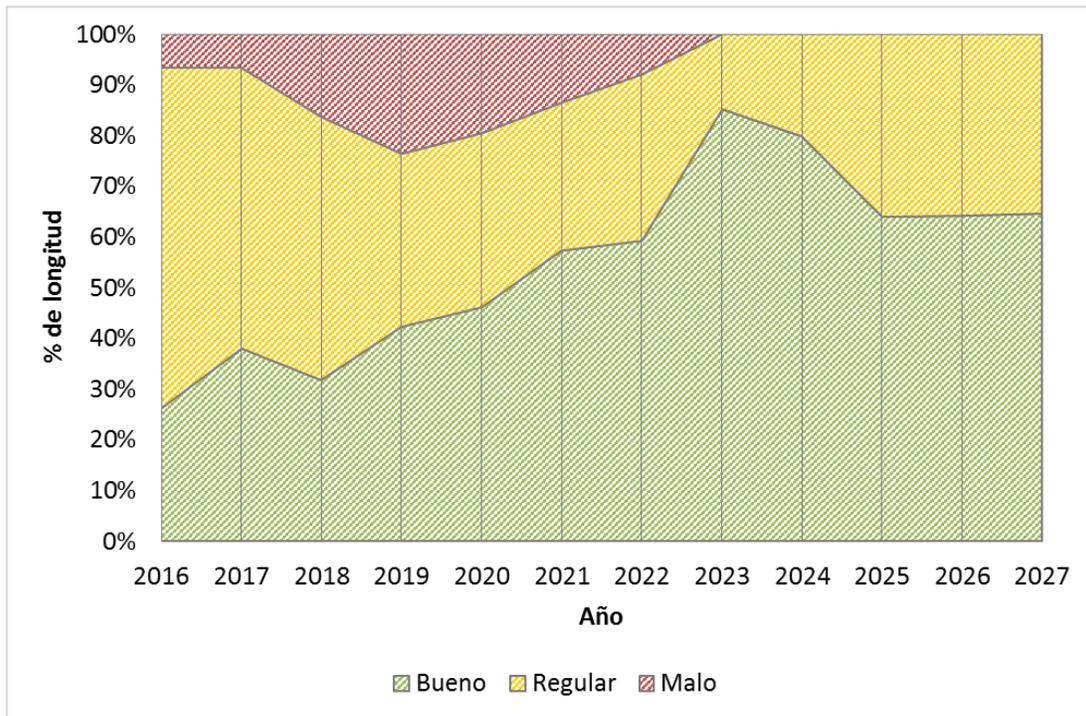


Figura 5.13. Estándar 2, escenario *medio*.

