



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**Facultad de Ingeniería**

**Análisis en la  
Evaluación de Carretera**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**  
**CARLOS AGUILAR HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**Ing. Francisco Gorostiza Perez**



**MÉXICO, D.F.**

**2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/109/03

Señor  
CARLOS AGUILAR HERNANDEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. FRANCISCO GOROSTIZA PEREZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ANALISIS EN LA EVALUACION DE CARRETERAS"**

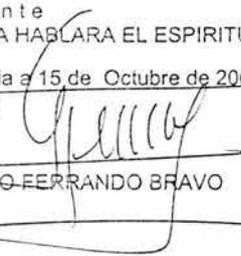
- INTRODUCCION
- I. REQUERIMIENTOS DE INFORMACION
- II. SOLICITACIONES Y NIVEL DE SERVICIO
- III. EVALUACION ESTRUCTURAL
- IV. MODELOS DE DETERIORO
- V. COSTOS DE EVALUACION ECONOMICA
- VI. METODOS DE EVALUACION ECONOMICA
- VII. ANALISIS Y PROYECCIONES FINANCIERAS
- VIII. EJEMPLO DE APLICACIÓN
- IX. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria a 15 de Octubre de 2003  
EL DIRECTOR

  
M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/AJP/crc.

Agradezco a Dios el haberme dado la vida  
y todo lo que tengo de ella.

Agradezco a mí familia que siempre me ha apoyado  
en especial a mis Padres que son la fuente que me  
inspira a ser mejor cada día

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México  
que abrió sus puertas para albergar mis sueños

Y a todos aquellos que hicieron posible la realización  
de este trabajo y que me han brindado su apoyo para  
cumplir mis sueños que son ya una realidad

## ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

# ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Indice

# Análisis en la Evaluación de Carreteras

## Introducción

	Pág.
<b>Capítulo 1. Requerimientos de Información</b>	
1.1. Clases de datos requeridos.....	2
1.1.1. Datos Físicos.....	3
1.1.2. Datos Históricos.....	4
1.1.3. Datos del Tránsito.....	5
1.1.4. Datos del Medio Ambiente.....	5
1.1.5. Datos de los Costos.....	6
1.2. Datos de Construcción y Solicitud.....	7
1.3. Comportamiento de los Pavimentos en la Evaluación.....	8
1.4. Objetividad y Consistencia en la Evaluación del pavimento.....	8
1.5. Identificación de los tramos y sectores a lo largo del pavimento.....	10
1.6. Obtención y procesamiento de datos.....	11
<b>Capítulo 2. Solicitaciones y Nivel de Servicio</b>	
2.1. Solicitaciones de tránsito.....	13
2.1.1. Efectos de las Cargas en los Pavimentos.....	13
2.1.2. Características del tránsito.....	14
2.1.3. Proyecciones del tránsito.....	17
2.2. Solicitaciones del medio ambiente.....	18
2.2.1. Solicitaciones sobre pavimentos de concreto.....	18
2.2.2. Solicitaciones sobre pavimentos de asfalto.....	19
2.3. Efecto del tránsito y del clima.....	21
2.4. Concepto de nivel de servicio.....	23
2.4.1. Índice de Servicio.....	23
2.4.2. Índice de Servicio y su curva de comportamiento.....	26
2.5. La rugosidad de los pavimentos.....	26
2.6. Índice de rugosidad Internacional (IRI).....	27
2.6.1. Características del Modelo.....	27
2.6.2. Escala del IRI.....	28
2.7. Equipos para evaluar el IRI.....	29
2.8. IRI en la red Carretera Nacional.....	31
<b>Capítulo 3. Evaluación Estructural</b>	
3.1. Antecedentes.....	32
3.2. Características geotécnicas de las carreteras.....	34
3.2.1. Estabilidad de Cortes.....	35
3.2.2. Estabilidad de Terraplenes.....	36
3.3. La deflexión como parámetro de la evaluación estructural.....	38
3.4. Métodos de evaluación estructural.....	43
3.5. Control de Calidad.....	51

3.6. Deterioro de pavimentos.....	52
3.6.1. Deterioro de pavimentos de concreto.....	53
3.6.2. Deterioro de pavimentos asfálticos.....	57
3.7. Revisión visual de fallas.....	60
3.8. Equipos para la evaluación del deterioro superficial.....	60
3.9. Índice de deterioro de pavimentos.....	62
3.10 Técnicas de conservación de carreteras.....	62

## Capítulo 4. Modelos de Deterioro

4.1. Modelo de deterioro de pavimentos.....	66
4.2. Técnicas para desarrollar modelos.....	67
4.3. Aplicabilidad de los modelos de deterioro.....	69
4.4. Modelos de deterioro de primera y segunda fase.....	71
4.5. Modelos de deterioro de forma funcional para los modelos.....	72
4.6. Modelos de deterioro de pavimentos asfálticos.....	76
4.7. Modelos de deterioro de pavimentos de concreto hidráulico.....	83
4.8. Metodología de calibración de los modelos.....	87

## Capítulo 5. Costos de Evaluación Económica

5.1. Tipos de Costos en la Evaluación Económica de Carreteras.....	91
5.2. Costos de Mantenimiento y/o Reconstrucción.....	93
5.2.1. Costos de mantenimiento o reconstrucción futura.....	93
5.2.2. Costos de mantenimiento a lo largo de su vida útil.....	94
5.2.3. Costo remanente de la carretera al final de su vida útil.....	94
5.2.4. Costos de Inversión.....	95
5.3. Costos de Operación Vehicular.....	95
5.3.1. Costos de Operación de los vehículos.....	113
5.3.2. Costos de Tiempo de viaje.....	113
5.4. Metodología de Análisis.....	113
5.4.1. Efecto de la condición actual de la carretera en los Costos Totales.....	114
5.4.2. Efecto del nivel de calidad en la Carretera en los Costos de Obra y de Operación.....	116
5.4.3. Evolución de los Costos de Operación.....	116
5.4.4. Evolución de los Costos de Obra en Trabajos de Conservación y/o Reconstrucción.....	117
5.5. Análisis Económico de Costos y beneficios.....	118
5.5.1. Costos y beneficios de Carreteras.....	119
5.5.2. Costos y beneficios de Vehículos.....	120
5.5.3. Costos y beneficios Exógenos.....	121
5.5.4. Comparaciones y análisis económicos.....	121

## Capítulo 6. Métodos de Evaluación Económica

6.1 El valor del dinero en el tiempo.....	124
6.2. Comparación de alternativas.....	124
6.2.1. Alternativas mutuamente excluyentes.....	125
6.2.2. Horizonte de planeación.....	125
6.2.3. Elección de la mejor alternativa.....	126
6.2.4. Tasa Mínima Atractiva de Rendimiento (TMAR).....	126
6.3. Medidas de efectividad económica.....	127
6.3.1. Método del Valor Presente (VP).....	128
6.3.2. Método del Valor Anual (VA).....	130
6.3.3. Método del Valor Futuro (VF).....	131
6.3.4. Método del Período de Reembolso (Recuperación).....	131
6.3.5. Método de la Tasa de interna de Retorno (TIR).....	132
6.3.7. Método de la razón Costo/Beneficio (C/B).....	134
6.4. Evaluación económica en presencia de restricción presupuestaria.....	135

## Capítulo 7. Análisis y Proyecciones Financieras

7.1. Estados financieros básicos.....	136
7.2. Análisis y fuentes de usos de recursos.....	137
7.3. Fuentes de financiamiento de inversiones.....	137
7.4. Análisis de Sensibilidad, Riesgo e Incertidumbre.....	138
7.4.1. Sensibilidad de Alternativas.....	139
7.4.2. Reconocimiento de Riesgo.....	140
7.4.3. Decisiones bajo Incertidumbre.....	142

## Capítulo 8. Ejemplo de Aplicación

Evaluación Técnica y Económica a un Proyecto Carretero del sector Público.....	144
--	-----

## Capítulo 9. Conclusiones.....

	183
--	-----

## Bibliografía.....

	187
--	-----

## ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

# Introducción

# Análisis en la Evaluación en Carreteras

## Introducción

La Evaluación de Carreteras comprende un conjunto coordinado de actividades relacionadas con la planificación, diseño, construcción, conservación, e investigación de todos los elementos que constituyen la carretera a evaluar. Así el objetivo es establecer una metodología para el seguimiento y continúa evaluación del estado de los pavimentos, para proporcionar así seguridad, confort, economía del transporte, obteniendo la mayor rentabilidad posible de dinero invertido sujeto a restricciones económicas, técnicas, políticas y ambientales para tales efectos, la evaluación debe de ser actualizable, permitir la comparación de alternativas e identificar la óptima, basando sus decisiones en atributos, criterios y restricciones cuantificables, además de usar información de retroalimentación para evaluar las consecuencia de decisiones tomadas.

Los elementos básicos que configuran una Evaluación de Carreteras se pueden sintetizar como:

- Información de inventario de la carretera
- Información del estado funcional y estructural de los elementos de la carretera
- Modelos de predicción del comportamiento durante la vida útil
- Estándares de conservación para el deterioro actual y futuro
- Evaluación Económica de las distintas alternativas de conservación y/o reconstrucción
- Asignación presupuestal para los trabajos de conservación y/o reconstrucción

La Evaluación Estructural se encuentra estructurada en base a la relación existente entre las solicitaciones a que se ve sometido a lo largo de su vida útil, que son básicamente tránsito y clima. Las solicitaciones y las características de diseño y construcción determinan el modo de respuesta de ellos, los cuales se miden por determinadas características funcionales y estructurales, tales como:

- Irregularidad Superficial
- Resistencia al deslizamiento
- Deterioro Superficial
- Comportamiento Estructural

De acuerdo a las solicitaciones, las carreteras sufren un deterioro que debe ser evitado o corregido oportunamente mediante la aplicación de conservaciones, lo que se consideran como opciones seleccionadas de acuerdo al presupuesto y al nivel de mejoramiento que otorgan al pavimento, así como el control de costos

asociados que generan. Para cada acción posible de conservación se determina un costo total distinto, el que es comparado para seleccionar el menor y que corresponderá a la alternativa seleccionada.

De esta forma la Evaluación de Carreteras contempla básicamente un análisis detallado para un proyecto, como tal se requiere información detallada de secciones específicas del pavimento.

Los datos utilizados para realizar esta evaluación son:

- Las cargas que recibe el pavimento
- Los factores ambientales que lo afectan
- Las características de los materiales que lo constituyen
- Propiedades de su base, subbase y subrasante
- Las variables de construcción y mantenimiento
- Los Costos

En la Evaluación Económica se consideran las siguientes actividades

- Generación de alternativas de tratamientos de conservación de pavimentos
- Selección del período de análisis, tasa de descuento, niveles de calidad mínimos del pavimento y para el análisis técnico económico de los pavimentos.
- Análisis técnico de cada alternativa en función del comportamiento esperado del pavimento
- Análisis económico de cada alternativa en función de los costos y beneficios esperados para el ciclo de vida del pavimento
- Selección de la alternativa adecuada

El objetivo de hacer una evaluación es ver el estado físico de la carretera en estudio para generar alternativas que nos ayuden a reducir los costos de rehabilitación, ya que en la actualidad se disponen de recursos limitados para el financiamiento de carreteras.

En un análisis económico se deben evaluar y considerar todos los costos asociados a cada alternativa propuesta. Los análisis económicos en caminos pueden realizarse en dos momentos bien definidos. Tanto para determinar factibilidades, como para elegir entre distintas alternativas de un proyecto, se deben tener en cuenta todos los costos, o flujos de dinero, involucrados a lo largo de toda la su vida útil. Estos flujos pueden ser mayores o menores respecto a una alternativa que se toma como base. Los análisis de evaluación económica estudian el movimiento de estos flujos de dinero, y ayudan a seleccionar el plan de inversiones más conveniente, ya se ha nivel red o de proyecto de un camino.

Existen algunos principios básicos para aplicar una correcta evaluación de carreteras. La aplicación de estos principios permitirá realizar una auténtica

evaluación, sin dejar escapar detalles importantes, lo que podría traducirse en un elemento erróneo para la toma de decisiones.

Los principios enunciados son los siguientes

- Prefactibilidad, el cual consiste en el estudio de grandes rasgos de la situación actual, y las posibles soluciones a aplicar. Aquí se hace un recopilación total de antecedentes y se analizan todos los factores que influyen sobre el proyecto.
- El nivel de administración donde se va realizar la evaluación debe estar claramente definido. Es decir, si se va trabajar a nivel de proyecto o de red.
- La evaluación económica realizada es una herramienta que nos ayudará a realizar nuestra elección de una alternativa de inversión, la que consideramos es más adecuada a nuestros intereses; en sí mismo está evaluación no representa una decisión.
- La evaluación económica no tiene relación con el método o fuente de los recursos de financiamiento. Las fuentes no pueden limitar el número o factibilidad de proyectos, o limitar la cantidad de recursos para un proyecto en particular. Tampoco deben afectar la metodología o principios que rigen la evaluación económica en sí.
- Los criterios de aplicación para la decisión deben definirse antes de que los resultados de la evolución sean aplicados.
- En la evaluación económica deben considerarse todas las alternativas posibles dentro del campo disponible para el análisis. Esto incluye la comparación con la situación existente, y también con cada una de las restantes.
- Las comparaciones deben realizarse para el mismo período de tiempo. Aún cuando la vida útil de las alternativas consideradas puedan ser distintas. Para ello se deben completar las soluciones en un menor plazo o acortar las de mayor plazo.
- Además de los costos de construcción y mantenimiento, en la evaluación deben incluirse los costos de operación y los beneficios esperados.

La distinción entre estos elementos, pueden verse desde dos puntos de vista. En primer término los costos y beneficios que están presentes en ambos son distintos: la evaluación privada compara los flujos de ingresos y los costos que afectan exclusivamente a un proyecto, desde el punto de vista del inversionista.

Los costos sociales (económicos) solamente están compuestos por el valor propio, es decir no se incluyen en el costo lo correspondiente a impuestos, tasas, aranceles, leyes salariales, etc. En los proyectos viales, dada su naturaleza pública, en general se ven sometidos a la evaluación de tipo social, salvo aquellos que son sometidos con régimen de concesiones, a los cuales también se les realiza una evaluación de tipo privada, pues el concesionario debe revisar la rentabilidad desde su punto de vista.

Capítulo

# 1

ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Requerimientos de Información

## Capítulo 1. Requerimientos de información

El primer paso para proceder en una Evaluación eficaz de una carretera, es el disponer de una información completa que permita conocer la realidad de la carretera que se trata de evaluar, es decir, disponer de un inventario. Esto para establecer prioridades de actuación e indicar tipo y cantidades de obras de mantenimiento y/o reconstrucción, para esto se requiere contar con la información que permita evaluar los pavimentos. Este capítulo analiza cuáles son los requerimientos básicos de información para una buena *Evaluación de Carreteras*.

La Evaluación de Carreteras opera en dos niveles principales, los que se conocen como nivel red y nivel proyecto y que se consideran como las instancias más importantes en la toma de decisiones, decisiones que afectan a la red carretera como un todo y las decisiones más específicas afectan a los proyectos individuales.

El Análisis de Evaluación de Carreteras se puede aplicar a una red vial o a un proyecto particular como se muestra en la figura 1.1. En el Nivel de Red se incluye fundamentalmente un proceso de observación de un conjunto de pavimentos que conforman una red de caminos, para planificar decisiones para grandes grupos de proyectos o una red de caminos completa fin de optimizar la asignación de recursos.

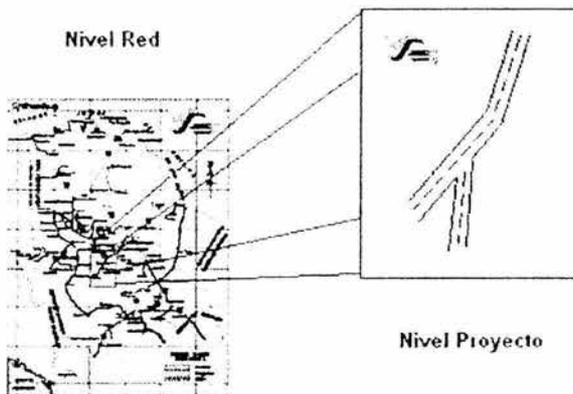


Figura 1.1.  
Evaluación a Nivel Red y a Nivel Proyecto

En el nivel de proyecto el proceso de observación es de una carretera en particular, con el propósito de determinar el momento en que se debe realizar el mantenimiento y/o rehabilitación, usando datos específicos y otorgando varias opciones de acuerdo a los objetivos planteados, usando modelos que requieren información detallada en secciones individuales del camino.

En general los Requerimientos de Información en la Evaluación de Carreteras deben ser completos y eficientes, generando la información necesaria para todos los niveles, para de esta forma apoyar a la toma de decisiones tanto para el aspecto técnico, como económico.

### **1.1. Clases de datos requeridos**

Las clases de datos requeridos para un sistema de información para los pavimentos, son básicamente los siguientes:

- Datos físicos de inspección (Estado actual del pavimento). Tabla 1.1
- Datos históricos (de otros pavimentos, de construcción, de mantenimiento). Tabla 1.2
- Datos del tránsito. Tabla 1.3
- Datos del medio ambiente. Tabla 1.4
- Datos de los costos (de construcción, mantenimiento, reconstrucción y usuarios). Tabla 1.5

Con estos datos podemos analizar el comportamiento del pavimento, y de esta forma poder determinar el tipo de rehabilitación a realizar, y en el momento en el que debe hacer, por lo que es necesario que los datos sean rápidamente accesible.

## 1.1.1. Datos Físicos

Los datos físicos considerados tanto a nivel red como a nivel proyecto son los que se encuentran en la siguiente tabla:

TIPO DE DATO	NIVEL RED	NIVEL PROYECTO
Rugosidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción del estado actual</li> <li>• Predicción del estado futuro</li> <li>• Base para el análisis y programación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad superficial</li> <li>• Curvas de deterioro</li> <li>• Estimar espesor de recubrimiento</li> </ul>
Grietas Superficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción del estado actual</li> <li>• Predicción de estado futuro</li> <li>• Identificar necesidades presentes y futuras</li> <li>• Programar el mantenimiento</li> <li>• Determinar la efectividad de los tratamientos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar los tratamientos de conservación</li> <li>• Identificar las necesidades de mejoramiento</li> <li>• Determinar la efectividad de los tratamientos</li> <li>• Identificar las necesidades de la rehabilitación</li> </ul>
Fricción superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción del estado actual</li> <li>• Predicción del estado futuro</li> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Determinar la efectividad de los tratamientos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar la efectividad de los tratamientos</li> </ul>
Deflexión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción del estado actual</li> <li>• Predicción del estado futuro</li> <li>• Identificar Insuficiencias estructurales</li> <li>• Priorizar rehabilitación</li> <li>• Determinar restricciones de carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entradas al diseño de recubrimiento</li> <li>• Determinar la suficiencia estructural</li> <li>• Estimar vida remanente</li> <li>• Estimar restricciones de carga remanentes</li> </ul>
Propiedades del material de las capas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimar la variabilidad entre secciones</li> <li>• Desarrollar bases para mejorar los estándares de diseño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entradas al diseño de recubrimiento</li> <li>• Proveer registros de construcción</li> </ul>
Geotecnia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definir características generales de los terrenos de construcción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción de las características geotécnicas del sector</li> <li>• Identificar estabilidad de cortes y terraplén</li> </ul>

Tabla 1.1 Clases de datos físicos de inspección

### 1.1.2. Datos Históricos

Los datos históricos se refieren a reparaciones que se le hayan hecho anteriormente, cuando fue construirla, etc., como se muestra en la tabla 1.2.

TIPO DE DATO	NIVEL RED	NIVEL PROYECTO
Historia del mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa del mantenimiento</li> <li>• Evaluar la efectividad del mantenimiento</li> <li>• Determinar la efectividad de los costos de las alternativas de diseño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar los problemas de la sección</li> </ul>
Historia de la construcción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la efectividad de la construcción</li> <li>• Determinar la efectividad de los costos de las alternativas de diseño y las prácticas de construcción</li> <li>• Determinar la necesidad de implementar procedimientos que aseguren calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer registros de construcción</li> <li>• Proveer retroalimentación al diseño</li> </ul>
Historia del tránsito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Estimar tendencias del comportamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base para el diseño de pavimentos</li> <li>• Identificar métodos de cómo guiar el tránsito</li> <li>• Estimar su vida útil</li> </ul>
Historia de los accidentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollar medidas</li> <li>• Priorizar la programación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar zonas de alto riesgo</li> <li>• Desarrollar medida</li> </ul>

Tabla 1.2 Clase de datos históricos

### 1.1.2. Datos del Tránsito

Los datos del tránsito que se deben considerar al momento de evaluar nuestra carretera tanto a nivel red como a nivel proyecto son los siguientes.

TIPO DE DATO	NIVEL RED / NIVEL PROYECTO
Tipos de vehículo	Conocer las características físicas y económicas de los vehículos que circulan
Flota vehicular	Conocer las características de los vehículos que circulan en un determinado proyecto
Volumen	Determinar los costos de operación y tránsito
Estratigrafía	Determinar los ejes equivalentes que solicitan los pavimentos
Ejes equivalentes	Estimar el efecto de las cargas en el deterioro de los pavimentos

Tabla 1.3 Clases de datos en tránsito

### 1.1.3. Datos del Medio Ambiente

Los datos del medio ambiente que se deben considerar al momento de evaluar nuestra carretera tanto a nivel red como a nivel proyecto son los siguientes:

TIPO DE DATO	NIVEL RED	NIVEL PROYECTO
Drenaje	Evaluar el comportamiento en la red de carreteras	Evaluar el comportamiento de la sección
Clima	Evaluar el comportamiento en la red	Evaluar el comportamiento de la sección

Tabla 1.4 Clases de datos del medio ambiente

#### 1.1.4. Datos de los Costos

Los datos, de los tipos de costos a considerar en nuestra evaluación son los que se muestran en la tabla 1.5.

TIPO DE DATO/COSTOS	NIVEL RED	NIVEL PROYECTO
Costos de construcción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Seleccionar estrategias de inversión en la carretera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación económica</li> <li>• Selección de estrategias</li> </ul>
Costos de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Seleccionar estrategias de inversión de la red</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la efectividades mantenimiento</li> <li>• Seleccionar secciones a dar mantenimiento</li> </ul>
Costos de rehabilitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Seleccionar estrategias de rehabilitación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación económica</li> <li>• Seleccionar estrategias de rehabilitación</li> </ul>
Costos de usuarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar la programación</li> <li>• Seleccionar estrategias de evaluación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación económica</li> <li>• Seleccionar estrategias de mitigación</li> </ul>

Tabla 1.5 Clases de datos de costo

## 1.2. Datos de Construcción y Solicitación

Los datos de construcción incluyen tanto información de la calidad de los materiales de construcción como de la forma y calidad con que se ejecutó la obra, de este modo se pueden deducir a futuro las causas de cualquier situación que se presenta en relación al comportamiento de la carpeta de rodado. Los datos de mantenimiento incluyen registros de todas las actividades de mantenimiento que pueden afectar el comportamiento del pavimento.

Los datos proveen la base del desarrollo, actualizado y evaluando el comportamiento del pavimento. El banco de datos debe incluir los datos desde el diseño a la operación y el mantenimiento, para en base a ellos decidir sobre que tipo y cuando realizar futuros mantenimientos o rehabilitaciones de pavimento.

Uno de los efectos más relevantes sobre el comportamiento del pavimento a través del tiempo es la presencia de humedad en la estructura. En este punto es importante investigar el desempeño del drenaje para la rehabilitación del pavimento. Las preguntas más frecuentes a responder y a resolver son las siguientes:

- Donde y como el agua se mueve a lo largo de la superficie de pavimento.
- Donde se junta el agua y cerca del pavimento.
- Que tan grande es el nivel del agua en los fondos.
- Las juntas y las grietas contienen agua.
- Hay agua en las bermas.
- Hay vegetación a lo largo del camino.
- Hay depósitos de finos u otra evidencia de bombeo visible.
- Están bien selladas las grietas y las juntas.
- Profundidad en la capa freática.
- Tipo de suelo de la subrasante.

Otro efecto que se debe considerar sobre el comportamiento de los pavimentos es el tránsito, el cual incide sobre la estructura de diferentes maneras, por lo tanto se requiere conocer aspectos tales como:

- Volumen y composición de tránsito.
- Estratigrafía por ejes.
- Características del parque automotor.
- Peso máximo por eje permitido y efectivo.
- Tasas de crecimiento históricas y futuras.

A lo anterior se debe agregar la información histórica de mantenimiento y operación de la carretera, para poder calibrar modelos ajustados a las condiciones específicas del proyecto. Con esto se puede realizar una serie de estudios (vida útil,

deterioro específico, etc.), que aumentan la capacidad de desarrollo y eficiencia de la agencia encargada, sea ésta pública o privada.

### 1.3. Comportamiento de los pavimentos en la Evaluación

En términos generales, un buen pavimento da un satisfactorio nivel de servicio a los usuarios, no requiere de un costoso mantenimiento, es estructuralmente adecuado para las cargas de tránsito, tiene suficiente resistencia al deslizamiento para evitar accidentes y consta de características geotécnicas que permiten soportar la estructura en forma adecuada, con una correcta estabilidad de cortes y terraplén, por lo que se hace necesario evaluar todos los tipos de datos antes mencionados, para lograr determinar, principalmente, la condición funcional y estructural del pavimento. Para esto se deben considerar las siguientes características:

- Rugosidad
- Baches
- Escalonamiento o ahuecamiento, según corresponda
- Grietas superficiales
- Deflexión
- Fricción de la superficie
- Drenaje
- Características geotécnicas

Estas características, junto con el mantenimiento y el tránsito de los usuarios, son las variables que determinarán el comportamiento real del pavimento. Además, se pueden predecir a la hora de diseñar y evaluar mientras el pavimento esté en servicio, pudiendo alargar el ciclo de vida, rehabilitando el camino.

En la evaluación deberá considerarse tanto la condición estructural como la funcional. La primera relación con los defectos que contribuyan al deterioro del pavimento, y la segunda valora cuan bien se comporta el pavimento para satisfacer los requerimientos de los usuarios.

### 1.4. Objetividad y consistencia en la evaluación de Pavimentos

La mayoría de los procedimientos de toma de datos y de la evaluación de pavimentos son realizados en base al criterio de la persona encargada, por lo que pueden ser desinformes y podrían perder su significado en el tiempo (por cambio de personal o de políticas, por ejemplo). Esto hace necesario entrenar al personal y utilizar métodos conocidos globalmente, para que la evaluación sea desempeñada objetivamente.

La primera necesidad de una evaluación de pavimentos es la consistencia del banco de datos, versus al tiempo y espacio. Sin instrucciones detalladas y entrenamiento en los procesos de valuación, y más aún si la recolección de datos se

realiza contra el tiempo, las bases de datos serán inconsistentes, y por ende, dificultarán el posterior análisis y uso de los datos, llevando a tomar decisiones erróneas.

Es recomendable asignar medidas que den a conocer la importancia o peso de cada uno de los datos, ya que siempre requieren para el mismo tipo de evaluación o análisis a realizar. La evaluación debe ser hecha completa y cuidadosamente. La característica principal de las valorizaciones es que sean hechas de acuerdo a reglas estrictas que permiten la comparación objetiva entre diferentes pavimentos o entre la condición particular de un pavimento entre un año y otro.

No siempre se pueden obtener mediciones o índices que cumplan con la condición para comparar dos proyectos, debido al sesgo intrínseco de la toma de decisiones, produciéndose una desviación que ocurre cuando se evalúan los pavimentos, pueden deberse a dos causas principales [AASHTO:1993]. La primera es la variabilidad entre unidades, que refleja el hecho que estadísticamente las unidades homogéneas pueden existir en proyecto de rehabilitación. La capacidad para definir los límites generales de localización de estas unidades es crítica en la rehabilitación, debido a que las unidades son la base para los análisis que se realizarán. La segunda fuente es la diversidad de la respuesta dentro de cada unidad, esto es porque se relaciona a la fiabilidad de la eventual rehabilitación.

En resumen, la recolección de datos requiere de las siguientes decisiones

- ¿Qué recolectar?
- ¿Qué equipo usar?
- ¿Quién recolectará los datos?
- ¿Cómo capacitar al personal para obtener consistencia y repetitividad de los datos?
- ¿Qué tipo de procedimientos usará?
- ¿Cómo se identificará cada sección y como se relacionan?
- ¿Qué daño hará el tránsito de vehículos pesados?
- ¿Cuánto costará la revisión del sistema implantado?
- ¿Cuántos datos recolectar y cuándo hacerlo?
- ¿Qué datos pueden ser recolectados subjetivamente, y qué datos requieren medidas objetivas?