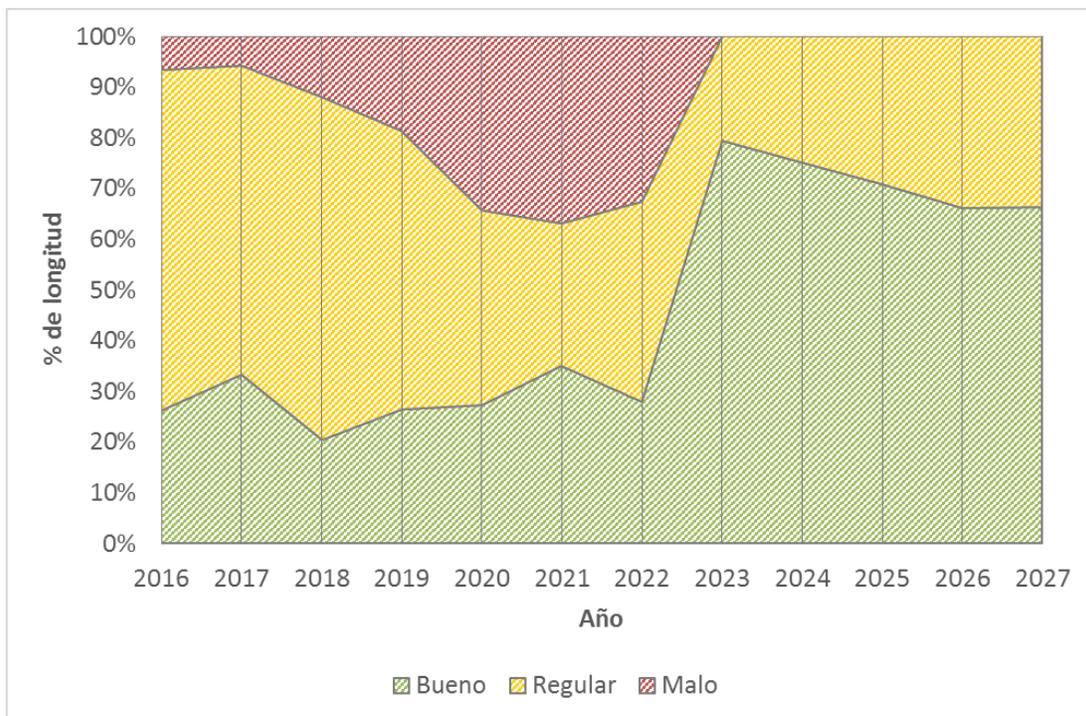


Figura 5.14. Estándar 2, escenario *bajo*.

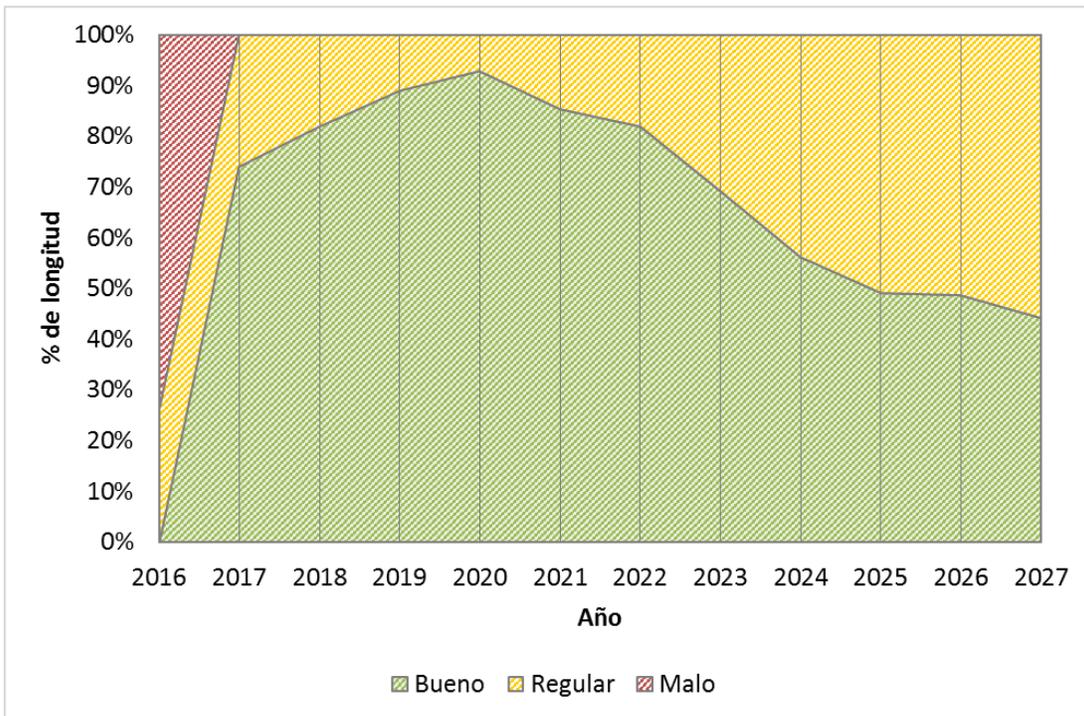


Figura 5.15. Estándar 3, escenario sin restricciones.

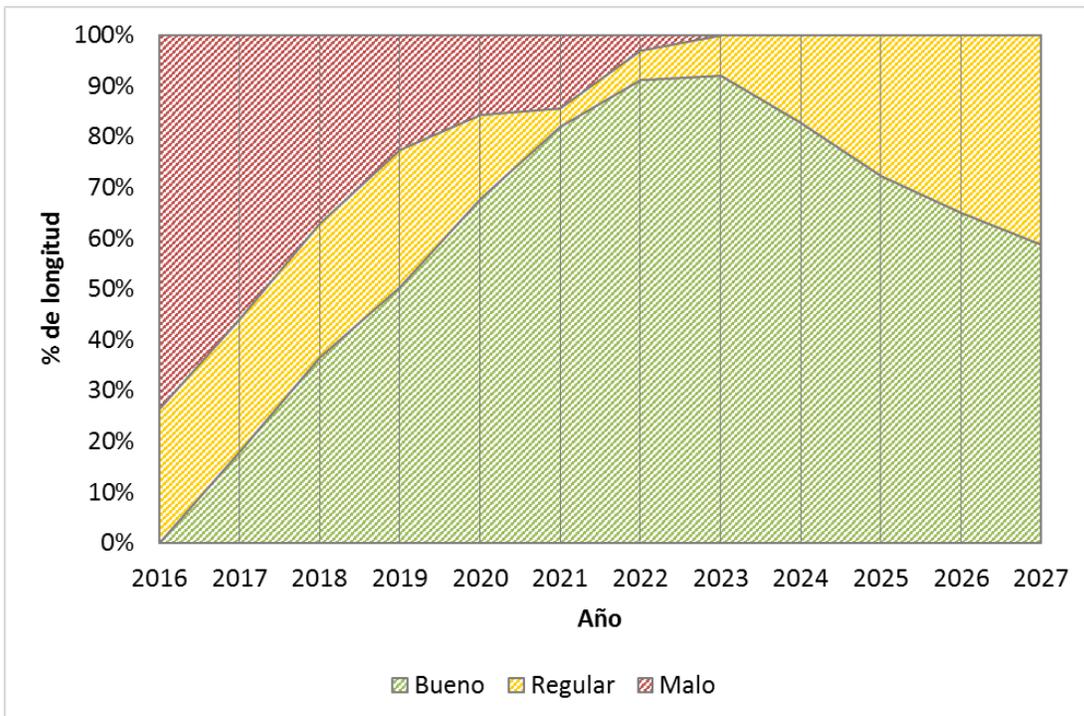


Figura 5.16. Estándar 3, escenario *alto*.