Todos los sistemas de pavimentos requieren de un inventario de la red carretera o del proyecto a analizar. Este contiene las características permanentes del pavimento, como ubicación, estructura y geometría.

Desarrollar un inventario carretero consume tiempo y recursos. Pasos básicos de su implementación, incluyen; selección de las variables o elementos que serán usados en el inventario definición del método a utilizar para la descripción de la selección, y conformación de un Banco de Datos de inventario.

Un inventario contiene las características permanentes del pavimento, por lo que existe una amplia variedad de datos que serán candidatos a considerarse en el inventario. Debido a estos, hay un compromiso en el nivel de detalle, el costo y el tiempo invertido en la recolección y análisis de los datos, por esto se han definido los distintos tipos de datos a considerar en la gestión de pavimentos, éstos son los siguientes:

- Referencia (Ubicación)
- Descripción de la sección
- Geometría (clasificación y características físicas)
- Estructura del pavimento (espesores y materiales de capa)
- Características del suelo de fundación, CBR, módulo resiliente (Mr) y módulo de reacción de la subrasante (K).
- Cortes y terraplenes
- Medio ambiente y drenaje (condiciones locales)
- Estructuras (puentes y alcantarillas)
- Señalización vertical
- Señalización horizontal
- Iluminación
- Barreras

### 1.5. Identificación de los tramos y sectores a lo largo del pavimento

Históricamente no se han estandarizado debidamente la recolección de datos en la red carretera por lo cual se crea una ineficiencia que ha mostrado, hasta ahora, problemas como duplicidad de información, problemas de compatibilidad entre los datos tomados. Por lo tanto se hace necesario especificar un método de referencia común para identificar los tramos que permitan administrar la información en forma eficiente.

Para determinar el tipo de datos a recolectar se puede elegir un método conocido o implementar uno nuevo; en cualquiera de los casos se debe realizar bajo un estándar conocido, para permitir un intercambio de datos. Un método bueno y confiable de referencia es fundamental para cualquier valuación de carreteras: En general existen cuatro métodos básicos de referencia:

- Kilometraje, usando generalmente en carreteras. Cada ruta tiene un nombre o un número que la identifica, se define el punto de comienzo de la ruta y secuencialmente se numera el kilometraje a lo largo de cada ruta.
- Nodo-unión, los puntos clave de la red carretera son definidos como nodos y los tramos entre ellos definen las uniones. Los nodos son generalmente puntos de cambio en las características del pavimento.
- Rama-sección. Las características de la red se definen como ramas, y las unidades homogéneas de las ramas son definidas como secciones.

- Sistema de georeferenciado, que basan la ubicación de la carretera sobre sistemas cartográficos de referencia como UTM.

Para lograr conocer y ordenar la información recolectada se necesita subdividir la carretera en varios tramos y estos a su vez en sectores. Este procedimiento se llama tramificación y es indispensable al momento del análisis de la toma de decisiones. En general la tramificación se refiere a la subdivisión de un camino en base a aquellos parámetros que presentan una cierta constancia en el tiempo, por ejemplo; estructura, tránsito y clima. En cambio sectorización se refiere a la discriminación de sectores distintos, dentro de cada tramo, debido a condiciones de estado del pavimento; por ejemplo rugosidad y agrietamiento.

Definición de la sección. Una vez establecido el método, se debe definir la sección especificada del pavimento (ver figura). Es recomendable que las secciones, para los distintos métodos utilizados, tengan características uniformes o longitudes constantes. Las ventajas de la uniformidad son que se simplificará la estructura de datos y se facilitará la localización de las secciones durante la recolección de datos.

La definición de las secciones en áreas urbanas se torna bastante difícil, debido al sin número de intersecciones y vías que en ella existen. El método de referencia que se utiliza es el sistema de coordenadas, con el cual se logra mantener cierta claridad en la ubicación de cada una de las componentes de la red.

## 1.6. Obtención y procesamiento de datos

Una vez que se han definido los tipos de datos que conformarán el inventario, será necesario determinar el procedimiento que se seguirá para su recolección. Dependiendo del grado de detalle que se requiera, esta tarea puede ser relativamente simple, o muy complicada. Los datos deben ser recolectados y procesados sistemáticamente de una forma entendible, fácil de usar y que se puedan registrar de manera precisa, utilizando sistemas computacionales.

El inventario vial es la base para una correcta evaluación de carreteras, por lo que si este es manejable y entendible, se podrá llegar a reducir el tiempo y el costo en su procesamiento y posterior análisis.

Los principales tipo de datos que debe contener el inventario vial es:

1. *Identificación.* Nombre de la carretera, kilómetro inicial, kilómetro final y año de construcción.
2. *Construcción* Tipo de construcción, carretera (única, derecha, izquierda)pistas ( en el caso de una carretera derecha, las pista deben ser impares, sino pares ), espesor interno de la capa de rodado, tipo de capa de rodado, espesor base intermedia, tipo de capa intermedia, espesor interno de

la base negra, espesor externo de la base negra, tipo base negra, espesor de base, tipo de base, espesor de la subbase, CBR del suelo, tipo de suelo, tipo de berma, ancho de berma, longitud de la losa y ancho de pista.

3. *Medio ambiente.* Orografía (llano, ondulado o montañoso), lluvia (según el número de días que llueve), temperatura media y diferencia térmica.

4. *Geometría.* Pendiente (baja, media o alta), Curvatura (recto o sinuoso), Peralte (si tiene o no) y altura sobre el nivel del mar.

5. *Última intervención* (Diferentes mejoras que se le hayan hecho a la carretera en estudio).

Capítulo

# 2

ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Solicitaciones y Nivel de Servicio

## Capítulo 2. Solicitaciones y Nivel de Servicio

Las solicitaciones principales de un pavimento son el tránsito y el clima. El tránsito visto como las cargas pesadas que circulan por el pavimento y el clima como lluvia y temperatura.

### 2.1. Solicitaciones de tránsito

El tránsito solicitante es un factor de primera importancia a la hora de determinar o predecir el daño en el tiempo que sufrirá un pavimento en un período dado. Se puede apreciar que el volumen de vehículos ha crecido en forma importante en los últimos años, pero este aumento ha sido aún mayor si lo vemos en términos de la carga que se transporta, esta situación tiene una implicancia significativa en el comportamiento de los pavimentos. Las cargas de los vehículos son transmitidas al pavimento mediante dispositivos de apoyo, para distribuir la carga total sobre una superficie mayor, Esto tiene el efecto de reducir las tensiones y deformaciones al interior de la superestructura.

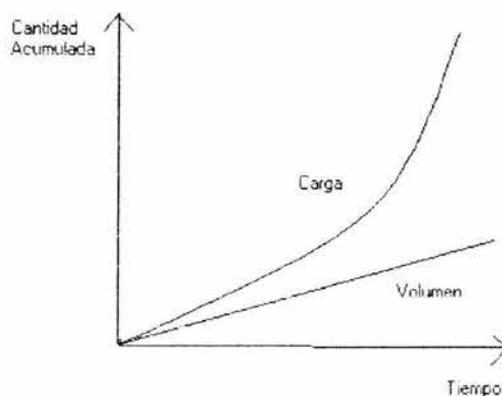


Figura 2.1.  
Solicitaciones de Tránsito

#### 2.1.1. Efectos de las Cargas en Pavimentos

Las solicitaciones de cargas en los pavimentos son las principales causas del deterioro de los caminos, a lo cual se agrega el efecto del clima. Estos dos tipos de solicitaciones se suman llevando a la consiguiente pérdida de capacidad del pavimento.

Uno de los mayores problemas que se encuentran en las predicciones teóricas sobre el efecto destructivo de las cargas del tránsito, es el decidir cual es criterio determinante a utilizar; tensión, deformación o nivel de servicio. Aún definido este

problema la dificultad persiste debido a la multiplicidad de factores que intervienen, esto es, tipo de apoyo, intensidad y frecuencia de las cargas, rigidez relativa de las capas componentes, etc.

En general las cargas no son relevantes si su intensidad no sobrepasa un determinado valor. Es por esto que no se consideran los vehículos livianos, autos y camionetas, y sólo son determinantes en el diseño de los vehículos comerciales: camiones de pasajeros y camiones de carga.

Adicionalmente el tipo de apoyo, importa el espaciamiento entre ruedas y la presión de inflado de neumáticos. Cabe destacar que a mayor cantidad de ruedas por eje, mejor será la distribución de esfuerzos y menores los daños sobre la estructura del pavimento contribuyendo a una mejor y más prolongada vida del camino.

A lo anterior se debe agregar distintas configuraciones de ejes, según el tipo de camión, que tienen autorización para circular, siempre y cuando cumplan con los pesos máximos exigidos

### **2.1.2. Características del tránsito**

Un aspecto muy importante en la determinación de las solicitudes de tránsito es conocer de forma precisa las características del tránsito, que va desde conocer los tipos de vehículos circulantes hasta los niveles de carga de ellos.

#### **a) Censo de tránsito (volúmenes y cargas)**

Esta actividad consiste en desarrollar una metodología eficiente mediante la cual se puede tener un conocimiento global del tránsito que circula por la red carretera y determinar las principales características de la utilización de los caminos nacionales. Las principales recomendaciones para la realización de un censo de tránsito.

Características del censo:

- Se hace cada dos años
- En tres estaciones, enero-abril, mayo-agosto y septiembre-diciembre.
- En días laborales

Para los caminos que presentan características especiales en las fechas en las que se realizaron los muestreos, se utilizan coeficientes de corrección estacionales, a fin de obtener valores más reales del número de pasadas de vehículos y determinar un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) representativo.

El TDPA, corresponde a la cantidad total de vehículos promedio que circulará por la vía durante los 365 días del año. Este valor se obtiene a partir del promedio

aritmético de los TDPA, para cada día del año. Para calcularlo se obtienen valores representativos para días laborales y festivos, ponderándolos y luego dividiendo por 365 días.

La selección de zonas y caminos tipos se basa en dos factores:

- Factores climáticos.
- Actividad productiva preponderante.

Coefficiente de expansión horaria (CE)

Factor por el cual debe multiplicarse el tránsito censado en las Estaciones de Muestreo de 12 hrs., para calcular estimativamente el tránsito en 24 hrs.

$$CE = \frac{TD}{T12}$$

donde: TD tránsito diario (24 horas)  
T12 tránsito en 12 horas.

La clasificación de vehículos de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y al Instituto Mexicano del Transporte (ver referencia No.8) son los presentados en la Tabla 2.1. en el estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas.

Clasificación/ Clase de vehículo	No. de Ejes	Distancia entre ejes (mm)	Peso/Eje (Ton)	PBV (Ton)	Longitud (mm)
Autobuses	2	5,994	5 - 6	10 - 12	9,829
Camión unitario C2	2	5,232	5 - 6	10 - 12	9,194
Camión unitario C3	3	6,096	9 - 11	18 - 27	9,659
Camión Remolque C2 - R2	4	5,232 5232	9 - 11	36 - 44	21,500
Camión Remolque C3 - R2	5	6,096 8,232	9 - 11	45 - 55	21,500
Camión Remolque C3 - R3	6	6,096 6,096	9 - 11	54 - 66	21,500
Tracto Camión Articulado T3 -S2	5	4,902 6,205	9 - 11	45 - 56	16,000
Tracto Camión Articulado T3 -S3	6	4,902 7,070	9 - 11	63 - 77	22,500
Tracto Camión Doblemente Articulado T3 - S2 - R4	9	4,902 7,070 7,070	9 - 11	81 - 99	22,500

Tabla 2.1. Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan  
Sobre las carreteras mexicanas <sup>1</sup>

b) Concepto de eje equivalente

Se utiliza para determinar el efecto destructivo, dependiendo de las cargas y tipo de eje de los vehículos. Para esto se ha definido como eje estándar a un eje simple de rueda doble, de carga de 18 kips, 8.16 Ton o 80 kN. ( 1 kip = 9.81 N)

<sup>1</sup> Documento Técnico 8

**Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas. Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras.**

Mendoza Díaz A, Cadena Rodríguez A

El coeficiente de daño unitario, como su nombre lo indica transforma el daño que producirá la estructura del pavimento, el paso de un camión con n ejes diferentes en función del daño que producen los ejes estándar.

Tipo de Vehículo	Coeficientes de daño unitario bajo el reglamento de 1994 <sup>2</sup>	Coeficientes de daño unitario con excesos de carga
A	0.0005	0.0005
B	2.5000	2.5000
C2	2.3997	5.4300
C3	1.8853	2.2900
T3-S2	3.3036	4.7800
T3-S3	5.2646	8.7800
T3-S2-R4	1.8560	1.9100

Tabla 2.2. Coeficientes de daño unitario

### 2.1.3. Proyecciones del tránsito

Hay cuatro consideraciones sobre la estimación del tránsito que pueden afectar significativamente el ciclo de vida de un pavimento:

- La exactitud de los valores de la carga equivalente utilizados para estimar el daño inducido por los ejes equivalentes.
- La precisión de la información sobre volúmenes y pesos del tránsito existente.
- La predicción de los ejes equivalentes para el período a evaluar.
- La intervención de la edad y el tránsito que afecta el nivel de servicio.

Es posible estimar el tránsito futuro en base a los siguientes indicadores:

- Crecimiento general de la economía.
- Diversificación del tránsito, si el camino es mejorado, vehículos que transitaban por una ruta paralela preferirán la rehabilitada.
- Tránsito generado, es el tránsito que se espera que surja solamente por el mejoramiento de una vía.

#### a) Cálculo de la tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento corresponde a la variación porcentual de la cantidad del último año de medición con respecto a la medición anterior.

<sup>2</sup> Idem. Valores promedio para todos los vehículos observados en el estudio de Pesos y Dimensiones

Para ello se hace un estudio tomando en cuenta las mediciones de TDPA de cada tipo de vehículo, suponiendo la siguiente relación:

$$TDPA = TPDA (1 + i)^t$$

Donde:

i = tasa anual de crecimiento de tránsito.

t = número de años entre primero y último de la muestra

El estudio de la tasa de crecimiento debe ser mucho más preciso, existiendo factores como localización de actividades, desarrollo regional, etc. Que pueden influir sobre la estimación original.

#### b) Proyección del tránsito

Para todo tipo de análisis sobre el comportamiento de los pavimentos se necesita conocer la cantidad total de ejes equivalentes que solicitará la carpeta de rodado, ya que van a ser cargas generadas por el tránsito, para ello se debe de calcular cual será la proyección del tránsito por tipo de vehículo, se necesita la tasa de crecimiento para cada uno de ellos en función de las condiciones del lugar y finalmente se debe calcular la cantidad total de vehículos que utilizarán la vía para obtener la solicitud total del tránsito a lo largo de todo el período de estudio.

## 2.2. Solicitaciones del medio ambiente

### 2.2.1. Solicitaciones sobre pavimentos de concreto

#### a) Efectos de la temperatura

Los cambios en la temperatura del medio ambiente originan variaciones en la temperatura a distintas profundidades de la losa.

El gradiente de temperatura varía con las oscilaciones de la temperatura diaria estacional; resultando en una desigual dilatación o contracción de las fibras paralelas a la superficie con la profundidad, lo que provoca el alabeo de la losa.

Este movimiento está parcial o totalmente impedido por el peso propio y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca tensiones; el alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la subbase, pudiendo aumentar con esta razón, las tensiones producidas por la acción de las cargas.

Las bajas temperaturas producen congelamiento ya sea en la superficie del camino como en la subbase y subrasante. Al existir problemas de congelamiento en la superficie del camino, el agua que pueda existir en juntas o en huecos del pavimento se expande generando tensiones que pueden producir grietas en el

pavimento, a esto se debe agregar el efecto que producen las sales utilizadas para impedir el congelamiento de la superficie, puesto que pueden existir reacciones químicas que deterioren el pavimento. Otro aspecto importante son las diferentes velocidades a las cuales se pueden congelar las diferentes capas del pavimento. Con respecto a las bases granulares, los efectos se acentúan en primavera cuando comienza el deshielo y el agua atrapada en los intersticios arrastra los finos fuera de la estructura. En el suelo de fundación existen problemas graves debido a los cambios volumétricos que experimenta y que pueden llegar a levantar el pavimento.

#### b) Efectos de la humedad

Las lluvias infiltran hacia la interfaz losa-subbase, produciéndose condiciones para el bombeo, erosiones y movilización de finos bajos las losas, que modifican las condiciones de apoyo y también influyen sobre la magnitud del gradiente hídrico al modificar las condiciones de humedad interna en el concreto.

En general tendremos las siguientes consecuencias:

- Cambio de volumen por variaciones de la humedad en la losa.
- Alabeo de las losas hacia arriba cuando la superficie está más seca, esto se puede solucionar utilizando bases de graduación abierta.
- Expansión del concreto.
- Transporte de contaminantes en grietas y juntas.
- Reducción de la resistencia y la estabilidad de la subbase y subrasante.
- Corrosión de los elementos de acero en el pavimento.
- Efectos sobre la resistencia al deslizamiento.

### 2.2.2. Solicitaciones sobre pavimentos de asfalto

#### a) Efectos de la temperatura

Producirá envejecimiento superficial de la capa de rodado

Efecto de altas temperaturas:

- Ablandamiento del asfalto (reduciendo el espesor).
- Reducción de la viscosidad del asfalto.

Efecto en bajas temperaturas

- Pérdida de flexibilidad
- Grietas por contracción

Al igual que en el caso del concreto, el efecto de las bajas temperaturas puede producir congelamiento tanto en la superficie como en las capas granulares y la subrasante, produciendo efectos muy similares a las explicadas en el punto anterior.

## b) Efectos de la humedad

Dependerá principalmente, de;

- Adherencia del asfalto con el agregado.
- Tipo de graduación (abierto o cerrado).
- Cantidad de huecos.
- Cantidad de asfalto.
- Espesor de la película de asfalto.

En general tendremos las siguientes consecuencias;

- Disgregación de la mezcla
- Transporte de contaminantes en grietas.
- Reducción de la resistencia y estabilidad de la base, subbase y subrasante.
- También afecta la resistencia al deslizamiento.

El agua se infiltra en la estructura del pavimento de diferentes formas, como grietas y juntas. Esta situación afectará las características físicas de la estructura ya que reduce la resistencia del material granular de las subcapas, debido al efecto de bombeo, el cual arrastra los finos fuera de las capas granulares, perdiendo paulatinamente la capacidad de soporte.

Por lo anterior se hace necesario contar con drenaje eficiente. En la Tabla 2.3 se muestra a los diferentes niveles de drenaje [AASHTO, 1993].

Calidad del drenaje	Agua removida
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	sin drenaje

Tabla 2.3.  
Condiciones de drenaje [AASHTO, 1993]

Para obtener un adecuado drenaje, se debería tener dos tipos de sistemas de drenaje:

- Subdren, que mantengan la estabilidad del soporte en pavimento
- Drenaje del agua superficial, remover el agua que presenta el peligro para los usuarios y que daña el pavimento.

En general para solucionar estos problemas, se recomienda:

- Un buen sistema de drenaje que permita la evacuación constante de las aguas.

- Un adecuado mantenimiento superficial, para evitar la infiltración del agua.

### 2.3. Efectos del tránsito y clima

La evolución del deterioro del pavimento debido a las solicitaciones de tránsito son muy distintas y rara vez se dan por separado, por lo cual es conveniente analizar las en conjunto. Para ello se desarrolló el concepto de nivel de servicio.

El nivel de servicio de un pavimento está expresado en términos del índice de Servicio (IS), desarrollado más adelante. Este término se obtiene de las medidas de rugosidad, por lo que se han desarrollado una gran cantidad de métodos que relacionan estas características con el índice mencionado.

Las ecuaciones específicas para calcular el Índice de Servicio deben ser modificadas, ya éstas fueron obtenidas en condiciones muy particulares y por lo general no presentan la realidad de la región que ésta estudiando, dentro de estas características podemos mencionar tipo y calidad de pavimentos, condiciones climáticas, tipo de vehículos, materiales utilizados en la construcción, etc.

Una vez que las ecuaciones han sido calibradas para la región, se definen índices de servicio inicial ( $P_i$ ) y final ( $P_f$ ), los cuales son usados para diseñar los pavimentos. Cabe destacar que un pavimento diseñado con un  $P_i = 4.5$  tendrá una vida útil mucho mayor que uno diseñado con un  $P_i = 4.0$ . El rango de variación del Índice de Servicio va de 5.0 (muy bueno) al 0 (muy malo), siendo necesario para el diseño estructural seleccionar un índice inicial y final dentro de estos rangos y que se ajusten a las características propias de construcción del área en la cual se empleará el proyecto. Los índices utilizados generalmente para pavimentos rígidos y flexibles son mostrados en la Tabla 2.4.

Pavimento	Índice de servicio inicial $P_i$	Índice de servicio final $P_f$
Rígido	4.5	2.5
Flexible	4.2	2.5

Tabla 2.4. Índices de servicio inicial y final para pavimentos [AASHTO 1993]  
(Nota. Estos valores dependerán específicamente de las características del área en que se realizará el proyecto)

El índice de servicio final pueden ser modificado, dependiendo del tipo de uso que se le da al pavimento, esto quiere decir que el índice puede ser menor que 2 por ejemplo, en el caso de que la carretera tenga una baja solicitación de tránsito, o bien que el camino no sea de gran importancia para la conectividad de la red. En definitiva, el índice de servicio final elegido quedará a criterio del diseñador.

En resumen los factores más influyentes en la pérdida de servicio del pavimento son el tránsito, la edad y el medio ambiente; sin embargo, los efectos producidos por separado y en conjunto son muy distintos. Es claro que las propiedades del pavimento cambian a medida que pasan los años, por lo que el índice de servicio tiende a bajar progresivamente.

En la figura 2.2. se observa como la curva 3 de evolución del Índice de Servicio es la suma de las curvas 1 y 2, siendo la pérdida de servicio total igual a:

$$\Delta IS = \Delta IS_{\text{Tránsito}} + \Delta IS_{\text{Medio ambiente}}$$

Para finalizar, se debe destacar que dentro del desarrollo del concepto del Índice de Servicio Actual y las ecuaciones, se han tomado en cuenta que las fórmulas son utilizadas en condiciones específicas y validadas dentro de la región donde se utilizarán.

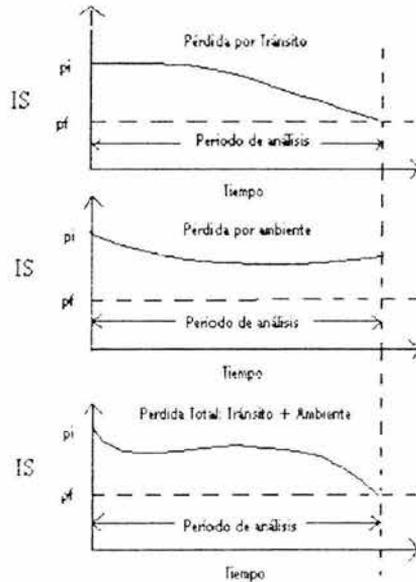


Figura 2.2. Índice de Servicio  
Efecto conjunto del tránsito y el medio ambiente [AASHTO, 1993]

## 2.4. Concepto de Nivel de Servicio

### 2.4.1. Índice de Servicio

Para evaluar la calidad de la superficie de las carreteras de nuestro país, durante muchos años se utilizó el método desarrollado en los años sesentas por la American Association of Highway Officials (AASHTO), el cual toma en cuenta un parámetro denominado Present Serviceability Index (PSI), mejor conocido en México como Índice de Servicio Actual (ISA).

El Índice o nivel de servicio actual consiste en calificar el grado de confort y seguridad que el usuario percibe al transitar por un camino a la velocidad de operación y lo realiza un grupo o panel de evaluadores. Cada evaluador debe calificar el camino de una manera subjetiva en una escala de 0 a 5 correspondiente a una superficie transitable y perfecta respectivamente. El resultado de cada sección de pavimento deberá ser reportado por separado, como el promedio del valor asignado por el grupo de evaluadores. La Tabla muestra la escala del ISA (Índice de Servicio Actual) y la calificación correspondiente a la condición del camino.

Este método ayuda a estimar (de una manera subjetiva) las condiciones en las que se encontraban algunos tramos carreteros en nuestro país, con rapidez sin interrumpir el flujo de vehículos. Este método tuvo gran difusión, debido también a que no se contaba con equipos de alto rendimiento para medición de la rugosidad en la superficie de rodamiento.

ISA	Condición del Camino
4 – 5	Muy Bueno
3 – 4	Bueno
2 – 3	Regular
1 – 2	Malo
0 – 1	Pésimo

Tabla. 2.5.  
Condición del Camino con respecto al Índice de Servicio Actual (ISA)

Dentro del estudio del Banco Mundial para el establecimiento de Índice Internacional de Rugosidad, se realizó la estimación de la evaluación subjetiva con el Método AASHTO y el Cálculo del Índice Internacional de Rugosidad, y se observó que existen amplias diferencias entre los valores de rugosidad de los grupos evaluadores de los diferentes países, así como los resultados de los equipos de medición de rugosidad.

El Banco Mundial recomienda que no se utilice la calificación del panel de evaluadores (ISA) para la obtención o correlación del Índice Internacional de Rugosidad, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es sentido (ISA), el otro es medido (IRI).

La medición de la calidad de un pavimento presenta una dificultad conceptual porque depende de para qué se está evaluando, si lo que interesa es la situación estructural, o bien la condición funcional de su superficie. Aunque esto se tenga resuelto, si no se utilizan herramientas o metodologías estandarizadas de evaluación, los resultados no serán comparables con las mediciones hechas por otra persona, ni entre un pavimento y otro.

- El pavimento debe proporcionar confort y seguridad al usuario.
- El confort y la calidad de rodado es un aspecto subjetivo o de opinión del usuario.
- El nivel de servicio puede determinarse a través de promedio de las evaluaciones de todos los usuarios.
- Hay algunas características físicas del pavimento que pueden medirse objetivamente y pueden relacionarse con las evaluaciones subjetivas.
- El comportamiento del pavimento puede ser representado por la historia del nivel de servicio que tenga dicho pavimento.

El procedimiento de medición del nivel de servicio que se utiliza actualmente gran parte del mundo fue derivado precisamente de los resultados de la prueba AASHTO, más otras incorporaciones y modificaciones que se han ido agregando en los últimos 30 años.

Calificación Numérica	Calificación Verbal	Descripción
5.0	Muy Buena	Solo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o reencarpetados durante el año de inspección normalmente se clasificarán como muy buenos.
4.0	Buena	Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a mostrar signos de vacíos y figuración aleatoria. Los pavimentos rígidos pueden estar empezando a mostrar evidencias de un leve deterioro superficial, como baches y fisuras menores.
3.0	Regular	En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altas velocidades de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir vacíos, parches y agrietamiento. Los pavimentos rígidos en este grupo pueden presentar fallas en las juntas, agrietamiento y escalonamiento.
2.0	Mala	Los pavimentos en esta categoría se han deteriorado hasta un punto donde se puede afectar la velocidad del tránsito de flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de agregados, agrietamiento y vacíos, ocurre en un 50% o más de la superficie. El deterioro en pavimentos rígidos incluye una separación de juntas, escalonamiento y agrietamiento.
1.0	Muy Mala	Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de extremo deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie.

Tabla 2.6.  
Determinación del índice de nivel de servicio en la prueba AASHTO

### 2.4.2. Índice de Servicio y su Curva de Comportamiento

La evaluación del comportamiento del pavimento implica ineludiblemente estudiar la respuesta funcional de un tramo o sección de camino. Para analizar este comportamiento funcional del pavimento se necesita información de la calidad de rodadura durante el período de estudio y de los datos históricos del tránsito que ha estado solicitando al pavimento durante ese período. La historia del deterioro de la calidad de rodadura o nivel de servicio es lo que se define como curva de comportamiento del pavimento

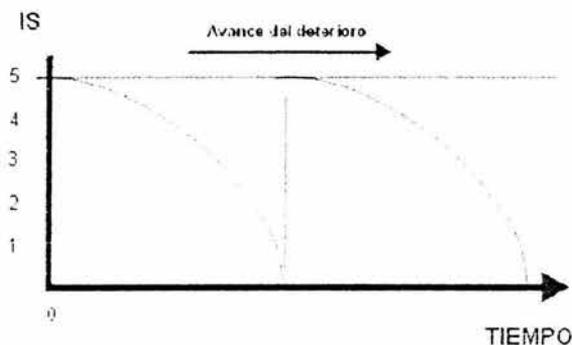


Figura 2.3.