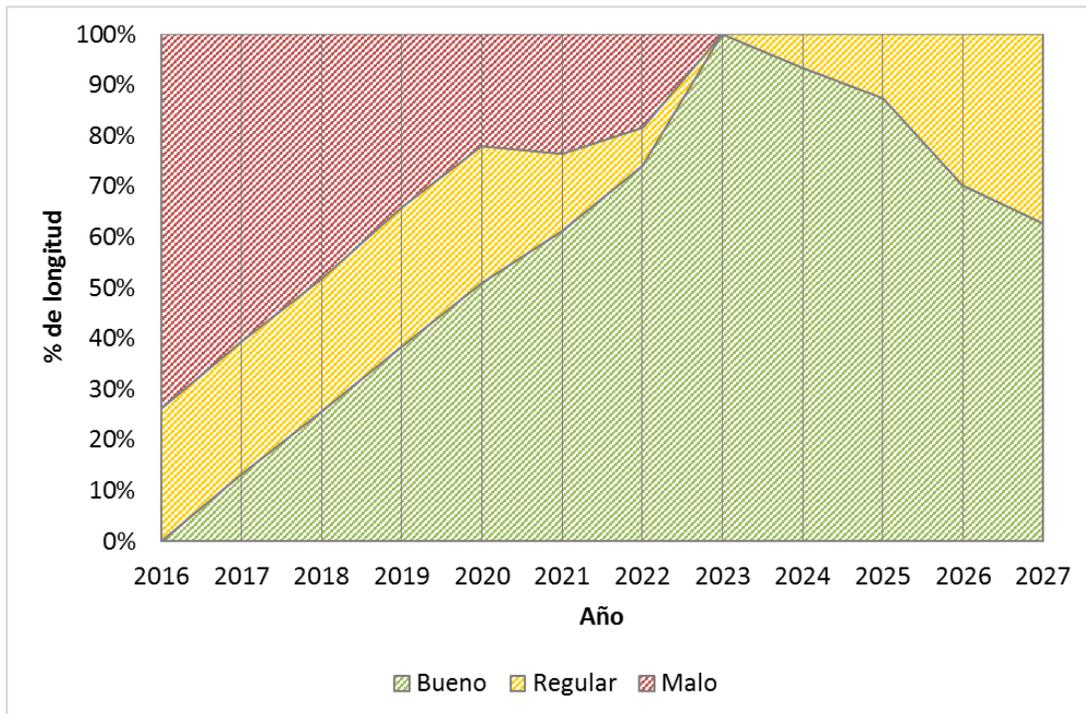


Figura 5.17. Estándar 3, escenario *medio*.

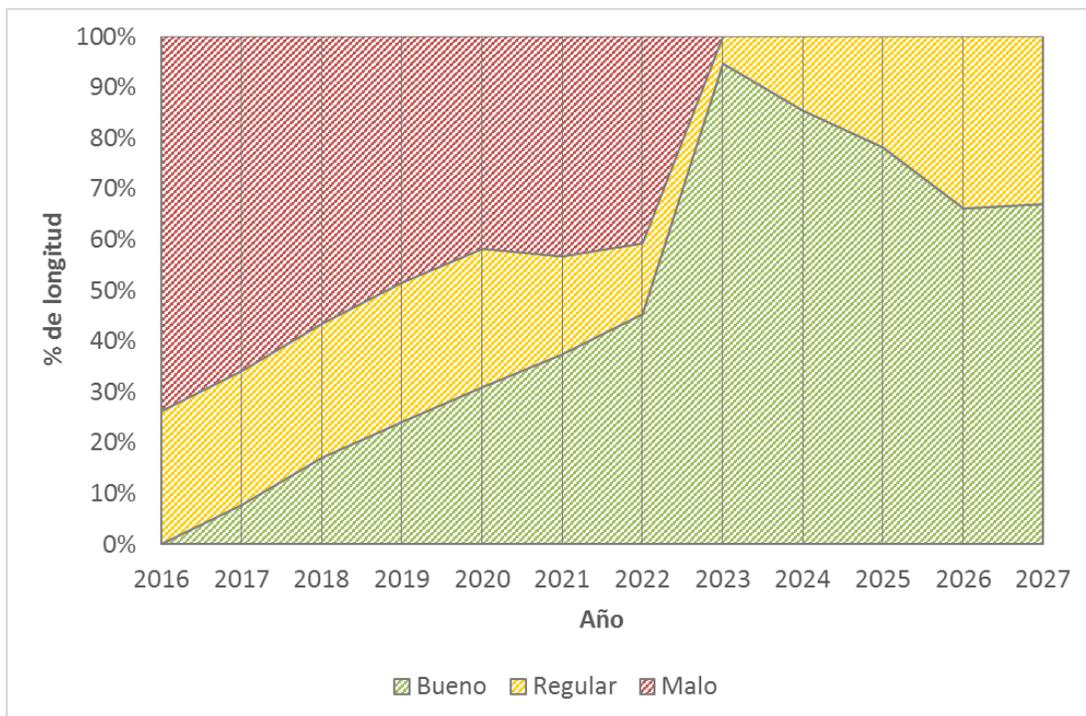


Figura 5.18. Estándar 3, escenario *bajo*.

Otro aspecto interesante es que, si bien la calificación del desempeño de la red en el primer año al pasar del *Estándar 1* al *Estándar 2* se mantiene prácticamente igual, al pasar de cualquiera de estos al *Estándar 3* se invierte de manera notable y da lugar a una porción muy significativa de la longitud de la red con un nivel de servicio *malo*.