Índice de Servicio, Curva de comportamiento de un pavimento

### 2.5. La Rugosidad de los Pavimentos

La rugosidad se define como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad de rodamiento, seguridad y costos de operación del vehículo. La regularidad superficial es una característica que se valora midiendo la geometría de longitudes de onda comprendidas entre 0.5 metros y 50 metros. Constituye uno de los parámetros más significativos para valorar el estado del pavimento, atendiendo a los aspectos de confort del usuario, consumo de combustibles, desgaste del vehículo, etc.

Cada tipo de irregularidad está relacionado con diversos efectos no deseados así por ejemplo, las ondas cortas y medias con amplitudes elevadas pueden ocasionar la pérdida de contacto entre el pavimento y la rueda, reducir la maniobrabilidad del vehículo (incluso en superficie seca), aumentar el consumo de combustible, etc.

## 2.6. Índice de rugosidad internacional (IRI)

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos de tipo respuesta, y que alguna manera sustituyera el método AASHO, ahora AASHTO, que permite calificar la condición superficial de un camino sólo en forma subjetiva.

El *Índice Internacional de Rugosidad*, mejor conocido como IRI (Internacional Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino. El Índice Internacional de Rugosidad tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y esta basado en un modelo llamado "Goleen Car".

El cálculo matemático del Índice Internacional de Rugosidad esta basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, Km. o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando este viaja a una velocidad de 80 Km. /HR. El IRI se expresa en unidades de Mm. /m, m/Km., in/mi, etc.

### 2.5.1. Características del Modelo

El modelo de Cuarto de Carro (Ver referencia No.28) utilizado en el algoritmo del IRI su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la figura 2.4, que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

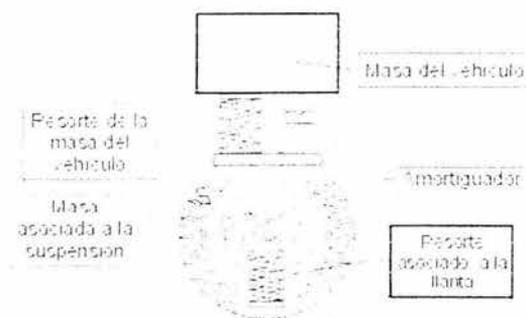


Figura 2.4.  
Representación gráfica del modelo "Cuarto de Carro"

El modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo de respuesta.

## 2.6.2. Escala de Índice de Rugosidad Internacional

La escala y las características involucradas en el IRI son las siguientes:

- Las unidades están en mm/m, m/km o in/mi.
- El rango de la escala del IRI para una camino pavimentado es de 0 a 12 m/km (0 a 760 in/mi), donde 0 es la superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. El figura 2.5 se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países.
- Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal, no influye en el valor del IRI, no así los cambios de pendiente.

$IRI = (m/km = mm/m)$

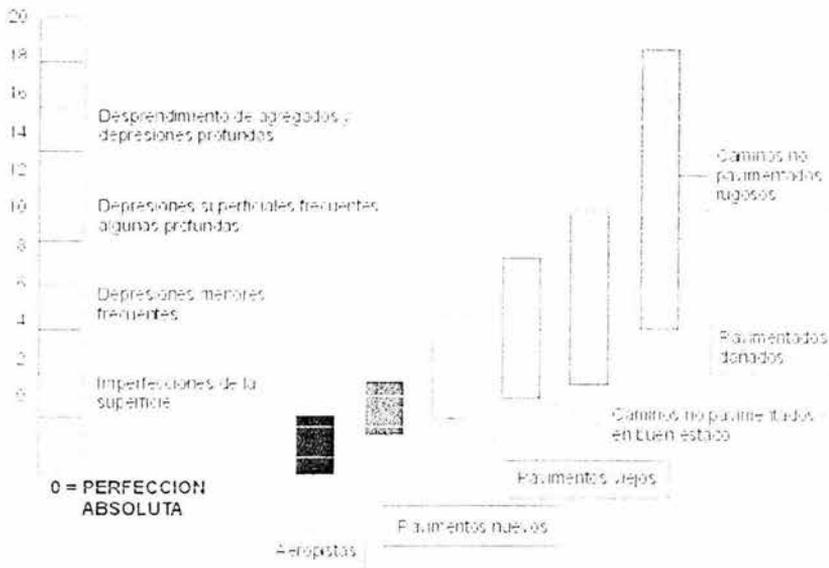


Figura 2.5. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos

En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, ha venido evaluando con este parámetro

algunos tramos de la Red Carretera Federal Libre de Peaje en 10 entidades federativas del norte y noroeste del país, pretendiendo evaluar la totalidad de la Red Carretera Federal. De la red de 18,207 km evaluados en el año 2002 se encontró que el 77% de ellos tenían un IRI <3, el 20.5% un IRI entre 3 y 5 y el 2.5% restante un IRI mayor que 5.

El comportamiento típico de la condición superficial de un pavimento respecto al tiempo se muestra en la Figura 2.6, en la que se observa que partiendo de un cierto valor del IRI, éste va decreciendo al paso del tiempo, como resultado de los avances de los deterioros en la superficie del pavimento, teniendo así una disminución de la calidad superficial.

Esta disminución no es lineal sino que se puede dividir en tres etapas, donde la primera tiene un deterioro poco significativo con el tiempo; la segunda presenta un deterioro más evidente que en la primera, y requiere comenzar a programar un mantenimiento para no dejar avanzar el deterioro; la tercera significa una etapa de deterioro acelerado, ya que en pocos años el nivel de servicio cae en forma importante.

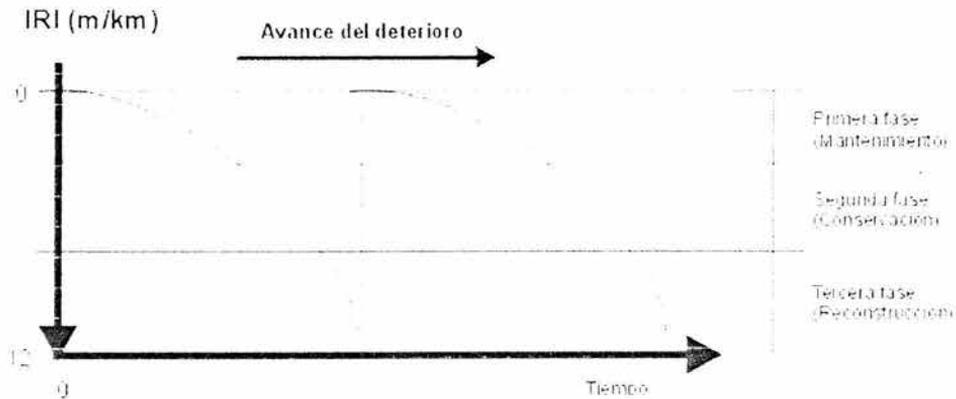


Figura 2.6. Gráfica típica del avance del deterioro de un camino respecto al tiempo

Es importante que en la evaluación de pavimentos contemplen este parámetro como un elemento más que ayude a definir con objetividad los trabajos que son necesarios llevar a cabo y con la oportunidad requerida, y así garantizar una buena calidad de servicio y la optimización de los recursos disponibles.

## 2.7. Equipos para evaluar el IRI

Como se mencionó anteriormente durante muchos años se evaluó el estado superficial en algunos tramos de carreteras en México con los métodos de la AASHTO. A la fecha este método aún se utiliza frecuentemente en México y en países o regiones donde no se cuenta con equipos para medir la rugosidad. En

algunos tramos de la red nacional se utilizaron en forma aislada (debido a su bajo rendimiento) los perfilómetros, que permiten medir las deformaciones verticales de las carreteras. Uno de estos equipos, llamado perfilógrafo Hveem desarrollado por el Departamento de Carreteras de California, ha sido utilizado con mucho éxito por Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) para normar las condiciones de regularidad de los pavimentos en los aeropuertos de México, con base en un índice de perfil mínimo especificado. Otros equipos de medición son los levantamientos con mira y nivel, el Perfilómetro de barra, el Face Dipstick, perfilómetro inercial y también la rugosidad se mide mediante sistemas calibrados por reacción. (Para más información de este tema ver la referencia No. 30)

Actualmente en el mundo existe una gran variedad de equipos de medición de la rugosidad, de diversos costos, rendimiento y sistemas de adquisición de datos. Cada uno de estos equipos tiene una escala de medición propia; por ello, con la correlación de todos estos equipos al Índice de Rugosidad Internacional, es posible obtener un solo parámetro de medición para conocer el estado actual de un tramo específico de una manera cuantitativa. Así mismo permite registrar la evolución de cada tramo año con año o a la frecuencia deseada.

Los equipos automatizados para la medición y evaluación de deterioros en pavimentos rígidos y flexibles permiten tener mejor consistencia y objetividad la información, como el Mays Ride Meter, lo que permite la normalización de los criterios para la evaluación de los daños. Los sistemas automatizados son de gran eficiencia si se relacionan con un buen sistema de administración de pavimentos. Después e la inversión inicial para adquirir los equipos, el costo de la auscultación automatizada se reduce considerablemente

Cálculo del IRI utilizando la viga móvil de tres metros

Debido a la inquietud de obtener un método alternativo para el cálculo del índice Internacional de Rugosidad en tramos de prueba que se realiza por medio del levantamiento topográfico con nivel y estadal, se utilizó el equipo denominado viga móvil de tres metros. Estos tramos de prueba sirven para la calibración de los equipos tipo respuesta, tales como el Mays Ride Meter con el que cuentan algunas dependencias de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y empresas particulares de México.

La viga de tres metros es un equipo móvil que se desplaza a la velocidad del operador (aprox. 2 Km. /HR) sobre la rodada del camino, el equipo registra sobre un papel graficador la diferencia de alturas entre el punto medio de una línea horizontal formada por la rueda delantera y la rueda trasera, con la altura de la parte central del camino, determinada por la rueda móvil. Esta diferencia de alturas se denomina el valor de la viga de tres metros.

## 2.8. IRI en la Red Carretera Nacional

La capa de rodadura de una carretera posee una serie de características técnicas y funcionales, obtenidas a partir de criterios y especificaciones de construcción. Su estado depende de la calidad inicial y del desgaste o deterioro producido por el tránsito y los factores climáticos, entre otros.

A nivel red, partiendo de las mediciones de rugosidad de un camino, se puede definir el estado de los pavimentos, mediante el Índice de Rugosidad, si se realiza un programa de evaluación anual en estos mismos caminos se puede llegar a conocer el comportamiento del deterioro a través del tiempo.

La conservación de carreteras ocupa un lugar muy importante entre las preocupaciones de los responsables de la infraestructura carretera. Los usuarios ya no se conforman actualmente con disponer de las vías de comunicación, sino que demandan que éstas les permitan desplazamientos rápidos, cómodos y económicos y seguros. El buen estado de la infraestructura carretera resulta vital para la eficiencia del transporte, el cual tiene una influencia preponderante en el estado general de la economía del país.

La rugosidad de un camino se ha convertido en uno de los factores que influyen de manera directa en los costos de operación de los vehículos, por ello fue necesario contar con una escala que permitiera correlacionar los valores dados por los diversos equipos existentes en el mundo para la medición de la rugosidad, por lo que se estableció en Índice Internacional de Rugosidad. En nuestro país es necesario implementar el IRI para una mejor evaluación del estado superficial de los pavimentos. Conviene dejar de evaluar subjetivamente las carreteras con el Índice de Servicio Actual. Para ello es nuestro país se cuenta con el equipo automatizado necesarios para empezar a obtener el IRI en la red nacional de carreteras.

Así es importante evaluar la condición superficial mediante el monitoreo periódico y permanente de la red nacional de carreteras, se recomienda que sea de manera anual.

Capítulo

# 3

ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Evaluación Estructural

## Capítulo 3. Evaluación Estructural

### 3.1. Antecedentes

Los pavimentos son diseñados para tener una duración determinada, comúnmente de 20 años, pero en general no son capaces de proveer un servicio apropiado, si no reciben conservación oportuna. Por esto existe la necesidad de llevar a cabo una evaluación de los pavimentos en que se determinen todas aquellas acciones de conservación o rehabilitación, las que aplicadas a través del tiempo permiten mantener un nivel de servicio adecuado, tanto en el aspecto estructural como en el funcional.

La conservación de los pavimentos significa la acción de cuidar que aptitud de servicio se prolongue durante el mayor tiempo posible, lo cual implica un esfuerzo de preocupación de los encargados y un desembolso de recursos eficiente.

El concepto de conservación de carreteras se ha sistematizado y ordenado en los últimos veinte años combinando todas las actividades de proveer y administrar pavimentos, su objetivo básico es usar información segura y consistente para desarrollar criterios de decisión respecto al tema, otorgar alternativas realistas y contribuir a la eficiencia en la toma de decisiones, para así conseguir un programa de acción económicamente óptimo y en el cual se provea una retroalimentación de las consecuencias de las decisiones tomadas, como medio de asegurar su efectividad.

Entre las actividades involucradas en la administración de pavimentos se encuentran: adquisición de información inicial, planificación y programación de mantenimiento, rehabilitación y nueva construcción, diseño de detalles de proyectos individuales y seguimiento periódico de pavimentos existentes.

Para evaluar la condición de un pavimento y poder determinar los mantenimientos y/o rehabilitaciones que se deben llevar a cabo, es necesario un suministro frecuente y fiable sobre el estado del pavimento, el cual debe ser obtenido mediante campañas periódicas de revisión.

La información recopilada debe ser producto de mediciones en la época adecuada y realizadas con equipos confiables, ya que determinar el tipo de rehabilitación o mantenimiento adecuado es de considerable importancia económica y cualquier error en la información puede producir grandes pérdidas por defecto o por exceso.

Para realizar un análisis más detallado de las diversas capas de un pavimento se necesita conocer algunas propiedades, tales como:

- Espesor de capas

- Módulos elásticos de cada capa (módulo elástico o la curva esfuerzo-deformación)
- Propiedades de fatiga tanto para la carga como para la temperatura
- Deformación permanente de cada capa
- Propiedades de suelo de cimentación

Esta información es necesaria para realizar predicciones realistas de la vida remanente de los pavimentos, diseño de carpetas y reciclado de capas, sin embargo, muchas de estas mediciones no se realizan en forma sistemática en la actualidad.

También es importante determinar las sollicitaciones a las que esta sometida el pavimento, ya sea de tránsito o climáticas. En el caso de tránsito, es necesario conocer las características como son: tamaños, pesos por ejes y flujos de los vehículos: Para las sollicitaciones climáticas, es importante obtener información sobre las condiciones ambientales (humedad y temperatura) donde se encuentra el pavimento.

En la actualidad, los datos producto de la revisión y estudio de las sollicitaciones, se utilizan en diversos propósitos tales como:

- a) Establecer prioridades: información de la condición como rugosidad, deterioro, resistencia al deslizamiento y deflexión, es usada para identificar los proyectos que necesitan rehabilitación o mantenimiento.
- b) Establecer un mantenimiento o estrategia de rehabilitación: información de deterioro visual, se usa para determinar planes de acción año con año.
- c) Predecir el comportamiento del pavimento: información como rugosidad, resistencia al deslizamiento, deterioro o índices combinados, son proyectados al futuro para asistir en proyectos de larga duración o para predecir el comportamiento de los pavimentos de una red.

La revisión estructural de carreteras es una técnica que proporciona un conocimiento detallado del estado de los pavimentos lo que permite efectuar el monitoreo de su comportamiento a través del tiempo y programar el mantenimiento de un modo más racional y más económico.

La metodología de revisión estructural ha ido variando con el tiempo en función de los continuos avances de la tecnología y se requiere que los nuevos equipos de medición permitan la evaluación sistemática de los parámetros característicos del pavimento, posibilitando un buen rendimiento operacional y que su trabajo infiera lo menos posible con el uso normal de la carretera.

Es importante destacar que los resultados que se incluyen, en su mayoría no son directos de la revisión estructural, sino que se obtienen de procesar la información entregada por ella.

- Evaluar capacidad de carga.
- Parámetros de resistencia de las diversas capas
  - Módulo elástico de las capas o curva de esfuerzo- deformación (Relaciones Constitutivas)
  - Propiedades de fatiga
  - Propiedades de deformación
  - Presiones residuales
- Evaluar la condición de la estructura de pavimento
  - Realizar predicciones realistas de la vida remanente de los pavimentos
  - Diseño de mantenimientos y reconstrucciones
  - Monitorear cambios de las propiedades de las capas en el tiempo
  - Evaluar transferencia de carga entre losas
  - Pérdida de soporte en las esquinas de la losa

La función estructural depende de la propia capacidad resistente (materiales y espesores), así como del estado o envejecimiento del pavimento, por lo que la revisión estructural debe incluir mediciones de deflexión y una inspección visual. Así podemos mencionar que los resultados de un evaluación estructural son los siguientes:

- Evaluar la capacidad de carga
- Diseñar las rehabilitaciones
- Realizar predicciones de vida remanente
- Detectar pérdida de soporte en las esquinas
- Monitorear cambios de las propiedades
- Retroalimentar los parámetros de resistencia de las capas

### 3.2. Características geotécnicas de las carreteras

El comportamiento de un pavimento no solo depende de las propiedades del suelo a nivel de la subrasante, también influyen las características de los cortes, terraplén, que pueden llegar a ser aspectos importantes dentro de la operación de la infraestructura.

La construcción de un camino supone la ejecución de movimientos de tierra con una sucesión de cortes y terraplenes que permitan entregar una rasante adecuada para la circulación de vehículos. Debido a que estas obras son muy extensas, durante su avance se encuentran condiciones topográficas y de suelos muy diferentes. No resulta posible detenerse en cada punto a realizar una verdadera investigación de suelos, como es el caso de las obras "concentradas". El ingeniero de caminos debe conformarse muchas veces con las reglas simples que le aseguren un comportamiento relativamente estable de las obras. En el diseño de las obras de tierra debe tenerse en cuenta una serie de factores que se conjugan; costos de construcción, costos de mantenimiento, seguridad del usuario, requerimiento en cuanto al mantenimiento permanente de la vía, etc.

Normalmente para el análisis de los problemas asociados a suelos se dividen en:

- Estabilidad de cortes
- Estabilidad de terraplenes

Cabe destacar que la ausencia de agua sea en forma de "Agua libre superficial" o de "Agua subterránea", representa un factor importante en los problemas de estabilidad y por lo tanto debe ser un aspecto de suma importancia al momento de diseñar, construir y operar la infraestructura vial.

### 3.2.1. Estabilidad de cortes

Existe una gran cantidad de clasificaciones que se pueden adoptar en relación a los movimientos de masas que ocurren en los cortes según se consideren la clase de material, tipo de movimientos, causas que lo originan, etc. El Comité para Investigaciones de Deslizamientos de Tierras, dependiente del Highway Research Board de Estados Unidos, estableció una división de tres grupos principales: desprendimientos, deslizamientos y flujos. Un cuarto grupo, deslizamientos complejos, es una combinación de los otros grupos indicados. A continuación se presenta una breve descripción de estos grupos.

- **Desprendimientos:** Tanto en los desprendimientos de roca como de suelo, la masa se mueve rápidamente a través de aire en caída libre. No existe un movimiento lento que preceda al desprendimiento. Se presenta principalmente en las rocas afectadas por desintegración y descomposición, fallando en planos o en superficies más débiles. Actualmente la mecánica de rocas no se encuentra suficientemente desarrollada en lo que respecta a las teorías cuantitativas, como ser usada en aplicaciones prácticas en diseño de taludes. Esta deficiencia es suplida por la experiencia.
- **Deslizamientos:** En los deslizamientos, el movimiento de la masa es el resultado de una falla corte a lo largo de una o varias superficies. Se presenta un material de comportamiento elástico o semiplástico.
- **Flujos:** En el movimiento del suelo designado como flujo, la masa de este tiene la apariencia de un líquido viscoso. El flujo puede ser de dos tipos: seco o húmedo.
  - **Flujo seco:** El flujo seco no es fácil de reconocer después que ha ocurrido pero resulta prácticamente imposible de predecir en forma anticipada. Es muy común en arenas uniformes y limos de textura uniforme. Se presenta también en roca fragmentada (como de rodado) característico de zonas montañosas. El flujo seco se activa normalmente por movimientos sísmicos u otro tipo de vibraciones, impactos o debilitamientos de alguna sección tal talud por erosión. Es usual observarlos durante el secamiento de taludes de arenas que se mantenían estables debido a la cohesión aparente proporcionada por la humedad. En general, es suficiente una capa cohesiva relativamente

delgada para estabilizar este tipo de taludes. Si esto no es económicamente factible, puede construirse un semitúnel.

- *Flujo húmedo*: El flujo húmedo ocurre normalmente en suelo tipo de arenas finas y limos. Se genera por exceso de agua que hace perder al suelo su estabilidad interna. Normalmente se inicia debido a lluvias de gran intensidad o derrames concentrados de agua y se hace presente en los sectores donde ha sido removida la capa vegetal del suelo. La protección del camino para estos casos se logra estabilizando el talud con el suelo vegetal, productos asfálticos o materiales de cemento. Además deben sellarse las posibles grietas del terreno y evitar el agua de derrames sobre el talud mediante la construcción de contrafosos.

### 3.2.2. Estabilidad de Terraplenes

La estabilidad de los terraplenes o rellenos de obra viales puede ser afectado por diferentes causas. Prevenir los daños correspondientes significa normalmente adoptar métodos de diseño y constructivos de menor costo que los que generalmente se utilizan cuando las fallas han tenido lugar.

De acuerdo a las observaciones del comportamiento de terraplenes a través de todo el país, se propone la siguiente clasificación de las fallas observadas:

- Erosión y deslizamientos locales en taludes
- Desplazamientos en laderas de cerros
- Asentamiento por disminución de vacíos del suelo de relleno
- Hundimiento por consolidación del suelo de cimentación
- Flujo plástico del suelo de cimentación
- Asentamiento por vibraciones y licuación del suelo

No se indica en la lista anterior un posible deslizamiento, por falla al corte del terraplén debido a que las normas de construcción de terraplenes prácticamente impiden que esto ocurra, tanto por la inclinación que se da a los taludes como por el grado de compacidad que se exige al suelo de relleno. En todo caso, si se existiera algún riesgo de esta naturaleza, puede verificarse según los métodos indicados para estabilidad de taludes.

- ***Erosión y deslizamientos locales en taludes***: Este tipo de fenómeno se manifiesta debido a fallas por corte de desplazamiento y grietas de tensión en el coronamiento del terraplén. Su causa principal es la acción del agua superficial, en el material de relleno, produciendo los siguientes efectos:
  - Disminución de la resistencia del suelo por efecto del agua
  - Aumento de peso de la masa de suelo
  - Generación de presión hidrostática y fuerzas de flujo
  - Debilitamiento de la superficie resistente al corte, por socavación.

- **Desplazamiento en laderas de cerros:** La construcción de terraplenes sobre planos inclinados trae normalmente acompañando problemas de deslizamientos de masa de suelo. La experiencia nos indica que para pendientes mayores de 1:5 (V/H), ocurren anomalías de este tipo. La razón de ello es que durante la construcción del terraplén se produce debilitamiento en el plano de contacto entre el suelo natural y el terraplén, agravado por la acción del agua (bloqueo del drenaje natural del cerro). Este fenómeno es particularmente claro en secciones mixtas (corte-terraplén), donde la sección de corte permanece estable.
- **Disminución de los vacíos del suelo de relleno:** Durante el proceso de compactación de rellenos para terraplenes se produce una importante reducción de vacíos en la masa del suelo. Este acomodo de las partículas sólidas continúa largo tiempo, aún después que el proceso mecánico de compactación se termina, traduciéndose en una deformación superficial de la rasante del camino. La magnitud de esta deformación depende básicamente de dos factores; *grado de compacidad inicial y altura del terraplén*.
- **Hundimiento por consolidación del suelo de cimentación:** La consolidación de un terraplén sobre la superficie del terreno genera un aumento de las presiones efectivas en las capas subyacentes de suelo. Si éste es de carácter compresible, la sobrepresión impuesta ocasiona una disminución de volumen con expulsión de agua de los poros. El cuantificar la magnitud de los asentamientos superficiales debido a este efecto supone, por una parte, calcular correctamente la sobrepresión impuesta por el peso del terraplén a diferentes profundidades y, por otra, aplicar la teoría y ensayos de suelo que sean más representativos.
- **Flujo plástico del suelo de cimentación:** Este fenómeno es característico de los suelos blandos o de baja consistencia y se presentan como una deformación continua, derivada de un esfuerzo de corte constante. Esta forma de falla ocurre por una concentración de esfuerzos en un punto del suelo. Se manifiesta como hundimiento del terraplén acompañado del levantamiento del terreno adyacente. Debe recordarse que a diferencia de la consolidación, la deformación o cambio de forma del suelo se produce sin disminución de volumen.
- **Asentamiento por vibraciones y licuación del suelo:** Es sabido que determinados suelos que son sometidos a sollicitaciones dinámicas, tales como vibraciones, impactos, sismo, etc. Tienden a intensificarse disminuyendo de volumen. Si estos suelos tienen baja permeabilidad, la tendencia a la densificación se traduce en un incremento de presión en la fase fluida, que puede crecer hasta un punto en que iguale a la presión total, llegando a anular a la presión efectiva o presión de contacto entre los granos. En estas circunstancias un suelo de características granulares pierde totalmente su capacidad de soporte. En el caso de las arenas finas y limos sueltos saturados, el aumento de presión en la fase fluida que no alcanza a drenar durante el corto tiempo que dura una carga trasciende, puede llevar al suelo transitoriamente al estado de licuación con el consiguiente hundimiento de las estructuras apoyadas en él.

### 3.3. La Deflexión como parámetro de la Evaluación Estructural

Deflexión es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga y es función no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. La medición de ella, generalmente se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

Es importante destacar que no sólo desplaza el punto bajo la carga, sino que un sector alrededor de ella, causando un conjunto de deflexiones, el cual se denomina cuenco.

Para llevar a cabo la medición del cuenco de deflexiones de un pavimento existen diversos equipos, cuyo procedimiento general es el de aplicar una carga sobre el pavimento, midiendo la deformación producida en la superficie de él en diversos puntos ubicados a distintas distancias de la carga.

Los primeros usos de la información de deflexiones, involucra la deflexión máxima de la carga. Usualmente se consideraba un nivel de deflexión tolerable para una sección de pavimento bajo un tráfico determinado. Además se utilizaba un reencarpeteo para llevar las deflexiones a un nivel tolerable. Con una dirección hacia un análisis y diseño mecanicista de los pavimentos, el cual se basa en los principios fundamentales de la física, el uso de la información de deflexión ha empezado a ser más sofisticado. En la actualidad, las mediciones de deflexiones tienen diversos usos:

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de las zonas débiles y/o deterioradas
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de recarpeteos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimiento para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la administración de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.

Es importante hacer notar que el uso de las deflexiones como una medida directa de la capacidad estructural de un pavimento debe ser evitada, ya que puede incluir errores, en lugar de ello las deflexiones deben ser utilizadas para calcular los módulos de las capas, y a través de ellos calcular las deformaciones y tensiones, las cuales pueden ser utilizadas para evaluar la capacidad estructural o la vida remanente.

Lo anterior se debe a que la mayor parte del deterioro estructural de un pavimento es causado por los esfuerzos y deformaciones en las distintas capas de

materiales que lo constituyen, por lo que la deflexión es sólo una variable del problema.

Debido a la amplia gama de métodos de revisión, no es fácil establecer que técnicas y equipos de medida son más recomendables, y que frecuencia mínima es necesaria o posible con los medios disponibles. Además todavía no se ha logrado a nivel mundial el desarrollo de técnicas de medida de gran velocidad.

Existen diversos métodos para medir la deflexión de un pavimento, por tal razón existen diversas clasificaciones, siendo las más importantes según la posición donde se miden, la forma de aplicar la carga, y el tipo y número de sensores para realizar las mediciones, a continuación se señalan algunas clasificaciones:

- Lugar donde se realizan las mediciones.
  - Dentro del cuenco
  - Fuera del cuenco
- Forma de aplicar la carga
  - Estática o de movimiento lento
  - Vibración
  - Impacto
  - Propagación de ondas
- Tipos de sensores
  - Geófonos, miden la velocidad del desplazamiento de la superficie del pavimento
  - Acelerómetros, miden la desaceleración de la superficie del pavimento
  - Transformadores diferenciales de voltaje inicial (LVDT), miden los Desplazamientos de la superficie del pavimento.

Debido a la importancia en la representatividad de la deflexión medida, la clasificación más usada es según el tipo de carga, describiéndose a continuación en distintas categorías.

- Estática o movimiento lento
- Vibración
- Impacto

#### Estática o Movimiento Lento

Carga estática o de movimiento lento corresponde a la primera generación originada, básicamente, con el desarrollo de la viga Benkelman. Estos equipos proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga fija o de movimiento lento.

Para su uso, generalmente necesitan un vehículo cargado para lograr la sollicitación del ensayo. Consumen mucho tiempo y una labor intensiva. Entre estos equipos se encuentran:

*Base profunda:* La base profunda corresponde a un pozo de tres metros de profundidad desde la superficie del pavimento, en el cual se instala un medidor de deflexión anclado al fondo de él. Su objetivo es obtener una medición de deflexión absoluta del pavimento.

*Viga Benkelman:* Este equipo opera en base al principio de la palanca, debe ser usado con un camión cargado, normalmente 80 kN e un eje, con las ruedas infladas a una presión de 0.48 a 0.55 MPa. Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo el rebote cuando el vehículo se aleja. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador, en este método la punta de la viga se coloca a 1.20 metros adelante del par de ruedas, se toma una lectura inicial. Al cruzar el camión se toma la lectura máxima y una final de parámetro.

*Deflectómetro Lacroix:* El deflectómetro Lacroix consiste en un camión con peso estándar en su eje posterior cuya separación entre ejes es de 6.75 metros. En él, van montadas dos vigas similares a la de Benkelman. La forma de medir es similar a la de Benkelman.

*Curviámetro:* Consiste en un pequeño equipo para medir deflexión sobre una longitud de cuatro metros, él va montado sobre un camión de dos ejes, con el cual se puede aplicar una carga entre 80 y 130 kN. Las medidas se realizan a una velocidad de de 18 km/h y se repiten cada 5 m.

La siguiente generación de equipos involucra la aplicación de cargas dinámicas vibratorias. Estos equipos son más móviles y más productivos que los equipos estáticos e hicieron la medición de deflexiones una rutina para inspeccionar los pavimentos.

Las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática; por lo tanto estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el pavimento. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro.

Una ventaja de este tipo de equipos sobre los estáticos, es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal de este método es que las cargas reales que transitan por los pavimentos tienen el mismo comportamiento que las que aplican a ellos. Entre los equipos más característicos se encuentran:

*Dynaflect ( electro – mecánico ):* Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplica un rango de fuerzas entre picks de 1000 lbs. Para medir las deflexiones cuenta con 5 transductores de velocidad ubicados a 0, 12, 24,

36 y 48 pulgadas respectivamente. Es fabricado por una empresa americana Geolog Inc.

**Road Rater ( electro-hidráulico )** . Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas, con él produce un rango de frecuencias entre 5 y 60 Hz. Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad. Es fabricado por Foundation Mechanics, Inc.

**WES Heavy Vibrator:** Fue desarrollado por Coros of Engineers USA, para la evaluación de pavimentos de aeropuertos. El aplica una precarga de 71 kN, con una carga vibratoria de 130 kN a una frecuencia de 15 Hz. Este equipo no esta disponible en el mercado.

Se incluyen los equipos que entregan una carga de impacto que trasciende sobre el pavimento. Variando el peso y la caída se pueden generar diferentes cargas de impacto. La ventaja principal de estos equipos es su mecanismo de carga, ya que permite modelar bastante bien la magnitud como la duración de una carga real del tránsito.

Los deflectómetros de impacto aplican un impulso que simula medio seno, con un pick mínimo de fuerza de 5° kN, con una duración de impulso de 20 a 60 m y un tiempo de caída en el rango de 10 a 30 m. para realizar las mediciones de deflexiones se utilizan geófonos o transductores de velocidad (Dynatest, Phoenix, Foundation Mechanics) y sismómetros.

Las mediciones se obtienen muy rápidamente, con la capacidad para medir deflexiones absolutas a través de un ensayo no destructivo.

Los procedimientos para estimar el módulo de un material tienen implícitos supuestos de rangos de valores de temperatura, frecuencia de carga, entre otros. Debido a la importancia de estos factores es necesario describir como influyen en las mediciones, ya que pueden inducir a errores al momento de interpretar los resultados.

Debido a lo significativo de los gradientes de temperatura de México, es necesario normalizar las deflexiones de acuerdo a la temperatura en que se realizaron las mediciones. La importancia de ello radica en que durante el transcurso de un ciclo diario las losas experimentan variaciones en las deflexiones por efectos en los cambios térmicos y la condición termo sensible de los asfaltos, que aumenta la deflexión del pavimento para las mismas condiciones de carga.

En el caso de los pavimentos asfálticos se han desarrollado métodos para corregir la deflexión máxima, los cuales definen como normalización de deflexiones. Ellos se utilizan para transformar el valor de deflexión obtenida en determinadas condiciones de carga y temperatura, al valor que correspondería a una temperatura de referencia.

Otro aspecto importante de considerar con respecto a la temperatura es el estado térmico del pavimento, ya que para una temperatura medida a una cierta profundidad, pueden existir dos condiciones completamente diferentes. Se puede dar el caso que la temperatura a más profundidad sea mayor o menor que la medida, lo que implica un comportamiento totalmente diferente en la respuesta estructural del pavimento.

La humedad puede afectar las mediciones de las deflexiones debido a su influencia en las bases, subbases y subrasantes, ya que algunos materiales con los que se construyen o están en terreno pueden ser sensibles a su presencia. El contenido de humedad es probablemente el factor más importante en el módulo de los materiales no ligados.

Su efecto depende del tipo de suelos:

**Suelos finos:** La humedad influye en la respuesta debido a que su comportamiento depende del grado de humedad que posean. Los principales factores que influyen en ellos son la presión de poros, los sistemas de cohesión electrolítica entre la arcilla y el agua, y el grado de saturación.

**Suelos granulares:** El comportamiento de este tipo de suelos depende fundamentalmente del roce en la interfase entre las partículas que lo componen, el cual depende del grado de humedad que exista. También las carpetas de rodado, tanto asfálticas como de concreto, son afectadas con la presencia de humedad.

El efecto del tiempo de carga o la frecuencia con que es aplicada, tiene una gran influencia en los valores obtenidos a partir de las mediciones, por ejemplo:

**Materiales ligados con asfalto:** Están fuertemente influenciados por el tiempo de carga debido a la naturaleza visco-elástica de este material. Este efecto se reduce a bajas temperaturas.

**Materiales ligados con cemento:** El módulo dinámico para materiales cementados puede ser aproximadamente el doble del módulo estático si la frecuencia de carga es muy alta, este efecto se reduce a medida que el módulo aumenta.

Los equipos para medir deflexiones cuyos puntos de referencia quedan ubicados dentro del cuenco de deflexiones, generalmente son afectados por el desplazamiento de la superficie del pavimento. Entre ellos se encuentran principalmente los estáticos o de movimiento lento, ya que sus puntos de referencia se desplazan al momento de aplicar la carga, por ejemplo: Viga Benkelman y Deflectómetro Transitivo.

Con el fin de corregir este efecto se realiza una corrección geométrica, la cual tiene por objetivo poder relacionar las medidas de deflexiones que registran los

equipos con la deflexión real del pavimento. Existe un método para encontrar la deflexión absoluta en pavimentos asfálticos esto en función de la geometría del dispositivo de medición, de la carga aplicada y del módulo de elasticidad del suelo de fundación:

$$d_0 = \delta_0 - \delta_a + \frac{0.84 W}{3.1416a E_s}$$

Donde:

$d_0$  = deflexión máxima absoluta.

$\delta_0$  = deflexión relativa del punto ubicado bajo la carga, registrado por el dispositivo de medida.

$\delta_a$  = deflexión relativa del punto ubicado a una distancia  $a$ , registrado por el dispositivo de medida.

$W$  = carga aplicada por la rueda.

$E_s$  = módulo elástico del suelo de fundación.

Los diversos factores que afectan las mediciones, hacen que la comparación entre los distintos equipos sea muy difícil, requiriéndose de regresiones que relacionen sus valores.

### 3.4. Métodos de evaluación estructural

La información de las deflexiones, como los resultados producto del análisis, tienen una gran variedad de aplicaciones en los distintos niveles de la administración de pavimentos. Siendo muy importantes para definir la condición del pavimento a lo largo del proyecto, a fin de determinar áreas que requieran tratamientos u otras opciones de rehabilitación.

Las aplicaciones prácticas de la información proporcionada por la evaluación estructural pueden ser agrupadas, dependiendo del nivel en el cual se aplique o del objetivo que se persiga con su utilización. A continuación se mencionan algunas aplicaciones:

#### Aplicaciones a nivel de red

Dentro de este nivel se encuentran todas aquellas aplicaciones orientadas a obtener información sobre el estado de las redes carreteras y caminos con el fin de realizar una buena evaluación de ellos.

*Identificación de secciones uniformes:* La evaluación de los pavimentos permite obtener muy buena información sobre el estado estructural del pavimento y de cada una de sus capas. A través de ello es factible determinar cambios en la capacidad estructural de los tramos, los cuales se pueden deber a:

- Cambio de tipo de pavimento

- Deterioro
- Variación de espesores
- Cambio de la subrasante

*Características estructurales:* Dentro de la información que se obtiene en base a las mediciones, se pueden nombrar algunas que son de mucha importancia al momento de caracterizar estructuralmente el estado de un pavimento. Ejemplos de ellos son:

- Deflexión máxima
- Propiedades de la subrasante
- Propiedades de las capas superiores

#### Aplicaciones a nivel proyecto

En este nivel se incluyen las aplicaciones que se pueden realizar es un proyecto específico, donde se necesita información detallada sobre el estado actual del pavimento. Dicha información es indispensable para poder determinar que mantenimiento corresponde a realizar y en qué momento corresponde se deben realizar. Además se utiliza para definir el diseño del mantenimiento estructural a aplicar. La caracterización de las capas según sus parámetros de resistencia estructural es indispensable al momento de diseñar una medida de mantenimiento.

La evaluación estructural, permite realizar diversos estudios sobre la capacidad de los pavimentos, entre ellos se encuentran:

- Capacidad estructural
- Vida remanente
- Diseño de reencarpetados

El control se puede realizar en las diversas etapas del proceso constructivo a través de cual se puede obtener información para definir la uniformidad del proyecto y si se ha cumplido con la capacidad estructural de diseño.

- Mediciones directas sobre la subrasante
- Mediciones directa sobre la base y subbase (granular o tratada)
- Mediciones sobre la superficie de rodadura

Con respecto a la administración de los pavimentos a lo largo de su vida, la evaluación estructural permite realizar un seguimiento de ellos para definir cuando se requiere un mantenimiento estructural. Para ello existen dos metodologías de seguimiento:

- Tramos testigos. Comportamiento de un tramo en un período de varios años.

- Método de las ventanas. Comportamiento de varios tramos con características similares pero con distintas edades.

Con equipos de alta precisión, con tecnología de punta en evaluación de pavimentos, es posible realizar una serie de investigaciones en el área de caminos que antiguamente no se podía hacer. A continuación se mencionan algunas de las posibles investigaciones que son factibles de realizar:

- Variación de propiedades a causa de cambios climáticos
- Estudios de correlaciones

La gama de aplicaciones de la evaluación estructural es muy amplia, por lo cual es difícil abordarlas todas en profundidad. Se han seleccionado algunas de ellas debido a su importancia, las cuales serán brevemente descritas a continuación.

Con respecto a la caracterización de las capas (retro-análisis) y estudios específicos en pavimentos de concreto, se recomienda la utilización de equipos especializados.

Con la información obtenida a partir de las medidas de las deflexiones y el posterior análisis de ellas, se puede evaluar el pavimento a lo largo del proyecto y subdividirlo en tramos de igual resistencia estructural (AASHTO, 1993). Se pueden determinar tramos que presenten distintos comportamientos estructurales, para lo cual se utilizan los distintos criterios:

- Dispersión de las mediciones
- Diferencia en los valores medidos obtenidos

Para realizar la tramificación se pueden utilizar diferentes parámetros, por ejemplo la deflexión máxima ( $d_0$ ) o el módulo de reacción de la subrasante (valor  $k$ ).

Existen diversos parámetros que se han desarrollado a partir de las mediciones de deflexiones (Figura) La mayoría de ellos, pretende otorgar un valor que sea representativo del estado de la estructura del pavimento. En general, estos parámetros no son muy exactos pero sirven para obtener una visión general de un proyecto.

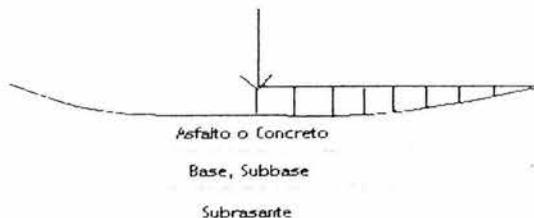


Figura 3.1

Cuenco de Deflexiones

Ellos se basan en la forma del cuenco de deflexiones para obtener valores que puedan ser utilizados para determinar cambios en la estructura a lo largo del proyecto de estudio.

Deflexión máxima normalizada:

$d_o$  normalizada =  $d_o$  carga aplicada / carga normalizada

$$\text{AREA} = 6 \left[ 1 + 2(d_{12}/d_o) + 2(d_{24}/d_o) + (d_{36}/d_o) \right] \text{ (pulg)}$$

Índice de Curvatura de la Superficie:

$$\text{SCI} = d_o - d_{12}$$

Donde:

$d_o, d_{12}, d_{24}, d_{36}$  = corresponde a las deflexiones medidas a 0, 12, 24, 36 pulgadas respectivamente.

Todos estos parámetros se tienden a enfocar en cuatro grandes áreas que se describen con la Deflexión máxima normalizada que corresponde a la deflexión medida, el área como parámetro provee una buena estimación de la rigidez relativa de la sección del pavimento, particularmente de las capas ligadas, debido a que es muy insensible a la rigidez de la subrasante, el índice de curvatura de la superficie permite reflejar la rigidez relativa de las capas superiores de un pavimento.

Dentro del análisis estructural se encuentran los estudios de vida remanente, capacidad estructural y diseño de reencarpetados. Para realizar los estudios existen diversos métodos, los cuales se orientan a predecir y solucionar fallas estructurales que ocurren en los pavimentos. Por lo tanto, no sirven para analizar problemas producto de fallas funcionales.

Los métodos se pueden dividir en empírico y mecanicista empírico. Es importante escoger el método de evaluación estructural en función del método de diseño que se utilice para ser consecuente con la teoría que existe en el desarrollo de ellos.

La mayoría de los procedimientos de diseño utilizados son empíricos, en donde el criterio de falla está basado en un ser determinado de condiciones, por ejemplo: tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales. Un ejemplo de ellos es el método AASTHO. El otro tipo de métodos son los mecanicistas, basándose en relaciones físicas para determinar la reacción de las estructuras cargadas. Estos métodos solo mecanicistas en realidad no existen, sino que generalmente se combinan con los empíricos, en donde se incorporan

elementos de aproximación de ambos métodos, los cuales se denominan mecanicista-empíricos. Donde la componente mecanicista está en la determinación de la respuesta estructural del pavimento como son tensiones, deformaciones y deflexiones dentro de las capas del pavimento, a través del uso de modelos matemáticos y la parte empírica se utiliza para relacionar estas respuestas con el comportamiento del pavimento.

### Método AASHTO

El método AASHTO [AASHTO 1993] consiste, fundamentalmente en estimar la capacidad requerida para soportar el tráfico futuro, evaluando la capacidad de soporte actual, para así determinar la deficiencia en ella para soportar cargas futuras a través de la siguiente fórmula.

$$SN_{oi} = a_d D_{oi} = SN_f - SN_{eff}$$

$SN_{oi}$  = Número estructural requerido para el reencarpetado

$a_d$  = Coeficiente estructural para el reencarpetado

$D_{oi}$  = Espesor requerido para el reencarpetado

$SN_f$  = Número estructural requerido para soportar el tráfico futuro

$SN_{eff}$  = Número estructural efectivo del pavimento existente

El concepto que existe detrás de este método se ilustra en la figura:

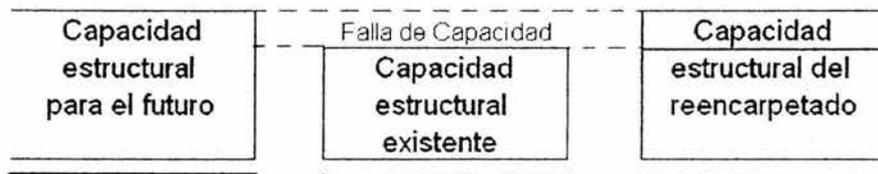


Figura 3.2  
Efecto de un reencarpetado en la capacidad estructural

Para evaluar la capacidad de soporte la guía AASHTO presenta tres métodos:

- Capacidad estructural, basada en inspecciones visuales y ensayos de materiales.
- Capacidad estructural, basada en ensayos de deflexión no destructivos.
- Capacidad estructural, basada en el daño por fatiga producto del tráfico.

Al estimar la capacidad estructural en base a mediciones de deflexión por medir de cargas de impacto, se está evaluando la repuesta estructural del pavimento

en terreno ante las cargas reales de tránsito, por lo tanto este método es el más realista de los propuestos por AASHTO.

Los métodos para evaluar la capacidad, basados en mediciones de deflexiones no destructivas, para pavimentos de asfalto y concreto.

### 1. Pavimentos asfálticos

El método para determinar el número estructural efectivo ( $SN_{eff}$ ), mediante ensayos no destructivos, asume que la capacidad del pavimento es una función de su espesor total y de su rigidez, siendo definido por la siguiente ecuación.

$$SN_{eff} = 0.0045 D^3 \sqrt{E_p}$$

$SN_{eff}$  = Capacidad estructural en pulgadas

$D$  = Espesor de todas las capas sobre la subrasante en pulgadas

$E_p$  = Módulo efectivo del pavimento sobre la subrasante en psi.

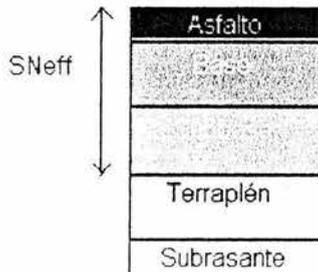


Figura 3.3  
Capas incluidas en el  $SN_{eff}$

### 2. Pavimentos de concreto

Para determinar el espesor efectivo del pavimento de concreto Figura la guía AASHTO plantea la siguiente ecuación:

$$D_{eff} = F_{jc} F_{dur} F_{fat} D$$

$D_{eff}$  = espesor existente de la losa de concreto el pulgadas

$F_{jc}$  = factor de ajuste de grietas y juntas

$F_{dur}$  = factor de ajuste por durabilidad

$F_{fat}$  = factor de ajuste por daño debido a fatiga

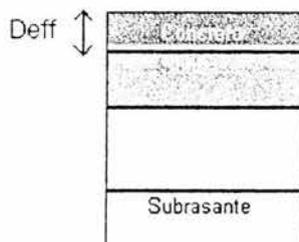


Figura 3.4  
Capas incluidas en el  $D_{eff}$

#### Vida estructural remanente y capacidad estructural

Por vida remanente y capacidad estructural se entiende la resistencia que poseen los pavimentos para soportar las cargas de tráfico. Siendo la diferencia entre ellas las unidades en las cuales se expresan, la vida remanente se expresa en años y la capacidad estructural en número de aplicaciones.

Para el cálculo de la vida remanente y capacidad estructural estos métodos asumen conocidas las características del pavimento y el tipo de solicitaciones.

Como primera etapa, se debe calcular el número de aplicaciones de carga para el cual se produce la falla de pavimento ( $N_f$ ). Luego se debe estimar el número de cargas aplicadas hasta el momento ( $n$ ), definiéndose el daño acumulado en el pavimento según la siguiente fórmula:

$$D = \frac{n}{N_f}$$

Cuando alcanza un valor igual a 1 significa que el pavimento ha fallado.

#### Diseño de reencarpetados

En el caso de diseño de reencarpetados se dan por conocidos el tipo de solicitaciones y el número de cargas que se aplicarán al pavimento. En base a ello, se calculan las características de la estructura del pavimento.

Existen diversos métodos de diseño mecanicista empíricos para reencarpetados, entre ellos se incluyen;

- Asphalt Institute MS-1
- Método SHELL para pavimento de asfalto
- Procedimiento PCA (Portland Cement Association) para pavimentos de concreto.

Cálculo de Nf

Pavimentos asfálticos

En pavimentos asfálticos el número de ciclos para la falla depende, fundamentalmente, de dos tipos de deterioro, el agrietamiento piel de cocodrilo (fatiga) y el ahuecamiento.

Agrietamiento piel de cocodrilo

El origen del agrietamiento se debe, fundamentalmente a las deformaciones horizontales producidas en la base del asfalto siendo un índice del grado de fatiga del pavimento asfáltico. La resistencia a la fatiga se puede calcular según la siguiente fórmula planteada por Finn et al. (1986), donde se define como un 10% del área de agrietado.

$$\log N_f = 15.947 - 3.291 \log \left( \frac{e}{10^{-6}} \right) - 0.854 \log \left( \frac{E}{10^3} \right)$$

Donde:

Nf = número de aplicaciones para que se produzca un agrietamiento del 10% de la huella.

e = deformación unitaria horizontal en la base de la superficie del asfalto

E = módulo elástico del asfalto

Hundimiento

El hundimiento, se debe fundamentalmente a las deformaciones verticales producidas en la superficie de la subrasante. Su resistencia a la fatiga se puede calcular según la siguiente fórmula planteada por la U.S. Army Corp of Engineers [ERES consultans, 1994].

$$N_f = \left( \frac{0.005511}{e} \right)^{6.527}$$

Donde:

Nf = número de aplicaciones para que se produzca un ahuecamiento de 0.205 Pulgadas.

e = deformación unitaria vertical en la superficie de la subrasante.

El criterio de falla más utilizado en pavimentos rígidos es el relacionado con la fatiga por agrietamiento, la cual depende fundamentalmente del coeficiente de tensiones, definido como las tensiones inducidas debido a las cargas aplicadas divididas por el módulo de ruptura. Existen diversas fórmulas para calcular el número de cargas que es capaz de soportar un pavimento de concreto, un ejemplo de ello es la fórmula que se muestra a continuación, desarrollada por Salsilla R. et al. (1993).

$$\log N = \left( \frac{-5.367}{0.0032} \frac{-SR \log(1-P)}{0.0032} \right)^{0.2276}$$

Donde:

SR = coeficiente de tensiones ( $\sigma_t/MR$ )

P = probabilidad

### 3.5. Control de Calidad

Con la nueva generación de equipos de medición, se incorpora una nueva alternativa para estudiar la calidad de la obras viales ya que debido a la rapidez y a capacidad de ensayar durante cada etapa de construcción se puede obtener la información necesaria que complementada con algunos ensayos para asegurar la calidad del trabajo realizado y ajustar el diseño original a las condiciones reales de la obra. Un ejemplo de este procedimiento se muestra en la Figura, donde se ilustra el esquema de ensayo durante las etapas de construcción de un pavimento asfáltico.

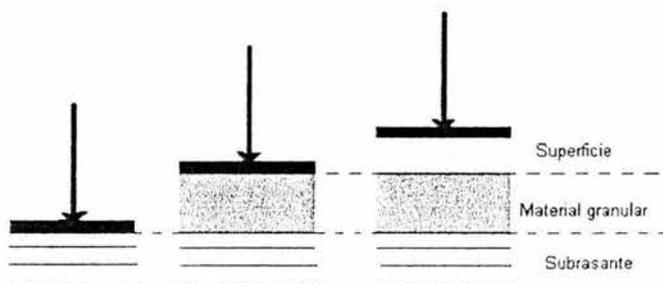


Figura 3.5

Evaluación de las etapas constructivas de un pavimento asfáltico

El control de calidad se puede entregar de dos formas distintas:

*Control estadístico:* Los nuevos métodos de medición pueden medir en forma rápida y segura las diversas capas del pavimento, permitiendo controlar la uniformidad, asegurando una homogeneidad en la construcción. Con los datos acumulados de varias obras o etapas de un mismo proyecto se puede obtener un análisis estadístico o referente al comportamiento de nuevos materiales o métodos constructivos aplicados a la provisión de infraestructura, con ello es posible certificar si el comportamiento teórico de la nuevas capas se adecua a realidad o no.

*Evaluación de los valores alcanzados:* Producto del análisis de la información es posible obtener los valores de los módulos para las distintas capas. De esta manera, se puede asegurar que cada capa haya alcanzado la capacidad exigida, y el

pavimento como conjunto sea capaz de soportar las solicitaciones de tránsito durante su período de diseño.

### 3.6. Deterioro de pavimentos

En nuestra sociedad actual, para cualquier persona resulta algo cotidiano el salir a las carreteras y tener que lidiar con muchos factores adversos, entre ellos destaca las fallas superficiales del pavimento; ya sean baches, grietas y parches en mal estado, etc. Todos ayudan a generar congestión, inseguridad en el viaje, gastos al usuario (directo o indirecto) y en fin, a hacernos más complicada la vida diaria. Es por ello que resulta evaluar la situación actual; el conocer las fallas, su ubicación y causas puede ayudar a generar respuestas a los problemas.

El mal estado que presentan algunas carreteras se remonta a que en las décadas pasadas, la construcción de nuevos proyectos viales sobrepasó con creces a los sistemas rutinarios de mantenimiento de la época.

En algunos países esta tendencia se está vertiendo con políticas que fomentan la construcción y mantenimiento de obras públicas, por medio del financiamiento privado, como lo son las concesiones.

Al evaluar el estado de un pavimento, se busca calificar y cuantificar la habilidad del pavimento para continuar proporcionando un buen servicio a los usuarios. Sus usos más importantes son determinar deficiencias o insuficiencias, proporcionar soluciones y dar una base de datos para proyectar el comportamiento futuro.

Uno de los factores que influyen de gran manera, son las fallas superficiales o deterioros del pavimento; dichos factores influyen tanto en la vida útil del pavimento, como en el servicio que prestan al público. De lo anterior se deduce que resulta importante poder conocer varios aspectos relacionados con las diferentes fallas.

- Una clasificación para poder determinarlas
- Las posibles causas y consecuencias
- Un método para medir

En términos generales se entenderá por deterioro de pavimentos a un aserie de manifestaciones superficiales de la capa de rodado haciendo que la circulación vehicular sea menos segura, confortable y que los costos de operación sean mayores.

Cuando se producen daños que se manifiestan superficialmente en forma de pérdida de geometría, deterioro en el rodado u otros, deben analizarse cuidadosamente las causas de falla que los originan. En términos generales se pueden especificar cinco tipos:

- Diseño insuficiente de la superestructura
- Inestabilidad de las obras de tierra
- Deficiencias constructivas
- Solicitaciones no previstas
- Mantenimiento inadecuado

Para definir en forma clara y precisa los tipos de deterioro, sus causas y acciones de corrección se entregan a continuación un aserie de tablas que especifican cada uno de los deterioros por tipo de pavimentos y características generales.

### **3.6.1. Deterioro de pavimentos de concreto**

A continuación y para facilitar el estudio de las manifestaciones de deterioro en pavimentos de concreto se hacen 3 tablas que resumen los tipos de fallas, como se producen y cuáles son los posibles cursos de acción para repararlas. Los deterioros se dividen en Defectos Superficiales (Tabla 3.1), Agrietamiento (Tabla 3.2) y Deterioro de juntas (Tabla 3.3).