En cualquier caso, resultados como los antes presentados pueden ser útiles para la definición de nuevos estándares de desempeño. Por ejemplo, si el escenario *alto* de la Figura 5.16 se considerara factible, podría utilizarse como base para formular metas de desempeño como “incrementar anualmente en 14 % la longitud de carreteras con un nivel de servicio bueno o regular”, o “para 2022, tener 85 % de la longitud de la red con un nivel de servicio bueno o regular”.

6 Conclusiones

De los tópicos tratados en este documento, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El desempeño individual de los activos carreteros resulta insuficiente para la toma de decisiones relacionada con la jerarquización y priorización de las inversiones para la conservación de carreteras. Dadas las expectativas actuales de los grupos de interés vinculados a las redes viales, se requiere un enfoque holístico para evaluar el desempeño de las redes en términos de atributos adicionales al desempeño de los activos como seguridad, movilidad, impactos económicos y efectos medioambientales.
- La gestión del desempeño es un componente esencial de cualquier marco de gestión de activos, ya que proporciona la información necesaria para determinar la medida en la que se están cumpliendo los objetivos de la organización de carreteras.
- Los elementos de la gestión del desempeño que ya se encuentran presentes en algunas entidades mexicanas con redes de carreteras a su cargo, deben utilizarse como punto de partida para desarrollar un marco formal de gestión del desempeño.
- Las aplicaciones del análisis de estrategias del HDM-4 comprenden estudios de políticas, como cambios en los estándares de conservación. La revisión de las medidas y las metas de desempeño pueden considerarse como un estudio de políticas, por lo que el análisis de estrategias resulta la aplicación más adecuada para llevar a cabo este tipo de revisiones.
- Normalmente, la implementación de programas de obra sin restricciones presupuestales derivados de requerimientos de desempeño muy exigentes no es factible, debido a los altos niveles de financiamiento necesarios en el primer año del periodo de análisis.
- La falta de recursos para apoyar la adopción de un nuevo marco de gestión del desempeño, puede generar en el mediano plazo riesgos muy serios para la sustentabilidad del enfoque de gestión de activos.
- El ejemplo de aplicación desarrollado muestra que la metodología propuesta puede ser útil para revisar el impacto de cambios en las medidas y las metas de desempeño.

Bibliografía

- AASHTO, 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington(DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 2011. *AASHTO Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation*. Washington(DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Arroyo, J. A., Aguerrebere, R. & Torres, G., 2014. *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014. Publicación Técnica no. 407*, San Fandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Carey, W. N. & Irick, P. E., 1960. The Pavement Serviceability - Performance Concept. *Highway Research Bulletin*, Issue 250.
- De Solminihac, H., 2001. *Gestión de Infraestructura Vial*. 2a. ed. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- FHWA, 2012. *A Summary of Highway Provisions - MAP-21 - Moving Ahead for Progress in the 21st Century | Federal Highway Administration*. [En línea] Available at: <http://www.fhwa.dot.gov/map21/summaryinfo.cfm> [Último acceso: 3 junio 2015].
- Gobierno de la República, 2013. *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*. México(D.F.): Gobierno de la República.
- Gobierno de la República, 2014. *Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018*. México(D.F.): Gobierno de la República.
- Haas, R., Hudson, W. R. & Zaniewski, J., 1994. *Modern Pavement Management*. Malabar(Florida): Krieger Publishing Company.
- HMEP & UKRLG, 2013. *Highway Infrastructure Asset Management: Guidance Document*, Londres, Reino Unido: Department for Transport.
- International Scanning Study Team, 2010. *International Technology Scanning Program: Linking Transportation Performance and Accountability*, Washington, DC, EUA: Federal Highway Administration.
- NAMS, 2011. *International Infrastructure Management Manual*. 2011 ed. Wellington: The NAMS Group.

Simpson, A. L., Rada, G., Visintine, B. & Groeger, J. L., 2013. *Evaluating Pavement Condition on the National Highway System*. Washington, DC, EUA, Transportation Research Board.

TRB, 2010. *NHCRP Report 677: Development of Levels of Service for the Interstate Highway System*, Washington, D.C., EUA: Transportation Research Board.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>