TIPO (DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
<b>DESCASCARAMIENTO</b> ( Pérdida de material superficial en forma de "escamas". En general no tiene efectos estructurales dañinos).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agregados sucios</li> <li>- Exceso de agua en la mezcla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo en caso de falla extensiva y severa colocar recubrimiento de concreto adherido o asfalto</li> </ul>
<b>DESGASTE SUPERFICIAL</b> (Pulimento de la superficie con aparición de agregado grueso. En general no tiene efectos estructurales dañinos).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exceso de cemento en la mezcla</li> <li>- Rodado abrasivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo en caso de falla extensiva y severa colocar recubrimiento de concreto adherido o asfalto</li> </ul>
<b>FISURAMIENTO</b> (Agrietamiento poco severo con aparición de líneas finas interconectadas o familia de fisuras aproximadamente paralelas. En general no tiene efectos estructurales dañinos).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deficiencia de curado</li> <li>- Exceso de agregados finos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede utilizarse sellante para rellenar y proteger de la entrada del agua</li> </ul>
<b>EXCESIVA RUGOSIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala Construcción</li> <li>- Escalonamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cepillado de losas</li> </ul>

Tabla 3.1. Defectos Superficiales

TIPO(DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
<b>AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL</b> (Grieta en dirección perpendicular al eje de la calzada).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longitud excesiva de los paños</li> <li>- Deficiencia del curado</li> <li>- Razón agua/cemento muy alta</li> <li>- Tensiones de alabeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpieza y sellado de la grieta</li> </ul>
<b>AGRIETAMIENTO DE ESQUINA</b> (Grieta en las esquinas de los paños formando figuras triangulares. Normalmente en la esquina exterior en pavimentos con juntas rectas y en la esquina del ángulo agudo interior en caso de juntas esviadas).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión de las capas de apoyo del pavimento.</li> <li>- Estructuración insuficiente.</li> <li>- Tensiones excesivas durante la expansión del concreto en caso de juntas desviadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpieza y sellado de la grieta.</li> <li>- Protección de la erosión con sistema de drenaje y sellado de bermas.</li> <li>- Pavimentación de la berma con concreto unida con barra de amarre.</li> <li>- Reposición de losas o repavimentación dependiendo de la extensión y severidad del agrietamiento.</li> </ul>
<b>AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL</b> (Grieta en dirección paralela al eje de la carretera ubicada en el interior de la losa).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asentamiento de la subrasante</li> <li>- Ancho excesivo de la vía o no funcionamiento de la junta longitudinal</li> <li>- Tensiones de alabeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpieza y sellado de la grieta</li> </ul>
<b>DESINTEGRACIÓN</b> (Grieta en todas direcciones, con desintegración del pavimento. Pérdida de adhesión entre mortero y agregado grueso).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reacciones químicas en la mezcla de concreto</li> <li>- Agregados de mala calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrucción del pavimento</li> </ul>

Tabla 3.2. Agrietamiento

TIPO(DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
<b>FALLA DE SELLADO</b> (El material de sellado no se ajusta a los movimientos de las losas, separándose de éstas).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadecuada forma y dimensiones de la caja de la junta</li> <li>- Juntas transversales muy separadas</li> <li>- Calidad deficiente del material de sellado</li> <li>- Saltadura de las juntas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retirar material, limpiar, rectificar y resellar la junta</li> </ul>
<b>ESCALONAMIENTO DE LA JUNTA</b> (Desplazamiento vertical de losas adyacentes en la junta)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión de las capas de apoyo al pavimento</li> <li>- Juntas transversales muy separadas</li> <li>- Subrasante heterogénea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cepillado</li> <li>- Protección de la erosión por sugerencia con drenes y/o sellado de barras</li> <li>- Reconstrucción de la losa asentada</li> </ul>
<b>SALTADURAS EN LA JUNTA</b> (Quebradura en forma de astilla de una porción del pavimento adyacente a una junta).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración local de esfuerzos debido principalmente a la existencia de material incompresible dentro de la junta</li> <li>- Efecto de las cargas pesadas en esquinas aguzadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retirar material de la junta y resellar</li> <li>- Reemplazar parcial o totalmente las losas</li> </ul>
<b>LEVANTAMIENTO DE LA JUNTA</b> (Levantamiento del pavimento acompañado de quebradura en la losa. Se presenta normalmente en una junta transversal).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dilatación térmica del concreto en pavimentos sin junta de dilatación o juntas transversales deficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reposición de las losas falladas incorporando una adecuada junta de dilatación</li> </ul>

Tabla 3.3. Deterioro de las juntas

### 3.6.1. Deterioro de pavimentos asfálticos

A través de las tablas, los distintos tipos de deterioro para pavimentos de asfalto, juntos a sus causas y medidas de corrección. En el caso particular de pavimentos asfálticos, se encuentran los Defectos superficiales (Tabla 3.4), Deformaciones Superficiales (Tabla 3.5), Agrietamiento (Tabla 3.6).

TIPO(DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDA DE CORRECCIÓN
<b>PERDIDA DE AGREGADO</b> (Remoción de partículas (d> mm) de la superficie)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Déficit de aditivo</li> <li>- Facturación y/o desintegración de partículas debido a las cargas o a la acción de heladas</li> <li>-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sello asfáltico de tratamiento superficial o</li> </ul>
<b>DESGRANAMIENTO</b> (Pérdida Progresiva del material desde la superpie hacia abajo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agregados sucios</li> <li>- Insuficiente contenido de asfalto</li> <li>- Mala adherencia (asfalto-agregado)</li> <li>- Infiltración de agua por deficiente compactación de la mezcla</li> <li>- Endurecimiento del asfalto por envejecimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sello sobre bacheo previo o colocación de mezcla en caso de una condición severa</li> </ul>
<b>AFLORAMIENTO DEL ASFALTO (EXUDACIÓN)</b> (Exceso aditivo en la superficie permitiendo una textura suave y resbaladiza, preferentemente en la zona de circulación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exceso de contenido de asfalto en la mezcla con relación al contenido de huecos del agregado mineral</li> <li>- Repavimento directo sobre pavimentos que tienen exceso de asfalto</li> <li>- Pavimento sobre bases con exceso de imprimante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Repavimentación para una condición extensa y severa</li> <li>- Quemado y sello para una condición localizada</li> </ul>

Tabla 3.4. Defectos Superficiales

TIPO(DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
<b>ONDULACIÓN TRANSVERSAL</b> (Ondulaciones transversales relativamente regulares)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mezcla asfáltica de baja estabilidad</li> <li>- Deficiencia entre capa de rodado y la capa subyacente</li> <li>- Frenadas bruscas de vehículos pesados en intersecciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nivelación con mezcla en el sitio y repavimentación para la condición extensa</li> <li>- Reconstrucción de sectores para condición localizada</li> </ul>
<b>ONDULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO</b> (Deformación plástica del pavimento principalmente en sentido longitudinal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mezcla asfáltica de baja estabilidad</li> <li>- Deficiente adherencia entre la capa de rodado y la capa subyacente</li> <li>- Base granular inestable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nivelación con la mezcla en el sitio y repavimentación para condición extensa</li> <li>- Reconstrucción de sectores para condición localizada</li> </ul>
<b>HUNDIMIENTO</b> (Depresión transversal en la zona de circulación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja capacidad de las capas estructurales</li> <li>- Mezclas asfálticas de baja estabilidad</li> <li>- Bermas inestables; que no garantizan un adecuado soporte lateral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nivelación y repavimentación para una condición extensa, severa y peligrosa para tráfico de alta velocidad</li> </ul>
<b>DISTORSIÓN</b> (Pérdida importante de la geometría transversal original)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla de la infraestructura</li> <li>- Insuficiente capacidad de soporte de la subrasante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bacheo profundo para selecciones localizadas</li> <li>- Nivelación y repavimentación</li> <li>- Para condición generalizada</li> <li>- Reemplazo de material inadecuado y ejecución de un nuevo pavimento</li> </ul>

Tabla 3.5. Deformaciones Superficiales

TIPO(DESCRIPCIÓN)	CAUSA PROBABLE	MEDIDAS DE CORRECCIÓN
<b>AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL EN LA ZONA DE CIRCULACIÓN</b> (Agnietamiento en sentido longitudinal situado en la zona de circulación)	- Cargas excesivas con relación a la estructuración del pavimento	- Picado y sellado cuando se trate de una grieta - Repavimentación para una condición severa que presenta varias grietas aproximadamente paralelas
<b>AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL EN EL CENTRO DE LA VÍA</b> (Grietas longitudinales próximas al eje de la vía. Normalmente formando por una sola grieta. Ocasionalmente con grietas secundarias)	- Deficiencia constructiva	- Picado de sellado de la grieta
<b>AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL EN EL CENTRO DE LA CALZADA</b> (Grietas longitudinales próximas al eje central de la calzada)	- Defecto constructivo en la junta longitudinal	- Picado y sellado de la grieta
<b>AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL EN EL BORDE</b> (Grietas longitudinales entre el borde y 0.30 m hacia el centro)	- Soporte suficiente en el borde del pavimento - Ancho insuficiente - Saneamiento deficiente entre el borde del pavimento y la berma	- Picado y sellado del pavimento - Mejoramiento de la evacuación de las aguas - Sello de bermas
<b>AGRIETAMIENTO SINUOSO</b> (Grietas sin dirección fija que se inicia y termina en los bordes del pavimento)	- Deficiencia constructivas	- Picado y sellado de la grieta
<b>AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL</b> (Grietas perpendiculares al eje de la calzada. Normalmente, si se desarrollan a todo el ancho, están a espaciamientos regulares y si se cubren media calzada ocurren a espaciamientos irregulares)	- Contracciones debido a bajas temperaturas - Ligante asfáltico inadecuado - Refracción de grietas en repavimentación	- Picado y sellado de grietas - En caso de una condición severa y extensa a repavimentar
<b>AGRIETAMIENTO TIPO DE PIEL DE COCODRILO</b> (Grietas que forman una red, en forma de bloques de tamaños irregulares cuyas dimensiones son indicativas del nivel en el cual ocurre la falla. Bloques cuyos lados son menores que 15 cm, indican fallas en las bases. Bloques de dimensiones mayores que 30 cm, indican fallas en la subrasante. Este agrietamiento normalmente va acompañado de deformaciones verticales y ocurre en capas asfálticas de poco espesor)	- Diseño estructural insuficiente - Acumulación de agua en las capas subyacentes a la carpeta asfáltica - Mezclas asfálticas muy frágiles debido a bajas temperaturas	- Bacheo profundo para una condición localizada - Eliminación de la infiltración de aguas superficiales mediante sellos y de las aguas subterráneas con drenes - Repavimentación o reconstrucción para la condición severa y extensa
<b>AGRIETAMIENTO IRREGULAR</b> (Grietas sin orientación definida, usualmente llamados "grietas de mapa", formando grandes bloques.	- Expansiones y contracciones - Refracción de grietas en repavimentación	- Sellado de grietas para una condición estable - Repavimentación para una condición extensa y progresiva

Tabla 3.6. Tipos de Agrietamiento

### 3.7. Revisión visual de fallas

Tal como se dijo anteriormente, es muy importante poder identificar las fallas presentes en un pavimento, para analizar la severidad y ver sus posibles formas de corregirlas. Para lo anterior, es que se han creado los sistemas de revisión, que permiten a través de un muestreo, reconocer las fallas existentes y con ello caracterizar el tramo estudiado.

Dentro de los métodos de revisión, lo más usados son los métodos visuales, que consisten en una visita a terreno por parte de personal capacitado que desarrolla una metodología específica para hacer el estudio. Existen formatos desarrollados por el Instituto Mexicano del Transporte, del programa SIMAP (Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos) que permiten obtener una recolección de datos a partir de un grupo de expertos que hacen un completo recorrido sobre el pavimento y su alrededor los datos que se toma en cuenta son los siguientes; formato de datos generales, estado superficial, capacidad estructura, inventario de deterioros, características geotécnicas, historial de reparaciones.

Consiste básicamente en poder contar con un conjunto de acciones que puedan vigilar periódicamente la evolución del comportamiento de los pavimentos, para detectar la falla estructural, no se puede aceptar que las deficiencias en la calidad de rodamiento constituyen el único problema a tomar en cuenta como norma de criterio. Esto se observa con fallas como fisuras, grietas, estado de la berma, pérdida de agregados, ahucamiento, rodadura, aspecto superficial, baches abiertos, baches cerrados, drenaje. Así con la revisión visual podemos continuar con distintos estudios que nos permitirán generar alternativas de mejoramiento ya sea reconstrucción y/o conservación.

### 3.8. Equipos para la evaluación del deterioro superficial

El uso de manuales para la evaluación del deterioro de los pavimentos tiene varios inconvenientes, como el riesgo de hacer mediciones en el camino, variabilidad entre las diferentes revisiones, tamaño inadecuado de las muestras, y el alto costo de la inspección por su dificultad. Estos factores han alentado el desarrollo de técnicas automatizadas para evaluar pavimentos. En esta variedad de equipos disponibles se distingue el uso de computadoras portátiles y la recolección automatizada de los datos por medio de video o fotografías de la superficie del pavimento. Sin embargo en la actualidad todos los equipos requieren en cierto grado de intervención humana en el proceso de identificar y cuantificar los tipos de fallas. La investigación y desarrollo para reemplazar al observador humano es una de las principales áreas en las que se pone énfasis

Un proyecto de la Administración de la Carretera Federal de EE. UU. (FHWA) en 1987<sup>3</sup>, evaluó varios tipos de equipos automatizados, esta investigación comparó las capacidades de dos filmadoras, un video y un láser frente al estudio automatizado, este fue uno de los primeros pasos en el desarrollo de estos equipos.

La película y el video capturan imágenes continuas del pavimento, que luego se pueden evaluar en la oficina. Este sistema disminuye el riesgo de hacer el estudio en terreno, y proporciona un registro permanente de la condición de la superficie. Estos aparatos pueden ser muy ventajosos para la colección de los datos de manera libre, en la actualidad existen diferentes empresas internacionales que se han preocupado de desarrollar estos equipos.

El sistema *PASCO ROADRECON*, es el desarrollo de un vehículo de PASCO Corporation, el aparato produce una grabación continua del pavimento y a su vez toma una medida de rugosidad. Para fotografiar por la noche el sistema cuenta con un control de la calidad y ángulo de iluminación. Cuenta con una especie de pelo (punta), el cual con un sistema óptico se puede proyectar hacia el pavimento y proporciona una referencia lineal para evaluar la profundidad de huecos que tenga la superficie de rodadura. Se puede operar el vehículo a velocidades de hasta 80 km/h y fotografiar un área de 5 m de ancho. La evaluación del pavimento apenas requiere interpretación visual de las fotografías.

El sistema *GERPHO* archiva una imagen continua del pavimento, en una película de 35 mm, también usa una luz artificial para operar por la noche. Se extrae la información de la falla sobre la película la cual se monta sobre una mesa especial de diseño para su despliegue. Se ha usado el equipo extensivamente en Francia, con otras aplicaciones en España, Portugal y Túnez.<sup>4</sup>

El analizador automático de caminos, entrega medidas de la profundidad de la rodadura y perfil transverso por medio de sensores ultrasónicos de calidad del paso sobre el pavimento con un acelerómetro en el eje trasero, toma un video del lado derecho del camino por el parabrisas y toma un video de la superpie del pavimento con una cámara usando un observador (operador) que dispone de dos teclados para grabar los datos de las fallas, el nivel de severidad y el nivel de la magnitud. Se mide la profundidad de la rodadura con siete sensores ultrasónicos, montados por el frente del vehículo.

El *tester láser* es otro equipo que fue desarrollado en Suecia, usa tecnología de láser para medir la profundidad de la grieta y la anchura además de la profundidad de la rodadura del neumático, a su vez mide la distancia recorrida, el

<sup>3</sup> Hudson W. Elkins, G. Uddin, W. and Reilley, X. " Pavement Condition Monitoring Methods and Equipment Federal Highway Administration" 1986

<sup>4</sup> Hudson W. Elkins, G. Uddin, W. and Reilley, X. " Pavement Condition Monitoring Methods and Equipment Federal Highway Administration" 1986

perfil longitudinal y la macro textura de la superficie. Una micro computadora integra la señal del censor con el acelerómetro y transductor de la distancia, entregando los promedios de los datos en las distintas secciones estudiadas, y proporcionado el proceso de datos en el tiempo real.

### 3.9. Índice de deterioro de pavimentos

Para ejecutar estudios confiables de pavimentos, se debe caracterizar la magnitud e identificar la severidad de cada tipo de falla, como ya se mencionó en el Capítulo 2 el índice de Servicio nos indica en que nivel de deterioro se encuentra nuestra carretera a evaluar, para obtener el ISA (índice o nivel de servicio actual) de diseño de la carretera en estudio. Es referente al confort del usuario y su seguridad al transitarla. Así mismo, es un indicador palpable de las condiciones superficiales y estructurales del pavimento.

Así como el índice de rugosidad Internacional que también nos sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino en el deterioro del pavimento.

En el pavimento, la recolección de datos se usa como un parámetro importante para cuantificar la calidad de servicio que se otorga a los usuarios. Esto es importante a ambos niveles, de red y proyecto, aunque el nivel de detalle requerido en cada caso es considerablemente diferente. A nivel red la preocupación está en cómo determinar los tratamientos que se requieren, un apropiado índice compuesto es útil para esta situación. Se puede determinar este índice de una muestra equivalente limitada de cada sección del pavimento o con una inspección en un vehículo, que abarque toda la sección.

A nivel proyecto se requiere un estimación de la magnitud específica y métodos de reparación del pavimento, tal como parchar un área de agrietamiento. Este requiere un mayor nivel de detalle en la inspección del deterioro.

### 3.10. Técnicas de conservación de carreteras

Un enfoque sistemático es la forma más efectiva de evaluar y seleccionar las técnicas de rehabilitación de pavimentos. EL proceso debe tomar en cuenta todos los parámetros aplicables y el impacto de la elección de las alternativas. Estos parámetros deben relacionar tanto al pavimento como a sus elementos complementarios. Dentro de este contexto la experiencia del constructor, el costo inicial de conservación, los mantenimientos anticipados y futuras rehabilitaciones requieren influenciar en la selección de alternativas. Con lo anterior se requieren 5 tipos principales de información

1. *Datos de diseño:* Para comenzar el análisis de conservación se necesitarán datos como parámetros de diseño de pavimento y espesor de las capas, detalles sobre los componentes de éste y datos

- más específicos como tipo de juntas, tipo de drenaje, tipo de berma, elementos complementarios, entre otros.
2. *Datos de Construcción*: Conocer la forma de construcción tanto del pavimento como de los elementos complementarios ya sea drenajes, obras de arte, alcantarillas, etc., puede explicar el origen de los deterioros, y en base a esto determinar un tipo particular de estrategia.
  3. *Dato de tránsito*: Este es necesario principalmente para evaluar el deterioro del pavimento y algunos elementos complementarios, tanto en volumen como en carga. Con este dato se deben ajustar las hipótesis hechas al construir el camino y se pueden comparar los deterioros reales con los proyectados, de modo que se tenga una idea más clara del comportamiento de la estructura.
  4. *Datos del medio ambiente*: Las condiciones climáticas afectan de forma considerable a la infraestructura, los gradientes de temperatura, las precipitaciones y la humedad serán un factor importante al momento de seleccionar la estrategia de conservación.
  5. *Condición de deterioro*: Conocer en forma precisa la condición de deterioro de la infraestructura vial permite aplicar políticas eficientes a lo largo del proyecto. Esto significa definir la severidad y cantidad de deterioro antes de seleccionar una estrategia. Para poder determinar el nivel de deterioro se aplican ensayos tanto destructivos como no destructivos y junto a los datos definidos anteriormente se pueden modelar los diferentes tipos de deterioro a lo largo de la vida útil del proyecto.

Cabe destacar que no todas las rehabilitaciones requieren de los mismos datos ni en cantidad ni en calidad, por lo que previo a la evaluación se deben definir los tipos de datos a ocupar. Otro aspecto de importancia en la selección de alternativas corresponde a los métodos de evaluación utilizados para determinar la condición actual de deterioro de la infraestructura. En este punto encontramos ensayos destructivos y no destructivos. Los parámetros entregados por los ensayos deben ser analizados y complementados con la experiencia del evaluador para definir una política factible como técnica económica.

Como se ha dicho en el capítulo 2, para determinar en forma más precisa el nivel de servicio que está entregando la infraestructura, su condición se divide en funcional y estructural. La condición funcional se refiere principalmente a los problemas que influyen sobre la conducción y el Índice de Rugosidad Internacional siendo ambos representados por el Nivel de Servicio. La condición estructural representa la capacidad del pavimento para soportar los diferentes tipos de solicitaciones, de tránsito y medio ambiente principalmente, para ello existen índices más objetivos que la diferencian de la capacidad funcional que es una medida más subjetiva.

Las estrategias de conservación dependen de condiciones tanto funcionales como estructurales ya que ambas afectan al usuario, a modo de ejemplo, un pavimento flexible puede estar muy agrietado, lo que significa una pérdida considerable de capacidad estructural, sin embargo el conductor podría no sentir mayores molestias. Al contrario, un pavimento puede tener una excelente capacidad estructural, pero aspectos como una deficiente rugosidad o escalonamiento en el caso de pavimentos rígidos pueden afectar la conducción, con lo que la capacidad funcional se reduce. Dado que las políticas de conservación dependerán directamente de las condiciones ya descritas.

Capítulo

# 4

ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Modelos de Deterioro

## Capítulo 4. Modelos de Deterioro

### 4.1. Modelos de deterioro de pavimentos

En el marco de la evaluación de pavimentos y a fin de predecir el deterioro que puedan sufrir dichos pavimentos a lo largo de su vida útil; se utilizan distintos tipos de modelos de deterioro. Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis; además permiten pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, del mantenimiento efectuado sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones razonables tanto de las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante de la misma y su progresión en el tiempo.

Los modelos pueden surgir a partir de desarrollos empíricos y/o mecanicistas. Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de los pavimentos existentes, en dichas bases de datos se ha registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan; información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.), características del drenaje y de las bermas, datos de tránsito, de condiciones climáticas y de deterioros a lo largo su vida útil. Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico que da origen al modelo que predice el comportamiento futuro del pavimento, en base a una ecuación que relacione las variables seleccionadas, en ciertos casos el modelo generado puede tener la desventaja de no ser aplicable a pavimentos en condiciones diferentes en aquellas en los que se tomaron datos.

Por otra parte el desarrollo de los modelos mecanicistas se basa no sólo en datos de pavimentos existentes, sino que particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la subbase, la base granular o estabilizada y el pavimento propiamente tal, sea este rígido o flexible (de concreto o asfáltico). Por ejemplo un modelo de agrietamiento se basa en la determinación del nivel de fatiga acumulado en las losas, el que para ser calculado requiere la utilización de conceptos mecanicistas que permitan conocer las tensiones y deformaciones críticas generadas en función de las cargas de tránsito y del alabeo térmico.

## 4.2. Técnicas para desarrollar modelos

Muchas técnicas están disponibles para desarrollar modelos de deterioro de pavimentos. Entre las principales se encuentran: extrapolación lineal, regresión (empírico), mecanicista-empírico, distribución probabilística y markoviano. El grado de precisión requerida por un modelo de predicción es función del uso que se le quiera dar a los resultados. A continuación se describen las principales técnicas para desarrollar modelos.

### a) Extrapolación Lineal

El método más simple para predecir se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos de la condición de un pavimento. Este método puede ser aplicable sólo a secciones individuales de pavimentos y no puede usarse en otras secciones. Asume que las cargas de tránsito y los niveles de mantenimiento realizados previamente van a continuar en forma similar. El método requiere que al menos se tenga una medición en la condición del pavimento, además de la realizada al final de la etapa de construcción. Esta forma de predecir el comportamiento asume que la tasa de deterioro se mantendrá en el futuro, por lo tanto, sólo podrá usarse para períodos cortos de tiempo y no es precisa para períodos largos. Además este método no es muy bueno para predecir tasas de deterioros de pavimentos recién construidos ni pavimentos que hayan sufrido recientemente una rehabilitación mayor. Pero es importante hacer notar que para una sección de pavimento específica, y dado que se está usando información de la misma sección, los factores de suelo de fundación, clima, estructura de pavimentos y tránsito pesado están considerados en este análisis.

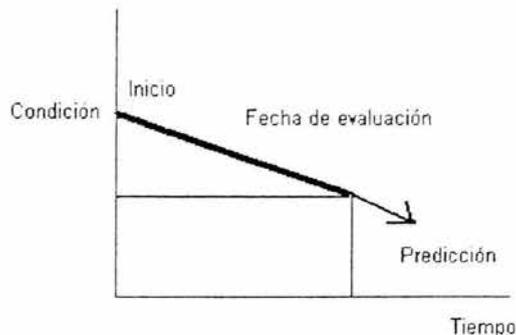


Figura 4.1.  
Método de predicción por extrapolación polar

b) Regresión

El análisis de regresión es usado para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de media y su variación. Se pueden utilizar distintas formas de regresión, por ejemplo; lineal entre dos variables, lineal múltiple y no lineal.

La forma más simple es la regresión lineal entre dos variables, que se puede describir por el modelo siguiente:

$$Y_i = a + bX_i + \text{error}$$

Si la regresión lineal se realiza con más de dos variables, se conoce con el nombre de regresión lineal múltiple. En este caso se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes, por ejemplo:

$$Y = a + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + \text{error}$$

La regresión no lineal se puede utilizar cuando la relación entre la variable dependiente y la independiente es no lineal. Una relación no lineal puede ser analizada como un modelo lineal, transformando la variable dependiente.

c) Modelo mecanicista-empírico

Un modelo mecanicista puro para modelar es aplicable sólo para calcular la respuesta de un pavimento, por ejemplo tensiones, deformaciones unitarias y deflexiones. Esta respuesta es normalmente causada por la fuerzas de las cargas de tránsito, clima o una combinación de ambas. Modelos mecanicistas puros para calcular tensiones y deformaciones no se pueden clasificar como modelos de predicción de pavimentos. Pero las tensiones y deformaciones calculadas por este método se pueden usar como parámetros de entrada (variables independientes) de modelos empíricos de regresión. Por lo tanto un modelo desarrollado usando técnicas de regresión con la repuesta del pavimento como variable dependiente se llama modelo mecanicista-empírico.

d) Distribución de Probabilidad

La condición de un pavimento, por ejemplo ISA o IRI, puede ser tratada como una variable aleatoria con una probabilidad asociada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria es PCI, entonces la distribución de probabilidad puede ser descrita como la función distribución acumulada de la figura 4.2.

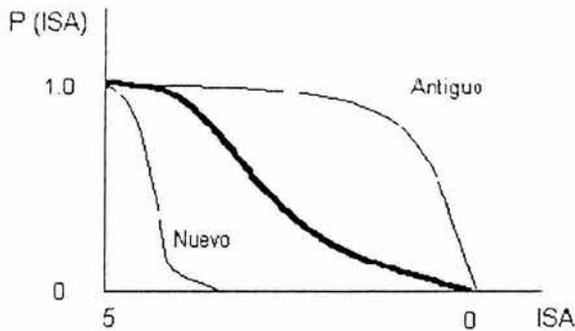


Figura 4.2.  
Función de distribución acumulada

En la figura anterior, el eje vertical es la probabilidad de que el ISA sea igual o menor que un determinado valor de ISA. Esta figura presenta además distribuciones acumuladas en diferentes puntos de la vida del pavimento. Esta figura podrá presentarse como la probabilidad en el tiempo de un determinado valor de ISA, la que se conoce como curva de supervivencia.

e) Markoviano

En la técnica markoviana, la escala de condición del pavimento es dividida en intervalos discretos que se llaman estados de condición. Por ejemplo, el ISA (0-5) puede dividirse en 5 estados de un punto. Esta técnica está basada en determinar la probabilidad asociada con una sección de pavimentos en un determinado estado de esta sección de pavimentos en un determinado estado de condición, ya sea que se quede en este determinado estado, o que se deteriore para pasar al siguiente estado después de un determinado ciclo. Un ciclo puede ser el efecto de un año de las solicitaciones de clima y tránsito. Un vector de estado indica la probabilidad de una sección de pavimento de estar en cada estado determinado. Por ejemplo, al inicio que se asume que la probabilidad de que esa sección de pavimento tiene probabilidad 1.0 de estar en el estado 1 en el ciclo 0.

**4.3. Aplicabilidad de los modelos de deterioro**

Los modelos de deterioro de pavimentos se aplican a diversos aspectos relacionados con la evaluación de pavimentos; a modo de ejemplo pueden mencionarse los siguientes:

- a) La creación de un sistema de evaluación de pavimentos, que se sirva de los modelos para predecir los futuros deterioros del pavimento y para evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento a ellos, para elegir la mejor planificación para la conservación de un camino, que optimice

los resultados tanto de su nivel de servicio como de los costos involucrados en lograrlo.

- b) La generación de un conjunto de políticas y estándares de mantenimiento basados en condiciones de deterioro relevantes del pavimento, cuya conducta pueda predecirse en base a los modelos de comportamiento de dichas condiciones. Conociendo los deterioros en el tiempo es posible generar una política de mantenimiento adecuado y coherente que permita mantener el nivel de servicio requerido del pavimento a lo largo del tiempo que el pavimento está en funciones.
- c) La evaluación del efecto relativo de algunas características de diseño con respecto a otras.

La aplicación de los sistemas formales de evaluación de pavimentos a las redes de caminos del país ha creado la demanda de contar con modelos de predicción de deterioros confiables, bien cuantificados y adecuadamente validados. Entre los requerimientos con los que debe cumplir los modelos de predicción se cuentan:

1. Los modelos matemáticos deben producir la condición del camino en el tiempo, además de permitir conocer los efectos de corto y largo plazo de las actividades de mantenimiento y estimar el momento más adecuado para realizarlas.
2. La calidad del nivel de servicio del pavimento y la tendencia de su condición debe ser cuantificada de modo tal que tenga directa relación con los factores que provocan su cambio y con la decisión ingenieril de intervenir mediante un mantenimiento del camino.
3. Para que su implementación dentro de un sistema de evaluación de pavimentos sea factible, los modelos de predicción deben utilizar sólo parámetros que puedan ser medidos físicamente y obtenidos con la facilidad en base a los recursos humanos y materiales con que se cuente en las correspondientes entidades encargadas de la administración de pavimentos.
4. Para ser válidas, deben tener una bien cuantificada base empírica.
5. Los modelos deben ser aplicables a la región de interés, en todo sentido, inclusive en lo referido al tránsito, medio ambiente, materiales y métodos de construcción.
6. Deben tenerse siempre en cuenta los conceptos estadísticos de probabilidad y confiabilidad asociados a las predicciones que realizan los modelos, dado que la confiabilidad de las predicciones es dependiente de tres fuentes de variación principales:
  - El comportamiento aleatorio de los materiales bajo condiciones naturales.
  - La imposibilidad de contar con un modelo cuyos parámetros sean capaces de representar a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento.

- Los errores surgidos de las diferencias entre comportamientos observados en los pavimentos al momento de originar los modelos y comportamientos actuales de los mismos.

#### 4.4. Modelos de deterioro de primera y segunda fase

Los pavimentos en general, presentan dos fases de deterioro claramente diferenciales (Figura 4.3.), estas son:

- La primera fase es aquella etapa del deterioro que se produce en la puesta en funcionamiento de una vía, inmediatamente después de su construcción, y el momento en que se lleva a cabo en ella una reparación de importancia. Para tal efecto es necesario precisar que se considera como reparación de importancia en un pavimento en aquella que genere un mejoramiento en el nivel de servicio de la vía, por lo mismo es que son reparaciones de importancia:
  - Todas las actividades de restauración, tales como: cepillado, reparaciones de espesor parcial o total, reemplazo de losas, reestablecimiento de la transferencia de carga entre las losas, etc.
  - Los encarpetados de asfalto o de concreto.
  - Las reconstrucciones.



Figura 4.3.  
Esquema de deterioros de pavimentos de 1° y 2° fase

- La segunda fase de deterioro es aquella etapa que va desde la realización de un mantenimiento de importancia en adelante. Al llevar a cabo una rehabilitación siempre se elimina o reduce el deterioro existente, o bien, se afecta la progresión del mismo para el futuro (o ambos) por lo que el comportamiento del pavimento en la etapa posterior a la actividad de mantenimiento es, por lo general, diferente a la de la primera fase, ya sea

por que el deterioro inicia desde cero nuevamente o porque la progresión con que avanza el mismo es menor (o mayor) que antes de el mantenimiento.

#### 4.5. Definición de las formas funcionales para los modelos

De acuerdo a la forma de la predicción que presentan los modelos es posible diferenciar dos variedades de ellos, tanto para pavimentos de concreto como de asfalto (independientemente si estos son empíricos y/o mecanicistas). Estos corresponden a modelos agregados (acumulados) e incrementales, unos y otros presentan diferencias importantes al momento de analizar su utilidad y factibilidad de ser aplicados en los casos en que se requiera (Figura 4.4). Los modelos de deterioro agregados (acumulados), son aquellos que para predecir un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia previa del comportamiento del pavimento, es decir se necesita saber de datos tales como la tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento (medida o estimada), tránsito medio diario anual al inicio del servicio del pavimento, ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación, nivel de servicio inicial al momento de la puesta en servicio del pavimento (agrietamiento, deterioro de juntas y escalonamiento si es que existe, así como IRI), etc. En muchos casos esto no es posible y por una u otra razón sólo se dispone de datos parciales.

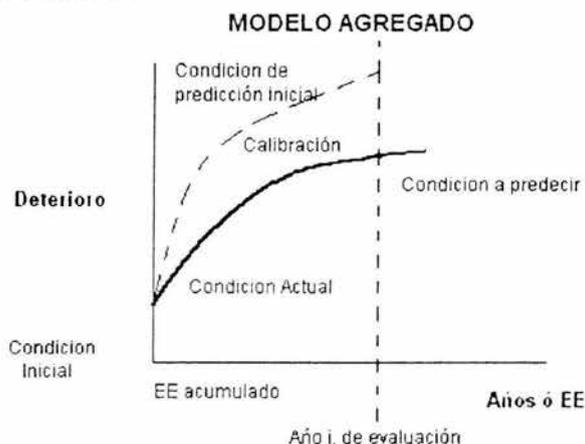


Figura 4.4.  
Modelo de deterioro agregado

Los modelos de deterioro de tipo incremental, a diferencia de los agregados. No requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que permiten hacerlo en base a un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer sólo el estado o condición actual del pavimento (medida de terreno), además de las características estructurales y climáticas

existentes, y el tránsito que circula en el año de la evaluación por dicho pavimento. Los modelos incrementales presentan algunas ventajas en relación a los modelos agregados algunas de estas son:

1. Los modelos agregados para realizar alguna predicción requieren conocer por completo la historia previa del pavimento, sobre todo el tránsito inicial y acumulado en él, el nivel de servicio inicial luego de su construcción, además de la condición del pavimento al momento de hacer la evaluación. En muchos casos, sobre todo aquellos en que la evaluación se hace a un pavimento antiguo, no es posible conocer estos datos y se deben estimar, con la correspondiente responsabilidad de cometer errores. Los modelos incrementales, en cambio no necesitan tanta información histórica, dado que predicen a partir de la condición actual y futura de dichas variables, eliminando así los errores asociados al desconocimiento de los datos originales o la estimación de condiciones pesadas.
2. La adaptación de un modelo a condiciones locales puede ser más precisa si éste se divide en dos etapas (inicio y progresión), ya que así pueden predecirse por separado el deterioro al inicio y la progresión del mismo, situación que adquiere importancia en el caso de aquellos deterioros que en sus primeros años tienen un brusco aumento, para luego estabilizarse en una progresión mucho menor a la del principio. Algunos modelos incrementales cuentan con esta práctica división en etapas para pavimentos asfálticos, en cambio los modelos agregados no poseen en ningún caso una modelación de ese tipo.
3. Por último la modelación incremental se puede adaptar mejor que la agregada para predecir el deterioro luego de aplicar acciones de conservación. Sobre todo en aquellos casos

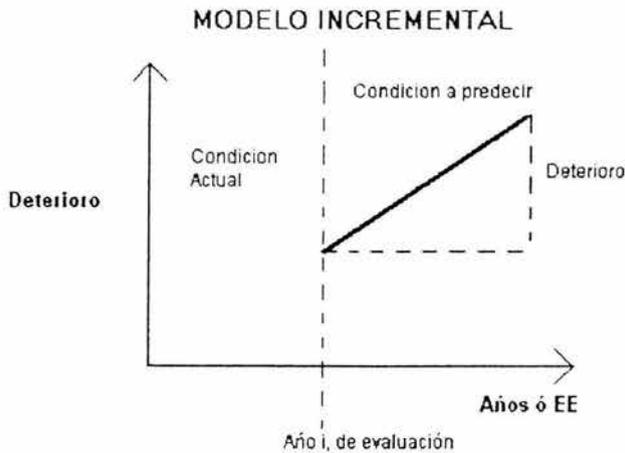


Figura 4.5.  
Modelo de deterioro incremental

Por todo lo anterior es posible indicar que las principales ventajas de los modelos incrementales están en la evaluación de pavimentos en servicio y de pavimentos a los que se les aplica algún tipo de mantenimiento, en tanto para la evaluación de pavimentos recién construidos o proyectados, los resultados de ambos tipos de modelos son igualmente satisfactorios y depende únicamente de la solidez conceptual y estadística de cada uno la conveniencia de usarlo o no. En la actualidad gran parte de los modelos de deterioro de pavimentos son agregados y sólo unos pocos son incrementales; es más, para el presente estudio se contó únicamente con los modelos incrementales para pavimentos asfálticos<sup>6</sup>

De forma funcional un modelo se entiende tanto la estructura funcional de las ecuaciones como su representación gráfica respecto a variables que involucren paso del tiempo, por lo general edad o tránsito acumulado. En la definición de la forma funcional de un modelo corresponde especificar si el deterioro bajo análisis se presenta con una progresión continua a partir del inicio de la vida útil del pavimento, o si existe un período inicial del deterioro, durante el cual este no se manifiesta, y luego de la primera falla el deterioro progresa en forma más o menos acelerada. En el primer caso el deterioro presenta solamente fase de progresión, en tanto en el segundo caso el período muestra una fase de inicio seguida de una fase de progresión. La gran ventaja que tiene modelar por separado ciertos tipos de deterioro en dos fases es la posibilidad de obtener un mejor ajuste de datos medidos en terreno, pudiéndose calibrar el inicio y la progresión en forma diferenciada en cada

<sup>6</sup> Watanatada T. et al. "The Highway Design and Maintenance Standards Model". Volumen 1- Description of the HDM-III Model and Volumen 2 - User's Manual for the HDM-III Model. The World Bank. The John Hopkins University Press. London 1987

proyecto en particular, o de acuerdo a las características propias de cada región (microclimas, técnicas y materiales de construcción así como otros aspectos).

En general aquellos deterioros que involucran falla estructural en el pavimento, como grietas, se caracteriza mejor mediante dos fases, ya que en la realidad existe un lapso inicial donde la falla no se manifiesta. En cambio los deterioros de tipo funcional, como la rugosidad IRI (Índice de Rugosidad Internacional), usualmente progresan en forma continua y no presenta fase de inicio.

Investigaciones anteriores han estudiado en profundidad la forma funcional de las ecuaciones para los distintos tipos de deterioro en pavimentos, tanto para pavimentos asfálticos como de concreto. De acuerdo a los diversos estudios analizados, los distintos tipos de deterioro pueden catalogarse dentro de tres formas generales de evaluación o progresión.

- Progresión creciente: A partir del inicio del deterioro los incrementos por unidad de tiempo van aumentando en magnitud (curva de tipo exponencial).

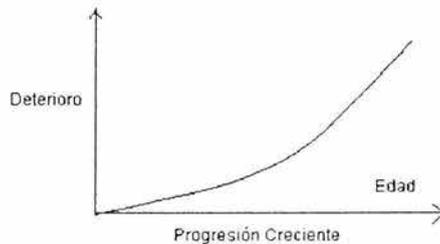


Figura 4.6.

Forma de progresión creciente en distintos deterioros del pavimento

- Progresión decreciente: Los incrementos de deterioro son relativamente elevados al principio y posteriormente van disminuyendo (curva de tipo logarítmica).

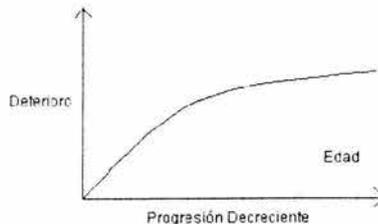


Figura 4.7

Forma de progresión decreciente en distintos deterioros del pavimento

- Progresión sigmodal: Existe una primera etapa de progresión creciente, seguida de otra etapa de progresión decreciente.

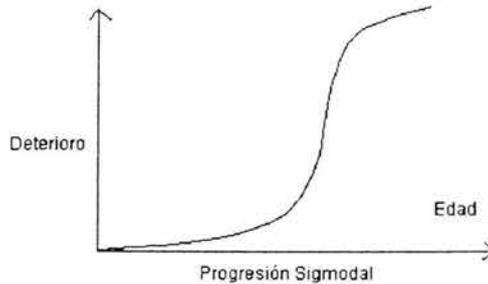


Figura 4.8.

Forma de progresión Sigmodal en distintos deterioros del pavimento

#### 4.6. Modelos de deterioro de pavimentos asfálticos

Para el desarrollo de los modelos de deterioro de pavimentos asfálticos se adopta un sistema que combina métodos empíricos avanzados con principios mecanicistas, la metodología a utilizar es fundamentalmente empírica, de manera que se desarrollan modelos paramétricos utilizando técnicas de regresión estadística de la información proveniente de series de tiempo; información que es seleccionada en una base de datos factorialmente diseñada, a partir de pavimentos en servicio bajo diferentes condiciones de estructura y tránsito. Por otra parte la forma funcional y los parámetros de los modelos, se basan en la medida de lo posible, en teorías mecanicistas y en el conocimiento experimental del comportamiento estructural de los pavimentos y de los materiales que lo conforman.

La forma de los modelos es incremental, por lo que predicen el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento en el tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las sollicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\Delta (\text{deterioro futuro tras el incremento del tiempo}) = f (\text{condición actual, cargas y volumen de tránsito, resistencia del pavimento, clima y mantenimiento aplicado})$$

Esta forma de modelación presenta un problema debido a la evolución del deterioro en los pavimentos es generalmente lenta y los cambios observados en la condición de los pavimentos son usualmente pequeños y muy sensibles a los errores de medición. Además muchos efectos son estadísticamente colineales (aumentan simultáneamente), como es el caso del tiempo y el tránsito acumulado volumen de tránsito y edad, cargas de tránsito y resistencia estructural, etc., por lo que se hace difícil distinguir claramente las causas del deterioro.

Además existe una debilidad en el enfoque empírico de usar correlaciones estadísticas para establecer la relación entre el deterioro del pavimento, como una variable dependiente, y las características del pavimento, tránsito y medio ambiente, como variables independientes; esta debilidad radica a que el resultado obtenido sólo es un reflejo de la situación local, no necesariamente identifica la verdadera relación fundamental entre las variables.

Con el objeto de evitar, o al menos minimizar, los inconvenientes antes mencionados, se aplicaron las siguientes técnicas de estimación a los datos en las series de tiempo de las diferentes secciones de pavimentos:

- a) Regresión lineal basada en la estimación de coeficientes mediante mínimos cuadrados.
- b) Regresión lineal de la transformación logarítmica de los parámetros de corrección para la media logarítmica.
- c) Regresión lineal de la transformación logística de los parámetros (funciones de forma sigmodal)
- d) Regresión no lineal basada en mínimos cuadrados de los residuales.
- e) Modelación probabilística del tiempo de falla para el inicio del deterioro usando estimación de máxima verosimilitud (con una variante del método de Newton Rapson para la maximización), y distribución de Weibull de los tiempos de falla.
- f) Reducción de los datos de deterioro dentro de cada subsección individual a un incremento agregado del deterioro a lo largo del período de estudio, a fin de disminuir la varianza debida a errores de medición y mejorar la discriminación estadística de los efectos esperados de cada parámetro.
- g) Uso del tiempo como la base para la predicción incremental del deterioro, sumiendo como variables explicativas tanto el volumen como las cargas de tránsito, como la edad del pavimento desde su construcción o último reencarpetao estructural.

En suma, para dar forma a los modelos y seleccionar los métodos analíticos que se deben utilizar y a fin de conformar los mejores modelos incrementales de predicción, se conjugaron las fortalezas de los dos métodos existentes para el desarrollo de modelos; el método mecanicista, en su perspectiva tanto teórica como experimental, y el método empírico.

La gran mayoría de los modelos de deterioro de pavimentos asfálticos son incrementales, pero hubo uno en particular que no puede ser desarrollado (como los otros) directamente del análisis estadístico de los datos con que se cuenta, este es el modelo del ahuecamiento.

Lo anterior se produjo debido a que en los intervalos de tiempo en que se tomaron los datos de los deterioros del ahuecamiento, estos tienen una escasa variación y se les asocia con una gran magnitud de error de medida, por lo que el

análisis por períodos incrementales de tiempo no es satisfactorio, entonces se pueden realizar estimaciones en base a los valores absolutos de deterioro, generando un modelo agregado de ahuecamiento. Para lograr darle forma incremental a este modelo de ahuecamiento, se puede utilizar un modelo alternativo que consiste en diferenciar en función del tiempo el modelo agregado obtenido para conseguir así el incremento correspondiente, con el cual es posible originar un modelo incremental con la siguiente forma:

$$\text{Deterioro } n = \text{Deterioro } n-1 + \text{Incremento del deterioro}^7$$

Los modelos de deterioro incrementales de pavimentos asfálticos son básicamente los que siguientes:

- o Agrietamiento. En función de su extensión (como % de su área superficial influenciada), severidad (de acuerdo al ancho de las grietas) y tipo (patrón visual de las grietas existentes).
- o Pérdida de agregados: en función de su extensión (de manera análoga a las grietas).
- o Baches: de acuerdo a su extensión (igual que las grietas) y volumen de baches abiertos por kilómetro de pista:
- o Rugosidad: en términos de un perfil superficial estadístico del camino, relacionado con la respuesta de los vehículos en movimiento.
- o

La relación entre estos modelos se presenta en la figura 4.9

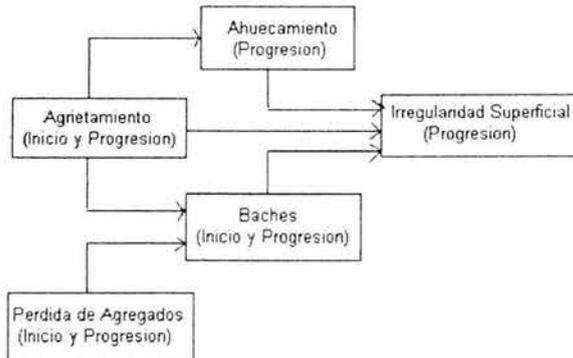


Figura 4.9.  
Interacción entre los distintos modelos de deterioro para predecir la progresión de la irregularidad superficial en pavimentos asfálticos

<sup>7</sup> La base de datos utilizada en el desarrollo de los modelos pertenece a un estudio de caminos de Brasil, desarrollado entre los años 1976 y 1982 (Watanatada T. et "The Highway Design and Maintenance Standard Model" World Bank)

Los modelos de deterioro incrementales de pavimentos asfálticos<sup>8</sup> presentan dos formas claramente diferenciales, estas son:

1. Modelos de dos fases: Son aquellos que están caracterizados por dos fases separadas en el deterioro, una de iniciación y otra de progresión, corresponde a esta clasificación los modelos de agrietamiento, pérdida de agregados y baches.
2. Modelos de una fase: Son los modelos de progresión continua del deterioro, de esta variedad son los modelos de ahuecamiento y rugosidad.

En los modelos de deterioro de pavimentos asfálticos no se formularon nuevos modelos a partir del análisis estadístico de datos para la segunda fase de deterioro de los pavimentos asfálticos, excepto aquellos propuestos para calcular el incremento en la rugosidad luego de aplicar cierto mantenimiento, en el resto de los deterioros se siguen utilizando los mismos modelos de primera fase cambiando en ellos los valores de aquellos parámetros que se ven afectados por cada activada de mantenimiento, por ejemplo se cuenta la edad desde cero nuevamente, se cambia el número estructural, etc. Además para reflejar el impacto que se produce sobre los parámetros o sobre los modelos inmediatamente después del mantenimiento se utilizan relaciones basadas en la experiencia práctica y el conocimiento que hay en el comportamiento de los pavimentos asfálticos.

En la generación de modelos de deterioro de pavimentos asfálticos, el mantenimiento se clasifica en seis categorías primarias, de acuerdo al momento en que se les piensa aplicar y a cual es su nivel de impacto sobre el estado del pavimento. Las categorías de mantenimiento son:

- Mantenimiento rutinario
- Bacheo
- Tratamiento preventivo
- Resellado
- Encarpetado
- Reconstrucción

La forma que pueden tomar los modelos de deterioro luego de la aplicación del mantenimiento antes mencionado se da a conocer a continuación:

- a) Las relaciones para predecir el efecto del parchado se pueden formular en base a la experiencia práctica, sólo el modelo de cambio en la rugosidad se puede basar en el análisis estadístico.
- b) Para el tratamiento preventivo no hay disponibles relaciones estadísticamente determinadas, por lo que se incorporan relaciones tentativas basadas en una

<sup>8</sup> Watanatada T. et al. "The Highway Design and Maintenance Standards Model". Volumen 1- Description of the HDM-III (Description of Model)

- evaluación ingenieril de la experiencia con tratamientos similares en distintos países.
- c) En el caso del resellado se continúan aplicando los modelos de primera fase, pero realizando una actualización a los valores de número estructural, deflexión promedio y áreas de agrietamiento previo después del resellado. Para la actualización de los valores se utilizan relaciones basadas en la lógica y la experiencia de comportamiento de diversos pavimentos.
  - d) Los efectos del reencarpetado en el deterioro del pavimento provocan la reclasificación del tipo de superficie en estudio (que cambia de características debido al Reencarpetado), lo que induce a utilizar las relaciones de primera fase que correspondan al nuevo tipo de superficie para calcular las progresiones de los deterioros. Además se comienza nuevamente a contar la edad y ejes equivalentes sobre este pavimento y se realiza una actualización de los valores del número estructural, la deflexión promedio y las áreas de agrietamiento previo después del Reencarpetado. También debe consignarse el efecto inmediato del Reencarpetado sobre los deterioros, que consiste en una disminución a cero de los agrietamientos, pérdida de agregados y baches.

El modelo de agrietamiento en pavimentos flexibles utilizado en los modelos HDM-III<sup>9</sup> (Highway Design and Maintenance Standard Model), es el tipo de deterioro que con más frecuencia se presenta en los pavimentos asfálticos. Para facilitar la comprensión de estas ecuaciones se debe mencionar que el agrietamiento se caracteriza por dos fases distintas, una correspondiente a la fase de iniciación y otra de progresión, donde la grieta se incrementa en extensión, intensidad y severidad. Conceptualmente la iniciación se caracteriza por el área agrietada. Una vez iniciado el agrietamiento se extiende progresivamente en el tiempo hasta llegar a un 100%. Al mismo tiempo el ancho de las grietas, se incrementa lo que obliga a reclasificarlas en un grado mayor de el que corresponde a baches.

### 1. Modelo de inicio de grietas

Para establecer el modelo de inicio de grietas, el estudio toma en cuenta las siguientes características:

*Severidad de grietas:* Se usan sólo dos niveles: de clase 2, que incluye anchos de grietas entre 1 y 3 mm, y clase 4, que se refiere al ancho de grietas mayor a 3 mm y con desprendimientos.

*Tipo de grietas:* Se considera, esencialmente el agrietamiento tipo de piel de cocodrilo causado por la fatiga y tipo mapa causado por el envejecimiento, además de las grietas lineales y transversales.

<sup>9</sup> Watanatada T. et "The Highway Design and Maintenance Standards Model" World Bank. Transportation Department. Washington D.C. 1987

*Tipo de pavimento:* El pavimento se clasifica en las siguientes categorías.

- Concreto asfáltico sobre base granular
- Tratamiento superficial sobre base granular
- Tratamiento superficial o concreto asfáltico sobre base tratada con cemento
- Reencarpetado de concreto asfáltico
- Sellos
- Lechadas además de las características consideradas se define la iniciación de grietas a un nivel de 0.5% del área agrietada. De acuerdo a estas características, se determinó que los modelos más adecuados para predecir el inicio de grietas en distintos de tipos de pavimentos son los siguientes:

Concreto asfáltico sobre base granular

$$TYCR2 = 4.49 * e^{(0.127 * SNC - 20.5 * \frac{YE2}{SNC^2})}$$

Tratamiento superficial sobre base granular

$$TYCR2 = 13.2 * e^{(24.3 * (1 + CQ) * \frac{YE2}{SNC^2})}$$

Pavimentos sobre bases tratadas con cemento

$$TYCR2 = 1.11 * e^{(0.035 * H + 0.371 * \ln(CMOD) - 0.418 * \ln(DEF) - 2.87 * YE4 * DEF^9)}$$

Reencarpetado de concreto asfáltico

$$TYCR2 = 10.8 * e^{(-1.21 * DEF - 1.02 * YE4 * DEF)}$$

Donde:

TYCR2 = Tiempo de iniciación del agrietamiento para las grietas clase 2 (1 a 3 mm de ancho), en años

SNC = Número estructural corregido en pulgadas

NE2 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, para el inicio del agrietamiento, basado en un exponente de equivalencia de carga 2, en millones/pista

YE2 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, basado en un exponente de equivalencia de carga 2 millones/pista/año.

YE4 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, basado en un exponente de equivalencia de carga 4, millones/pista/año.

DEF = Deflexión mediante viga Benkelman (carga estándar de 80 KN) en ambas ruedas mm.

H = Espesor de la capa asfáltica, mm.

CQ =Indicador de la calidad del pavimento (1= defectuosa, 0= otros casos)  
 CMOD = Módulo de resiliencia de las bases tratadas con cemento, GPa.

Además para los sellos y las lechadas asfálticas, se ha estimado un período fijo para el inicio de grietas con los siguientes valores:

Sellos sobre tratamiento superficial

TVCR2 = 2.88 años

Sellos sobre concreto asfáltico

TVCR2 = 1.20 años

Lechadas sobre tratamiento superficial

TVCR2 = 1.38 años

## 2. Modelo de progresión de grietas

La progresión del agrietamiento se define sólo como el incremento del área agrietada, expresado como porcentaje del área del pavimento analizada. Esta progresión es encontrada empíricamente y se determina que es una función sigmodal (en forma de S), en que la tasa de agrietamiento depende principalmente del área agrietada y el tiempo de la iniciación de éste, sin efectos significantes de la carga de tráfico ni la resistencia del pavimento. La función es simétrica con la siguiente forma general:

$$ACR_t = Z * [ Z * a * (1 - b) * A_t + SCR_1^{1-b} ]^{1/1-b} - SCR_t$$

donde:

$ACR_t$  = Incremento en el área agrietada desde el tiempo t al t+ $\Delta t$ , en el porcentaje del área total.

$SCR_1$  =  $\min [ CR_t, 100 - CR_t ]$

$CR_t$  = Área agrietada al tiempo t, en porcentaje del área total.

Z = 1 si  $CR_t < 50$ , -1 en otro caso

a, b = Coeficientes estimados

$\Delta t$  = Incremento de tiempo en años en el modelo de incremento de tiempo, o incremento de ejes equivalentes (millares de EE) en el modelo de incremento de tránsito.

En la figura 4.10, se entrega el gráfico correspondiente al modelo de un pavimento flexible en el cual se muestra a la progresión del deterioro sin mantenimiento, junto con la progresión cuando se aplican 2 encarpados asfálticos. En él se observa como la progresión se acentúa rápidamente, sino se aplican las actividades de conservación correspondientes.

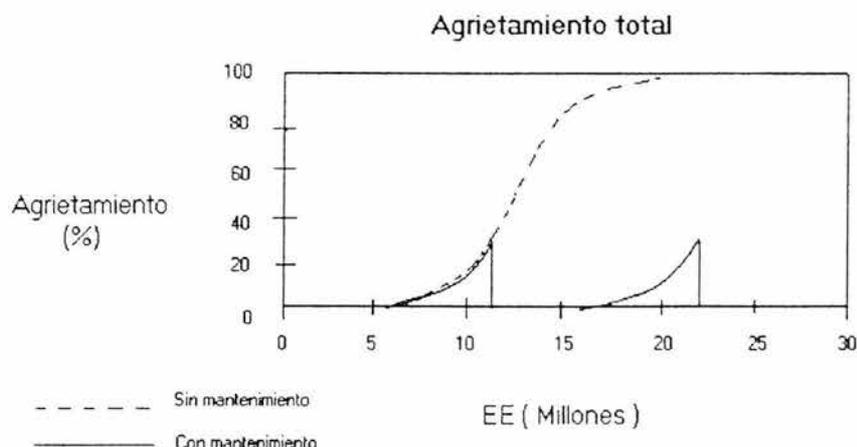


Figura 4.10.  
Forma funcional del agrietamiento

#### 4.7. Modelos de deterioro de pavimentos de concreto hidráulico

La forma funcional general de los modelos de deterioro de concreto es la siguiente:

$$\text{Deterioro} = (\text{Tráfico o Edad})^a (b \text{ Diseño}^c + d \text{ Subrasante}^e + f \text{ Clima}^g + h \text{ Matenal}^i)$$

Donde:

a hasta i son constantes determinadas de las ecuaciones de regresión, Tráfico, Edad, diseño, Subrasante, Clima, Material. Son las principales variables incluidas en el modelo.

Los modelos de segunda fase están conformados por una serie de combinaciones lógicas de los modelos agregados que se utilizan para las predicciones de primera fase. Las combinaciones lógicas están basadas en los conocimientos que se tienen del comportamiento de los pavimentos de concreto en la práctica durante la etapa posterior a la realización de un mantenimiento. Dichos modelos abarcan numerosas actividades de restauración y Reencarpetado, para los cuales ha sido posible formular modelos de escalonamiento de juntas, deterioro de juntas, agrietamiento, deterioro de grietas y cálculo de grietas. A continuación se agrega una lista de los modelos más usados para pavimentos rígidos.

##### 1. Pavimentos de concreto simple con juntas:

- Escalonamiento de juntas con barras de traspaso de carga.

- Escalonamiento de juntas sin barras de traspaso de carga.
- Deterioro de juntas transversales.
- Agrietamiento transversal

2. Pavimentos de concreto reforzado con juntas:

- Escalonamiento de juntas con barras de traspaso de carga.
- Escalonamiento de juntas sin barras de traspaso de carga.
- Deterioro de juntas transversales.
- Agrietamiento transversal

Además se adjunta un resumen con los modelos mencionados anteriormente pero relativos a restauraciones en la Tabla 4.1 y reencarpados de concreto (adherido y no adherido) en la Tabla 4.2.

TIPO DE DETERIORO				
ACTIVIDAD DE RESTAURACIÓN	ESCALONAMIENTO	DETERIORO DE JUNTAS	AGRIETAMIENTOS	DETERIORO DE GRIETAS
Reemplazo de losas	Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	
Reparación de espesor completo	Concreto reforzado con juntas	Concreto reforzado con juntas		Concreto reforzado con juntas
Reparación de espesor parcial		Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga		
Cepillado	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga		Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	
Colocación de barras de traspaso de cargas	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga		Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	
Colocación de bermas de concreto	Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga		Concreto simple con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	
Colocación de drenes longitudinales	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga			
Sellado de juntas		Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga		

Tabla 4.1  
Modelos de deterioro de segunda fase (Restauración)

TIPO DE REENCARPETADO	TIPO DE DETERIORO		
	ESCALONAMIENTO	DETERIORO DE JUNTAS	DETERIORO DE GRIETAS
De concreto adherido	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga
De concreto no adherido	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga	Concreto reforzado con juntas, con o sin barras de traspaso de carga

Tabla 4.2.  
Modelos de deterioro de segunda fase, luego de actividades del reencarpetado.

Al igual que en los pavimentos flexibles se entregan a continuación la ecuación y gráficos explicativos del modelo de deterioro de escalonamiento para pavimento rígido, específicamente el que corresponde a escalonamiento de juntas transversales sin barras de traspaso de carga.

Cabe destacar que la transferencia de carga en pavimentos sin barras de traspaso de carga se realiza completamente por la acción que existe entre las caras irregulares de las losas. El grado de transferencia de carga por la acción mecánica es afectado por el tamaño de la abertura de la junta, el coeficiente o módulo de reacción de la subrasante  $k$ , el espesor de la losa, la angularidad de los agregados utilizados en el concreto y el número de repeticiones de carga. La deflexión de la esquina es otro factor importante que influye sobre el escalonamiento de las juntas transversales.

A continuación se presenta el modelo<sup>10</sup> de escalonamiento de juntas transversales sin barras de traspaso de carga seleccionado, la ecuación y la forma de su curva.

$$\text{FAULT} = \text{ESAL} \left[ 0.2347 - 0.1516 * C_d - 0.00025 \left( \frac{\text{THICK}}{\text{AVJSPCE}} \right)^2 + 0.0115 * \text{BASE} + 0.7784 * 10^{-7} * F_l * \text{PRECIP} - 0.002478 * \text{DAYS90}^{0.5} - 0.0415 * \text{WIDENED} \right]$$

<sup>10</sup> Modelo que pertenece al HDM-4 (Highway y Design and Maintenance Standards Model (HDM), cuya última versión es HDM 4

Donde:

FAULT: Promedio del escalonamiento transversal (in).

ESAL: EE acumulados de 18 Kip desde la construcción (millones).

Cd: Coeficiente de Drenaje AASHTO.

THICK: Espesor de la losa (in).

AVJSPACE: Espaciamiento de juntas promedio (ft)

BASE: Tipo de base, no estabilizada (0) y estabilizada (1).

FI: Índice de congelamiento, FI días.

PRECIP: Promedio de precipitación anual, (in/año).

DAYS90: Número de días con temperaturas mayores a 90° F.

WIDENED: Sobre ancho de calzada, sin sobre ancho (0) y con sobre ancho (1).

En la figura 4.11: Forma funcional del escalonamiento, se muestra gráficamente la progresión del escalonamiento en función de los ejes equivalentes en base a un tramo estándar de pavimento rígido, junto a esta se entrega además la progresión del escalonamiento cuando se aplica un cepillado de losa.

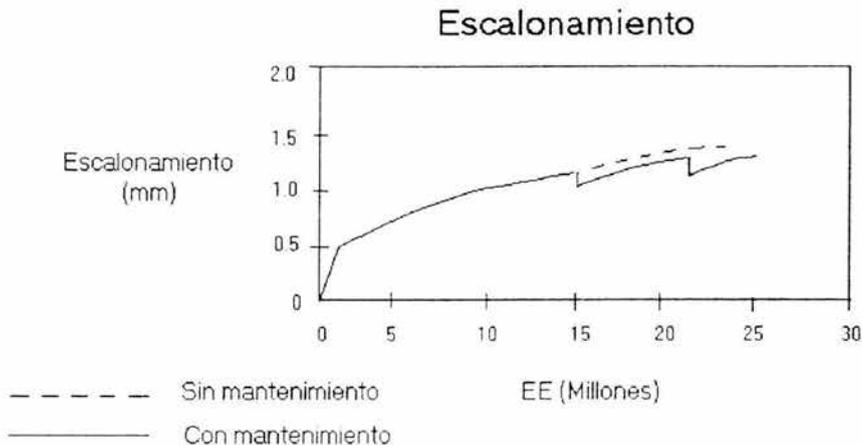


Figura 4.11.  
Forma funcional del escalonamiento

#### 4.8. Metodología de calibración de los modelos

Cuando el modelo de deterioro, desarrollado con información empírica asociada a determinadas condiciones (clima, tipo y formas de cargas, materiales y técnicas constructivas), es usado en condiciones diferentes a las que sirvieron para su desarrollo, pueden presentarse ciertas diferencias de cierta importancia entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad. Dichas diferencias pueden deberse, entre otras, a las siguientes causas:

- Errores en los datos observados: por inadecuadas técnicas de medición, mal registro de los datos que no correspondan (recordar caso de aplicar un modelo de primera fase en pavimentos que han sufrido rehabilitación).
- Errores en los datos estimados: en aquellos datos sobre los cuales no se disponga toda la información necesaria y deben ser estimados, el error en la estimación muy probablemente ocasiona error en la predicción. Un típico ejemplo es la estimación de las cargas de tránsito que ha recibido el pavimento hasta un determinado momento de su vida.
- Condiciones diferentes a las originales del modelos: Si el modelo se aplica fuera de su espacio de inferencia original, es decir, extrapolando la predicción con valores de variables fuera del rango inicialmente considerado, pueden así mismo presentarse diferencias importantes entre lo predicho y lo observado.
- Inadecuación del modelo: si el modelo no contiene algunas variables que son claramente importantes, ya sea porque no resultaron estadísticamente significativas con los datos originales o porque un proceso de análisis poco profundo o incompleto no las tuvo en cuenta, ello podrá redundar en una mala predicción, y este defecto sólo es posible de corregir estimando el modelo con nuevos datos.
- Aleatoriedad del comportamiento de los materiales y las estructura: aún cuando el error en la predicción no estuviera asociado a ninguna de las causas anteriores, siempre existe un margen de error introducido por un comportamiento aleatorio o estocástico de los materiales que componen las estructuras en el mundo real, que se aparta de la teoría y genera dispersión en los resultados.

Para reducir estos errores, o también verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades o limitaciones, los procedimientos de calibración o ajusten resulta muy útiles. Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numérico, que modifique la predicción del modelo ajustándolo de acuerdo a la información provista por bases de datos de pavimentos de una región o país. Esto se realiza a través de la minimización de las diferencias entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno.

El objetivo de calibración es obtener modelos de predicción ajustados, que hagan más realistas y confiables las estimaciones de la evolución del deterioro a futuro, permitiendo así establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación del camino ( $\text{costo total} = \text{costo de operación vehicular} + \text{costo de conservación}$ ). La calibración de los modelos de deterioro puede realizarse a dos niveles: para un camino o pavimento específico, o bien para un grupo de caminos. En el primer caso, se denomina calibración a nivel de proyecto; en el segundo caso se trata de calibración a nivel de red carretera.

Estudios recientes han desarrollado diferentes metodologías para la calibración de modelos a nivel de red carretera o bien de proyecto carretero, tanto en pavimentos asfálticos como de concreto hidráulico. Algunos de estos procedimientos se describen a continuación:

- a) En la calibración de los modelos de deterioro a nivel de tramos testigo, se registra la evolución de los diferentes deterioros en un conjunto de tramos testigos de pavimentos asfálticos, a lo largo de un lapso de 5 años (Figura 4.12). En la base de los datos recopilados se ajustan los modelos de deterioro para cada tramo testigo por separado. Esta metodología es la que brinda mayor precisión en la predicción a futuro, pero su confiabilidad depende fuertemente del período de medición abarcado, es necesario recabar datos por un lapso prolongado si se desea una predicción confiable.



Figura 4.12.  
Calibración de modelos de deterioro por tramos testigo

- b) Calibración de modelos a nivel de red carretera

- Método de "Ventanas". Para ello debe seleccionarse un conjunto de secciones de caminos que tengan características similares, pero edades lo más diferente posible, a fin de registrar el estado de deterioro de cada uno y reconstruir curvas de deterioro representativas del conjunto. Estableciendo las condiciones de similitud, en base a la fijación de niveles en cada una de las variables explicativas del deterioro (tránsito, capacidad estructural del pavimento, clima), pueden

obtenerse distintos grupos de pavimentos en un red carretera; a cada grupo con características similares corresponderá una serie de factores de calibración para las correspondientes curvas de evolución de los distintos tipos de deterioro. Este método permite evaluar una amplia cantidad de pavimentos agrupados en distintos conjuntos, ampliando el espacio de inferencia de la calibración. Además, los modelos calibrados según este método representan condiciones medias dentro de cada conjunto de pavimentos, por lo cual son muy útiles para evaluar políticas de mantenimiento a nivel de una red vial; en cambio con el método anterior sólo pueden evaluarse acciones de mantenimiento dentro de un mismo pavimento.

- Análisis de deterioro predicho vs observado: Mediante el análisis de gráficos de deterioro predicho vs observado no se ajusta la curva de comportamiento en forma directa, como en las metodologías anteriores, sino el conjunto de datos de deterioros predichos y observados par un determinado grupo de pavimentos. este método tiene la ventaja de que el análisis no requiere que los pavimentos seleccionados sean similares entre si, ya que no se ajustan curvas medias de la evolución del deterioro, sino que se corrige una tendencia global sobre la predicción del deterioro. Se puede simplificar el análisis evaluando una sola variable y dividiendo a los pavimentos en pocas clases (por ejemplo para obtener factores de calibración diferenciados por zonas climáticas); o bien, puede obtener factores de calibración ocupando, en un solo gráfico, la información completa de un tipo de deterioro provista por una base de datos para una red de pavimentos.

Como parte de la metodología global de obtención de modelos incrementales de deterioro útiles para ser aplicados en sistemas de evaluación de pavimentos se propone a continuación, en base a los antecedentes disponibles, un método de calibración para ajustar los modelos de deterioro que se seleccionen.

El procedimiento matemático empleado para calcular los factores de calibración puede variar dependiendo del tipo de deterioro que se analice. El objetivo, como se vio anteriormente, es minimizar la expresión de error total, que representa la diferencia entre valores observados de deterioro en pavimentos, y los valores predichos por los modelos respectivos.

$$Et = \sum_{i=1}^n (V_{obs_i} - V_{pred_i})^2$$

Capítulo

# 5

ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Costos de Evaluación Económica

## Capítulo 5. Costos de Evaluación Económica

### 5.1. Tipos de Costos en la Evaluación Económica de Carreteras

El primer costo total en la mejora de una carretera incluye los gastos de diseño y de ingeniería, los costos de construcción, estructuras y pavimentos, en muchos casos los gastos para adquirir los derechos de vía. La selección de los tipos de costos que se incluyen o se excluyen de los estudios económicos requiere un análisis directo y cuidadoso, cuatro de las consideraciones más importantes son las siguientes:

1. En general, los costos fijos, usados para fines de contabilidad, deberían ser omitidos de los estudios económicos. Para ilustrar, un porcentaje determinado se puede añadir a los costos estimados para administración, planeación y cargos de ingeniería. Probablemente se incurrirá en estos costos dependiendo de que un proyecto específico se emprenda o no; si es así, no son pertinentes en comparación a los posibles cursos de acción. De otro modo, sólo los costos añadidos o incrementados son aplicables.
2. Los gastos hechos antes del estudio económico no deben ser considerados. Estos son llamados costos con pérdida o rebajados, en los cuales no podrá haber recuperación debida a una acción presente o futura. Por ejemplo la base y un pavimento de una carretera pueden estar en buena condición y tener cierto valor "en libros" sustancial en los registros carreteros. Sin embargo, si por una alternativa propuesta se abandona el camino, sería un error cargar un valor por esto contra cualquier alternativa en el estudio económico.
3. Todos los costos aplicables deben ser incluidos y todos los cargos inapropiados excluidos y todos los cargos traspasados pueden causar problemas. Por ejemplo, que uno de los planos propuestos para un arreglo de carretera requiera una compañía particular para hacer sus instalaciones por cuenta propia. Para un presupuesto fijo, este costo no se puede cargar contra el proyecto. Sin embargo, desde un estudio económico de trabajos públicos, si puede ser cargado, los recursos económicos se consumen, aunque sean pagados por fondos privados.
4. En ciertos tipos de estudios económicos es propio hacer un abono por el valor de rescate de una máquina o estructura al final de su vida útil estimada. Como regla general, el valor de rescate debería ser ignorado en los estudios económicos para carreteras. Es conjetural, en el mejor de los casos, suponer que la inversión en una carretera tendrá un gran valor, en un futuro de 20, 30 ó 40 años. Una excepción podría ser asignar valor de rescate al terreno ocupado por el camino. Aún en esta situación, sólo el valor bruto del terreno en su futuro uso determinado, después de deducir el costo de conservación en dicho uso, se

incluirá. Otros costos asociados con la adquisición del terreno en primer lugar, tales como gastos legales y el costo de limpieza de edificios, no podrán ser recuperados y no serán parte del valor de rescate.

Los arreglos propuestos sobre carreteras frecuentemente traerán cambios en los costos de mantenimiento anual y de operación. Para las condiciones presentes, estos datos deberían estar disponibles en los registros de costo de la agencia de carretera. Las estimaciones para estos costos para los mejoramientos propuestos para estos costos para los mejoramientos propuestos deben ser proyectados. Aquí nuevamente se incluirán los costos aplicables. En particular, los costos fijos y los costos con pérdida deben ser examinados cuidadosamente para asegurarse que sólo las verdaderas diferencias de costo queden reflejadas.

Los costos pueden dividirse en los siguientes:

#### **Costos del Gobierno**

- Costo inicial de construcción
- Costos de construcción o rehabilitación futura
- Costos de mantenimiento erogados a lo largo de su vida útil
- Costo o beneficio remanente del camino al final de su vida útil (valor residual)
- Costos de ingeniería ( Diseños, estudios, especificaciones, etc )
- Costos de Administración
- Costos de inversión

#### **Costos de Usuario**

- Costos de operación de los vehículos
  - Lubricantes
  - Combustibles
  - Neumáticos
  - Repuestos
  - Mano de obra en mantenimiento
- Costos anuales fijos
  - Depreciación
  - Interés
  - Administrativos o generales
    - Costo de tiempo de viaje
    - Tiempo de pasajero
    - Tiempo de demora o retención de carga
- Costos extras a los usuarios por trabajos o rehabilitaciones al camino

#### **Costos extras**

- Accidentes

## **5.2. Costos de Mantenimiento y/o Reconstrucción**

El mantenimiento de carreteras se define como el conjunto de acciones emprendidas para conservar y restaurar las características del pavimento, con el fin de asegurar a los usuarios unas condiciones de seguridad y comodidad definidas, teniendo en cuenta el medio ambiente. Llevar a la práctica una política de mantenimiento supone la capacidad de relacionar los objetivos de está con un determinado número de características del estado del pavimento.

Por lo tanto es fundamental establecer un sistema de prioridades para las decisiones de intervención. Todo esto tiende a minimizar las inversiones que hay que comprometer para mantener las características del pavimento por encima del nivel requerido. Así un buen mantenimiento periódico de carreteras depende de la adopción de normas convenientemente definidas que permitan responder a las exigencias de los usuarios y minimicen el costo total de la carretera que comprenden los costos de construcción, mantenimiento y operación.

### **5.2.1. Costos de mantenimiento o reconstrucción futura**

Los estudios de la duración de un camino fueron empezados cerca de 1935 en varios Estados, y hasta la fecha, han sido principalmente dedicados a determinar la vida útil de las superficies de varias carreteras. El mantenimiento se refiere a aquellas técnicas que se le dan a la infraestructura carretera para que pueda dar un nivel de servicio aceptable, este tipo de conservación beneficia tanto al pavimento como a sus elementos complementarios, su aplicación es permanente en el tiempo, requiere de una constante revisión y sus soluciones son no sólo a la carpeta de rodado, sino que a todo el conjunto que compone la infraestructura. Podemos dividir los costos de mantenimiento en la restauración y/o rehabilitación de elementos complementarios y en la restauración y/o rehabilitación del pavimento.

La reconstrucción consiste en reemplazar el pavimento existente incluyendo las bases por uno nuevo ya sea de asfalto o concreto. Los costos de reconstrucción se refieren principalmente a la reconstrucción por capas (consiste en reemplazar parte o la totalidad de las capas del pavimento y con esto se corrige características tales como pendiente, drenaje entre otras y disminuye los costos) o reconstrucción por medio de reciclado (consiste en utilizar los materiales del pavimento existente como materia prima para el nuevo pavimento).

### 5.2.2. Costos de mantenimiento a lo largo de su vida útil

Los pavimentos tienen por propósito servir al tránsito en forma segura, confortable y eficiente, por tal motivo es importante realizar labores de mantenimiento a lo largo de su vida útil. Existen dos tipos de costos, el costo capital y el periódico, el costo capital como su nombre lo indica es cuando se incurre a la materialización de una rehabilitación que sea muy importante y los costos periódicos son aquellos que son realizados en forma anual durante la vida útil.

Las experiencias en el mantenimiento a carreteras muestran evidencias de que los recursos asignados actualmente a mantenimiento rutinario son más holgados, en tanto aquellos destinados a mantenimiento preventivo y correctivo son insuficientes por lo tanto es conveniente reasignar a conservación preventiva y correctiva parte de los recursos actualmente asignados a mantenimiento rutinario, además conviene redistribuir los recursos asignados a este tipo de conservación entre los años (guardando lo sobrante en los años con "superávit" para invertirlo en los años con "déficit" ).

### 5.2.3. Costos de la carretera al final de su vida útil

Al final de la vida útil de una carretera, es cuando se comienzan a generarse muchos costos, especialmente si la carretera no recibió un mantenimiento adecuado estos costos se van a ver reflejados especialmente para los usuarios debido al mal estado en que se encuentre y el nivel de servicio que tenga que puede ser un Índice de Servicio de hasta el 1.0-1.5, o un Índice Internacional de Rugosidad de hasta un 9 m/Km., esto en los costos de operación, costos por accidentes, costos de tiempo, etc. Y obviamente va a generar un costo para hacer una nueva carretera para que pueda brindar un mejor nivel de servicio.

### 5.2.4. Costos de Inversión

Este costo representa no aprovechar los recursos disponibles en otras actividades diferentes a la elegida, esto significa que al decidir invertir en una determinada actividad se toma implícitamente la decisión de dejar invertir en otras posibilidades de inversión.

El costo de inversión también conocido como costo de oportunidad se define como de no tomar la segunda mejor opción de inversión. Cuando tenemos recursos para dedicarlos a un cierto fin, siempre existen otros posibles usos de esos recursos; cuando alguno de esos recursos es seleccionado para materializarse, dejamos de aprovechar los recursos en los otros usos, uno de los cuales será la

mejor opción que elegiríamos sino pudiéramos invertir en la alternativa de inversión que hemos escogido.

El valor que se toma como costo de oportunidad es equivalente a una tasa de interés también llamada tasa de oportunidad, que representa la oportunidad que no se toma. El costo de oportunidad y el costo del capital se pueden hacer equivalentes a una tasa de interés con la que se evalúan las alternativas de inversión, a esa tasa se le da el nombre de tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR), que es la tasa mínima contra la que compiten las alternativas que se están evaluando. *(que veremos en el Capítulo 6)*

### 5.3. Costos de Operación Vehicular

No existe ninguna respuesta sencilla a la pregunta. ¿Cuánto cuesta operar un vehículo de motor? Sin embargo, una contestación razonable constituye un requisito para el diseño económico de las carreteras, ciertos gastos de operación aumentan más o menos directamente con el número de kilómetros recorridos; en otras palabras, su costo por vehículo-kilómetro es relativamente constante. En esta clasificación caen renglones tales como los de combustible, llantas, aceite, mantenimiento y reparaciones, y aquella porción de la depreciación que puede atribuirse al desgaste. Otros costos varían principalmente con el tiempo y son constantes para un período dado, tal como un año; o dicho en términos de costos por vehículo-kilómetro, varían inversamente con el número de kilómetros recorrido anualmente. Se incluyen entre estos, los costos de derechos para obtener la licencia de conductor y los registros, la renta del estacionamiento, los seguros y la amortización, que es la parte de la depreciación que se origina en vehículos inadecuados y antiguos. Algunos costos dependen total o parcialmente de la velocidad. El más importante de estos costos es el valor del tiempo de vehículo, del operador y del pasajero, y también puede decirse que estos costos varían inversamente con respecto a la velocidad.

#### 5.3.1. Costos de Operación de los vehículos

En los costos de operación de los vehículos influyen los efectos de las características físicas y la condición del camino sobre la velocidad de operación de los diversos tipos de vehículos, sobre sus consumos de combustible, lubricantes y requerimientos de mantenimiento, además determina el total de costos de operación. La cantidad de los recursos consumidos, tal como los litros de combustible, número de neumáticos, horas de trabajo en mantenimiento, etc. Estos son determinados con la velocidad de los vehículos como función de las características de cada tipo de vehículo y la geometría, tipo de superficie y condición actual del camino. Los costos se encuentran multiplicando las cantidades de recursos consumidos por sus costos unitarios, los que son especificados por el usuario y agregando, los costos correspondientes por depreciación, interés, gastos generales

y además los correspondientes a los valores de tiempo de demora de pasajeros y de retención de cargas.

El usuario puede especificar los precios o costos unitarios en términos económicos o financieros, y puede especificar los elementos de componente extranjera del total de costo. Los costos financieros representan los costos actuales en que incurren los operadores del transporte por poseer y operar los vehículos sobre el camino. El costo económico representa el costo real para la economía por la propiedad y la operación, donde se hacen ajustes para permitir las distorsiones del precio del mercado tales como tasas, impuestos externos, leyes laborales, etc., y donde se encuentran implícitos los costos por tiempo de retención de carga y demora de pasajeros. Los costos de componente extranjera del uso, pueden interpretarse tanto como costos financieros o económicos, los recursos, y los costos de tránsito que usa una determinada sección de camino cada año, puede resumirse como sigue:

1. Calcular la velocidad promedio de operación para cada grupo de vehículos.
2. Calcular la cantidad de recursos consumidos por vehículo-kilómetro por cada grupo, para los siguientes componentes.
  - a. Combustibles
  - b. Consumo de neumáticos
  - c. Repuestos de mantenimiento
  - d. Mano de obra de mantenimiento
  - e. Lubricantes
  - f. Personal
  - g. Depreciación
  - h. Interés
  - i. Gastos generales
3. Multiplicar la cantidad de recursos consumidos por sus correspondientes precios unitarios, para obtener los costos por vehículo-kilómetro de cada grupo.
4. Multiplicar el costo por vehículo-kilómetro, por la longitud de la sección y por el volumen de tránsito medio diario anual (TMDA) de cada grupo y por los 365 días, para obtener el total costos de usuario por año y por grupo de vehículos.
5. Sumando los totales por grupo se obtienen los costos de usuario totales por año.

Durante cualquier proceso de cálculo, los valores de los parámetros que describen el comportamiento del entorno, las características de los vehículos y los costos unitarios, permanecen constantes, mientras que las variables que describen el flujo y composición del tráfico, y el tipo y condición de la superficie (rugosidad) pueden cambiar de año en año.

Con lo anterior podemos concluir que el costo de operación se define como el costo por kilómetro de un vehículo que transita sobre una carretera recta y plana,

esto es, con curvatura y pendiente iguales a cero y con pavimento en muy buenas condiciones (Índice de Rugosidad Internacional igual a 2 m/km, Índice de Servicio igual a 4.3) Dicho costo se calcula como la suma de los productos de los diferentes consumos del vehículo en un kilómetro de recorrido, por sus respectivos costos unitarios.

Con el uso de este concepto, bastará actualizar los costos unitarios periódicamente, utilizando precios promedio nacionales de los vehículos y consumos que se indican más adelante, para actualizar el costo base, multiplicando éste por el factor leído en las gráficas, se obtendrá el costo de operación buscado. Los costos unitarios no deberán incluir impuestos o derechos como el IVA, el Impuesto Sobre la Adquisición de Automóviles Nuevos (ISAN), etc. Esto se debe a que, desde una perspectiva nacional, interesan los costos y beneficios que la construcción y operación de las carreteras representa para el país en su conjunto y en este sentido, los impuestos son sólo transferencias de dinero que el país no gasta, pues no forman parte del costo de producción de los insumos o de los vehículos. Para los combustibles se toma el precio en bomba sin IVA.

Con lo anterior podemos concluir que lo que nos interesa es poder calcular **los costos de operación anuales por kilómetro**, en cada tramo se calculan para cada tipo de vehículo, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$COA = Fb \times CB \times TDPA \times 365$$

Donde:

COA: es el costo de operación anual por kilómetro para todos los vehículos de un mismo tipo

Fb: es el Factor del Costo de Operación Base que se lee de las gráficas para el tipo de vehículo, tipo de terreno y estado superficial deseados. (Gráficas 5.1 a 5.7)

CB: es el Costo de Operación Base del vehículo. (Tablas 5.1 a 5.7)

TDPA: es el Tránsito Diario Promedio Anual del vehículo

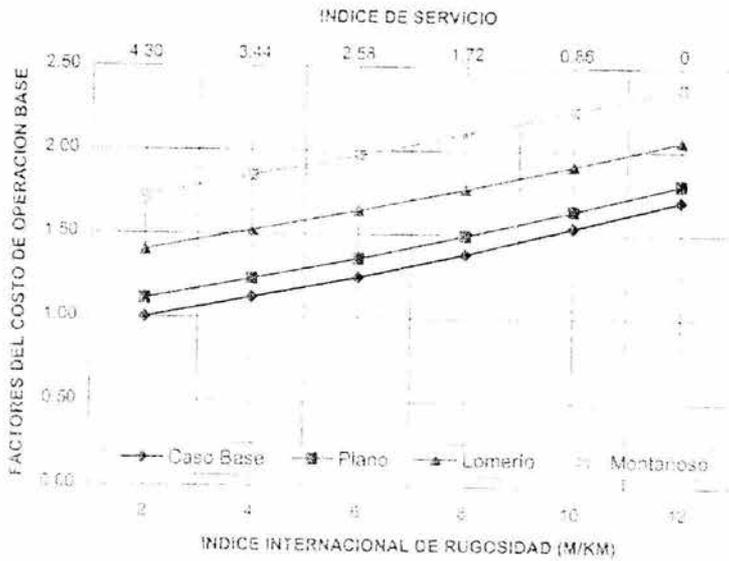
365: corresponde al número de días del año

Las gráficas que se presentan en seguida son para cada uno de los siete vehículos seleccionados: dos camiones articulados con Semiremolque (T3-S3, T3-S2), un camión articulado con Semiremolque y remolque (T3-S2-R4), un camión pesado de tres ejes, un camión mediano de dos ejes, un autobús foráneo y un vehículo ligero. Las gráficas del primer tipo, en la parte superior muestran la relación entre el estado de la superficie de rodamiento, en términos del índice de Servicio y el Índice de Rugosidad Internacional y el costo de operación del vehículo como un factor de su costo de operación base, para tres tipos de terreno, sensiblemente plano (ligeras pendientes y curvas suaves), de lomerío y montañoso. Se incluye como referencia el caso base, correspondiente a un camino recto y plano, con pavimento nuevo. Las gráficas del segundo tipo relacionan, para los tres tipos de terreno mencionados, el estado de la superficie de rodamiento en términos del Índice

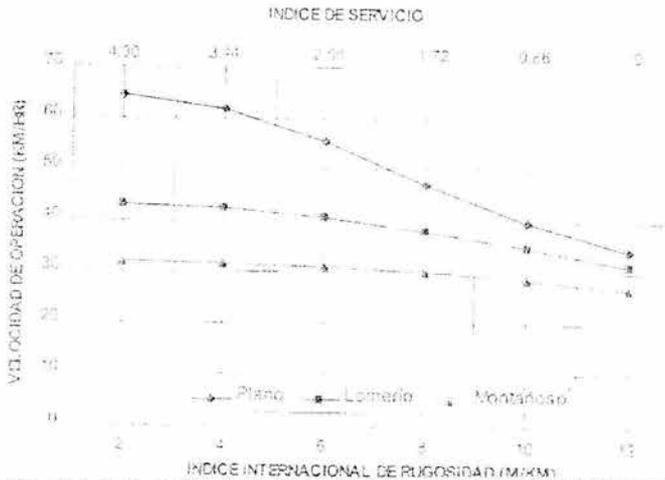
de Servicio y el Índice de Rugosidad Internacional, con la velocidad de operación típica.

Los cálculos de los costos de operación base se presentan para cada uno de los vehículos más comunes que transitan en la red carretera nacional como el Camión Articulado (T3-S3), Camión Articulado (T3-S2), Camión Articulado (T3-S2-R4), Camión de de Tres Ejes, Camión de dos Ejes, Autobús Foráneo y Vehículo ligero. [Estos datos fueron tomados de la Publicación Técnica 202, *Estado Superficial y Costos de Operación en Carreteras* del Instituto Mexicano del Transporte Qro.2002]

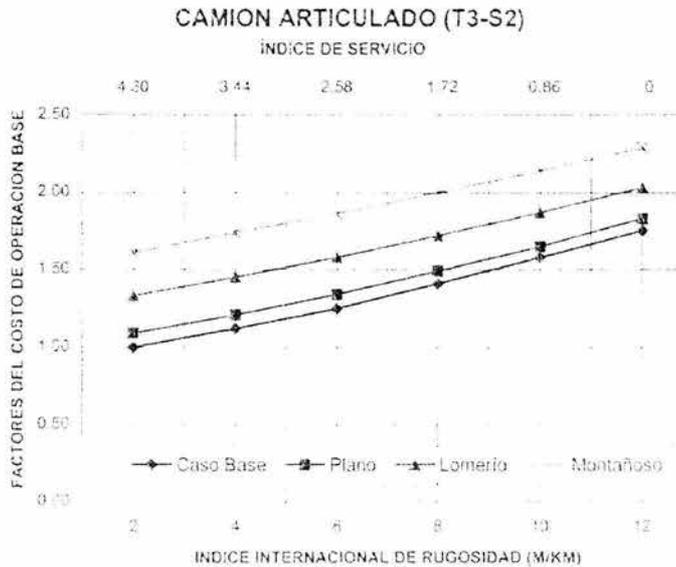
## CAMION ARTICULADO (T3-S3)



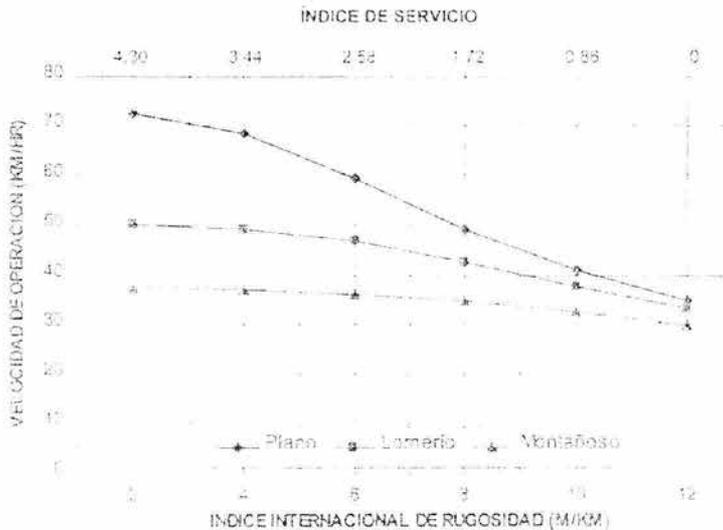
Gráfica 5.1.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera



Gráfica 5.1.B. Relación de la Velocidad de operación de T3-S3 con el Estado Superficial de la Carretera

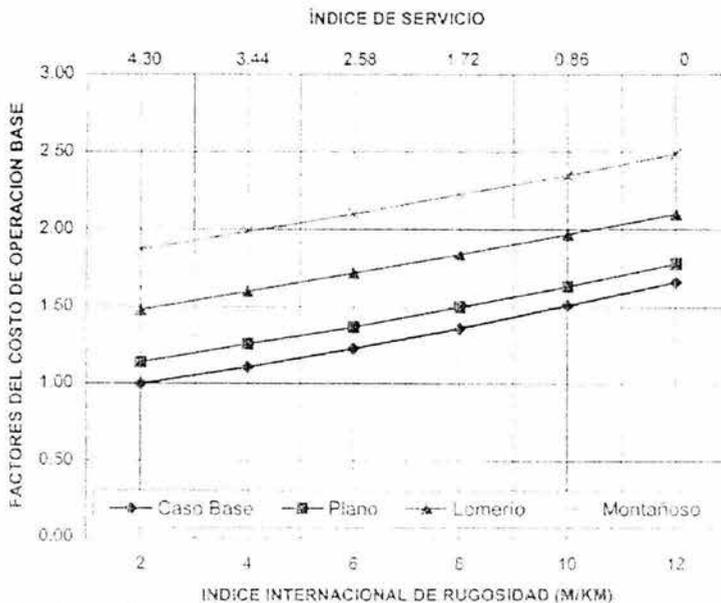


Gráfica 5.2.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera

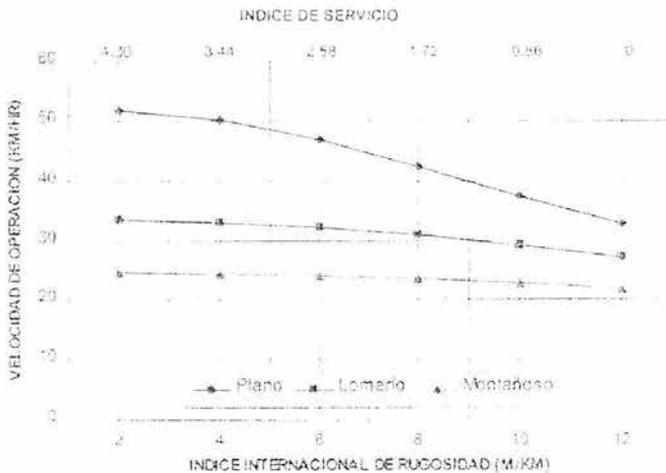


Gráfica 5.2.B. Relación de la Velocidad de operación de T3-S2 con el Estado Superficial de la Carretera

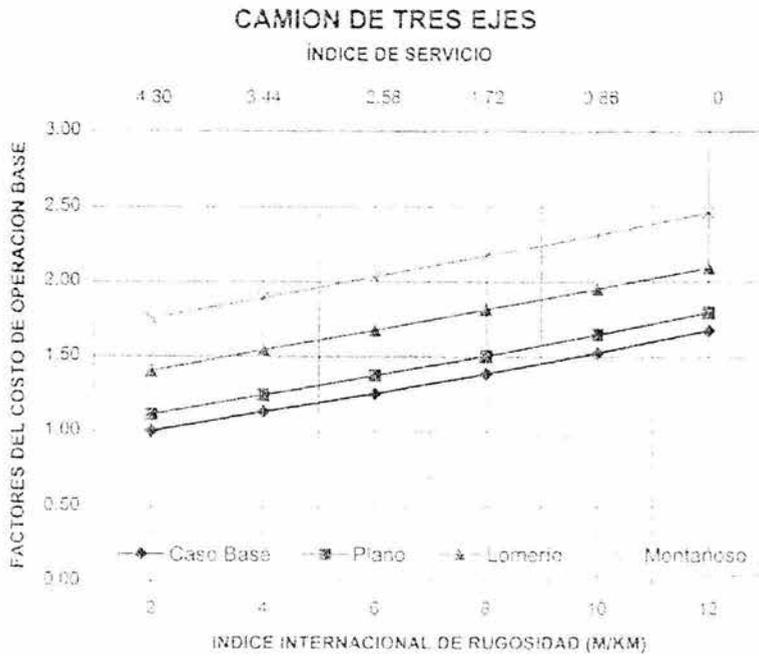
## CAMION ARTICULADO (T3-S2-R4)



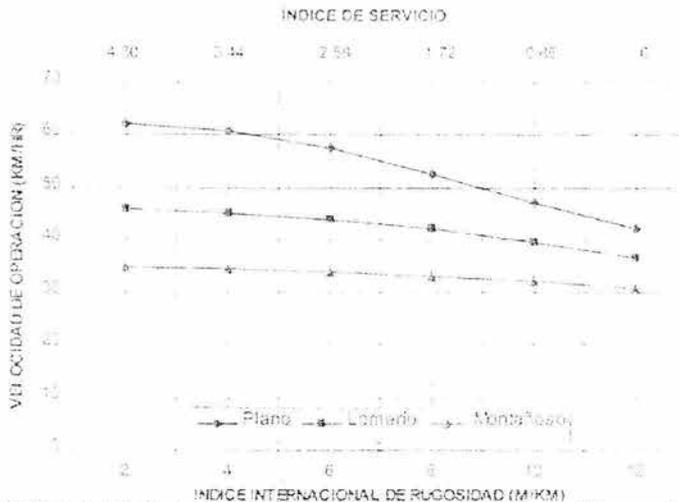
Gráfica 5.3.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera



Gráfica 5.3.B. Relación de la Velocidad de operación de T3-S2-R2 con el Estado Superficial de la Carretera

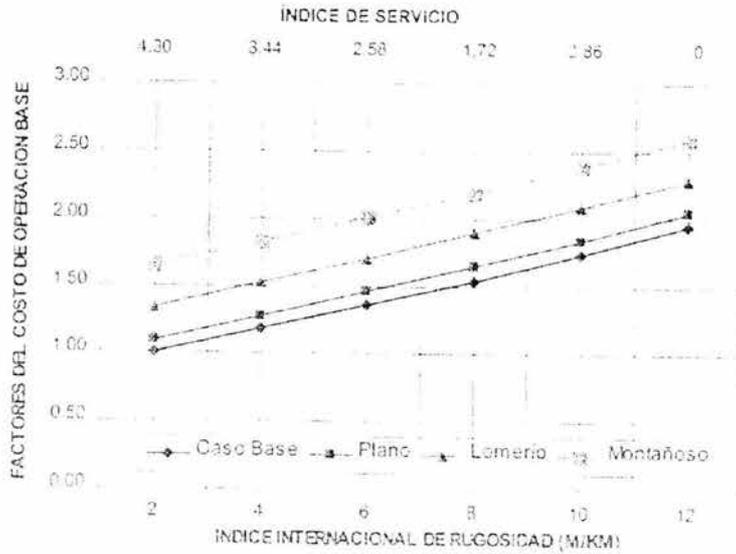


Gráfica 5.4.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera

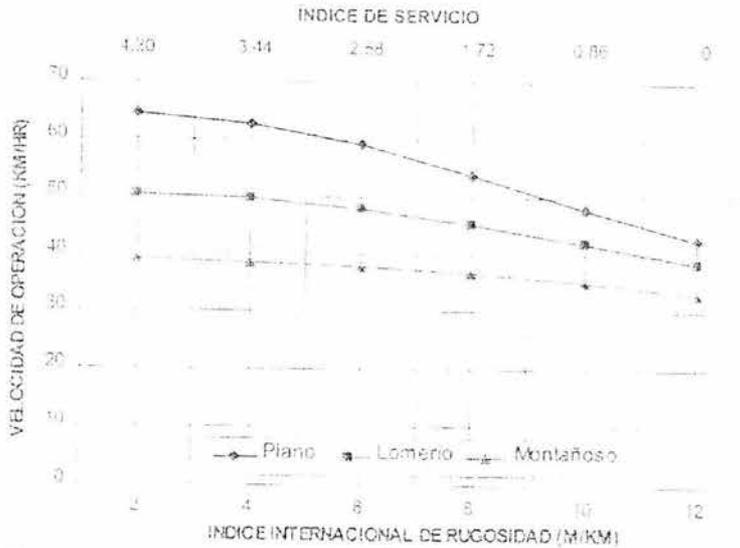


Gráfica 5.4.B. Relación de la Velocidad de operación de C3 con el Estado Superficial de la Carretera

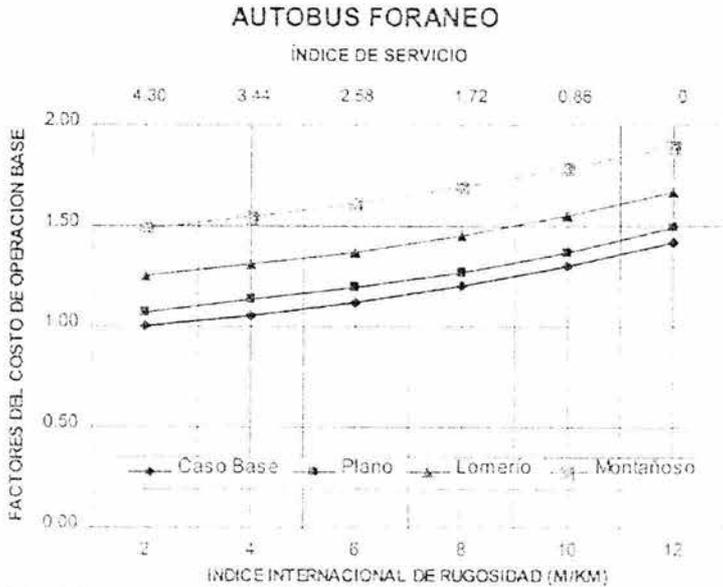
## CAMION DE DOS EJES



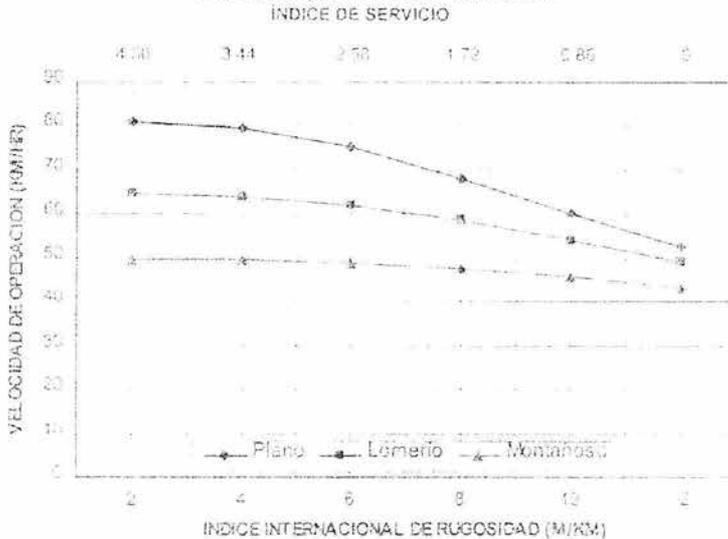
Gráfica 5.5.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera



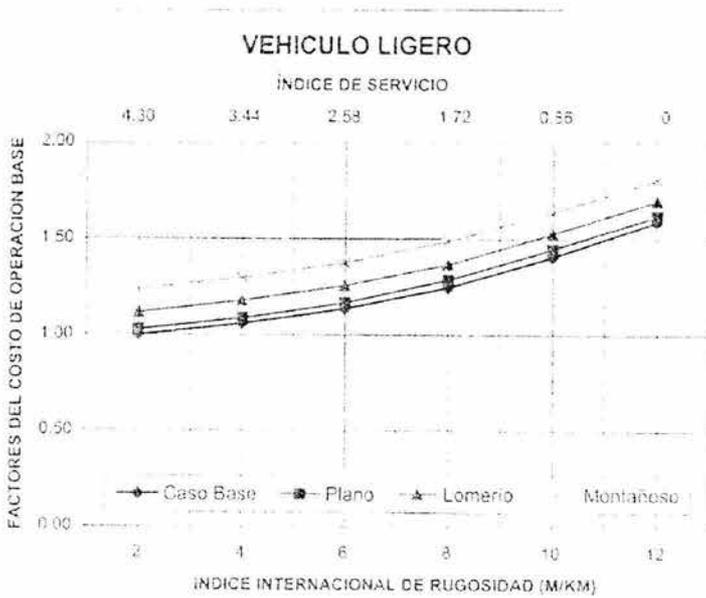
Gráfica 5.5.B. Relación de la Velocidad de operación de C2 con el Estado Superficial de la Carretera



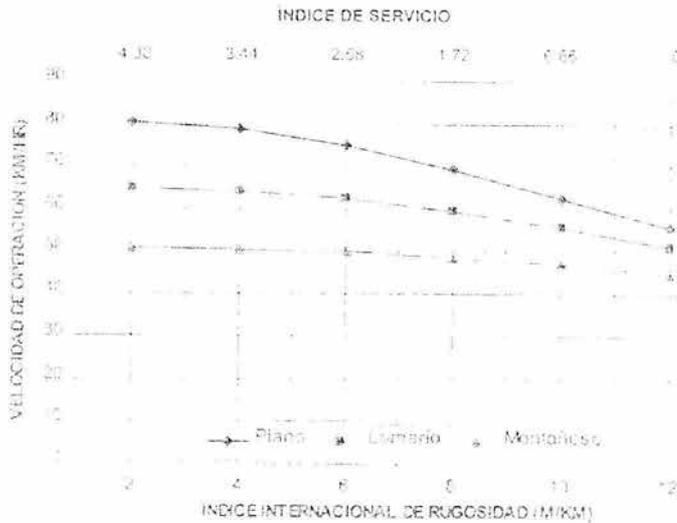
Gráfica 5.6.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera



Gráfica 5.6.B. Relación de la Velocidad de operación del Autobús Foráneo con el Estado Superficial de la Carretera



Gráfica 5.7.A. Relación de los Factores del Costo de Operación Base con el Estado Superficial de la Carretera



Gráfica 5.7.B. Relación de la Velocidad de operación del Vehículo Ligero con el Estado Superficial de la Carretera

<b>CAMION ARTICULADO (T3-S3)</b>		
Tractocamión de tres ejes INTERNACIONAL 9200i con MOTOR DETROIT DIESEL S-60 430 DE 430 HP		
Semiremolque de tres ejes tipo caja de aluminio de 40 pies Llantas 1100-20.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehículo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	574.86
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes	0.45
Tiempo de operador	horas	12.44
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehiculo nuevo	0.06
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehiculo nuevo	
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2003)</b>		
Precio del vehículo nuevo	\$	996 089.19
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1561.7
Tiempo de operador	\$/hora	64.38
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	40.07
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehículo-km	\$	0.75
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehículo-km)</b>	<b>\$</b>	<b>8.26</b>
Consumo de combustible	\$	2177.97
Uso de lubricantes	\$	71.61
Consumo de llantas	\$	710.98
Tiempo de operador	\$	652.1
Mano de obra de mantenimiento	\$	1046.95
Refacciones	\$	2846.65
Depreciación	\$	507.48
Interés	\$	202.99
Costos Indirectos	\$	751.05

Tabla 5.1  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Camión Articulado (T3-S3)

<b>CAMION ARTICULADO (T3-S2)</b>		
Tractocamión de tres ejes INTERNACIONAL 9200i con MOTOR DETROIT DIESEL S-60 430 DE 430 HP		
Semiremolque de dos ejes tipo caja de aluminio de 40 pies Lantas 1100-20.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehiculo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	480.64
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	Núm de llantas nuevas equivalentes	0.38
Tiempo de operador	horas	11.63
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehiculo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehiculo nuevo	0.05
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehiculo nuevo	0.02
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2003)</b>		
Precio del vehiculo nuevo	\$	963 364.19
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1561.7
Tiempo de operador	\$/hora	64.38
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	40.07
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehiculo-km	\$	0.69
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehiculo-km)</b>	<b>\$</b>	<b>7.56</b>
Consumo de combustible	\$	1821.63
Uso de lubricantes	\$	61.71
Consumo de llantas	\$	617.4
Tiempo de operador	\$	615.99
Mano de obra de mantenimiento	\$	1046.95
Refacciones	\$	2557.3
Depreciación	\$	462.85
Interés	\$	185.14
Costos Indirectos	\$	687.05

Tabla 5.2  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Camión Articulado (T3-S2)

<b>CAMION ARTICULADO (T3-S2-R4)</b>		
Tractocamión de tres ejes INTERNACIONAL 9200i con MOTOR DETROIT DIESEL S-60 430 DE 430 HP		
Semiremolque de dos ejes tipo caja de aluminio de 40 pies Llantas 1100-20.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehículo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	753.68
Uso de lubricantes	litros	5.45
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes	0.64
Tiempo de operador	horas	14.63
Mano de obra de mantenimiento	horas	30.48
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.27
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.07
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehículo nuevo	0.03
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2003)</b>		
Precio del vehículo nuevo	\$	1 096 178.08
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1561.7
Tiempo de operador	\$/hora	64.38
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	40.07
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehículo-km	\$	0.94
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehículo-km)</b>		<b>10.32</b>
Consumo de combustible	\$	2856.44
Uso de lubricantes	\$	61.71
Consumo de llantas	\$	875.77
Tiempo de operador	\$	649.18
Mano de obra de mantenimiento	\$	1046.95
Refacciones	\$	2992.96
Depreciación	\$	709.88
Interés	\$	283.95
Costos Indirectos	\$	938.05

Tabla 5.3  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Camión Articulado (T3-S2-R4)

<b>CAMION DE TRES EJES</b>		
Camión pesado tres ejes DINA 661 con motor CATERPILLAR 3126B EPA 99		
Carrocería de estacas 2.44 x 2.10 m x 22 pies Llantas 1100-20.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehículo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	483.12
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes	0.26
Tiempo de operador	horas	13.76
Mano de obra de mantenimiento	horas	12.44
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.22
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.06
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehículo nuevo	0.03
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2003)</b>		
Precio del vehículo nuevo	\$	608 300.05
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1561.7
Tiempo de operador	\$/hora	64.38
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	40.07
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehículo-km	\$	0.47
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehículo-km)</b>	<b>\$</b>	<b>5.16</b>
Consumo de combustible	\$	1831.02
Uso de lubricantes	\$	38.17
Consumo de llantas	\$	451.51
Tiempo de operador	\$	634.45
Mano de obra de mantenimiento	\$	486.34
Refacciones	\$	1092.25
Depreciación	\$	462.85
Interés	\$	185.14
Costos Indirectos	\$	469.05

Tabla 5.4  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Camión de Tres Ejes

<b>CAMION DE DOS EJES</b>		
Camión pesado dos ejes DINA 551 con motor CATERPILLAR 3126B EPA 99		
Carrocería de estacas 2.44 x 2.10 m x 22 pies Llantas 1100-20.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehiculo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	329.43
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes	0.17
Tiempo de operador	horas	14
Mano de obra de mantenimiento	horas	8.18
Refacciones	% precio vehiculo nuevo	0.15
Depreciación	% precio vehiculo nuevo	0.07
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehiculo nuevo	0.03
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2002)</b>		
Precio del vehiculo nuevo	\$	499 500
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1561.7
Tiempo de operador	\$/hora	58.83
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	40.07
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehiculo-km	\$	0.33
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehiculo-km)</b>	<b>\$</b>	<b>3.59</b>
Consumo de combustible	\$	1248.55
Uso de lubricantes	\$	38.17
Consumo de llantas	\$	231.75
Tiempo de operador	\$	634.45
Mano de obra de mantenimiento	\$	354.08
Refacciones	\$	684.48
Depreciación	\$	357.78
Interés	\$	103.11
Costos Indirectos	\$	326

Tabla 5.5  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Camión de Dos Ejes

<b>AUTOBÚS FORANEO</b>		
Autobús Integral Foráneo con motor CUMMINS ISM 370 de 370 HP		
Sin aire acondicionado Llantas 1100-22.00 normal		
<b>Consumos por cada 1000 vehículo-km</b>		
Consumo de combustible	litros	366.12
Uso de lubricantes	litros	3.37
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes	0.3
Tiempo de operador	horas	11.45
Mano de obra de mantenimiento	horas	11.06
Refacciones	% precio vehículo nuevo	0.13
Depreciación	% precio vehículo nuevo	0.05
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehículo nuevo	0.02
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2002)</b>		
Precio del vehículo nuevo	\$	1 871 572.85
Costo de combustible	\$/litro	4.79
Costo de lubricantes	\$/litro	12.32
Costo de llanta nueva	\$/llanta	1433
Tiempo de operador	\$/hora	55.47
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora	47.15
Tasa de interés anual	%	10
Costos indirectos por vehículo-km	\$	0.62
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehículo-km)</b>	<b>\$</b>	<b>6.79</b>
Consumo de combustible	\$	1387.59
Uso de lubricantes	\$	38.17
Consumo de llantas	\$	407.04
Tiempo de operador	\$	635.15
Mano de obra de mantenimiento	\$	521.38
Refacciones	\$	2383.78
Depreciación	\$	786.87
Interés	\$	314.75
Costos Indirectos	\$	617

Tabla 5.6  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Autobús Foráneo

<b>VEHICULO LIGERO</b>			
Panel (Combi) Volkswagen con motor de 86 HP			
Llantas Goodyear convencionales			
<b>Consumos por cada 1000 vehículo-km</b>			
Consumo de combustible	litros		157.59
Uso de lubricantes	litros		1.85
Consumo de llantas	núm de llantas nuevas equivalentes		0.06
Tiempo de operador	horas		11.35
Mano de obra de mantenimiento	horas		2.15
Refacciones	% precio vehículo nuevo		0.14
Depreciación	% precio vehículo nuevo		0.45
Intereses (Tasa 10%)	% precio vehículo nuevo		0.12
<b>Costos Unitarios (miles de pesos, precios 2002)</b>			
Precio del vehículo nuevo	\$		179 619.6
Costo de combustible	\$/litro		5.5
Costo de lubricantes	\$/litro		12.65
Costo de llanta nueva	\$/llanta		627.85
Tiempo de operador	\$/hora		28.86
Mano de obra de mantenimiento	\$/hora		27.75
Tasa de interés anual	%		10
Costos indirectos por vehículo-km	\$		0.2
<b>Costo de Operación Base (pesos por vehículo-km)</b>		<b>\$</b>	<b>2.22</b>
Consumo de combustible	\$		720.19
Uso de lubricantes	\$		21.57
Consumo de llantas	\$		31.59
Tiempo de operador	\$		214.04
Mano de obra de mantenimiento	\$		39.22
Refacciones	\$		215.73
Depreciación	\$		597.94
Interés	\$		189.38
Costos Indirectos	\$		202

Tabla 5.7  
Consideraciones para obtener los costos de operación  
Vehículo Ligero

### 5.3.2. Costos de Tiempo de viaje

La evaluación de los ahorros en tiempo de viaje se realiza a partir del cálculo de las velocidades de los distintos tipos de vehículos. Las velocidades están relacionadas con las características geométricas y la condición del pavimento. Los ahorros en tiempos de viaje son calculados por separado para tránsito normal y generado.

Beneficios en el tiempo de viaje debidos al tránsito normal:

$$\Delta T_{CN} (m - n) = \sum TN_i [UT_{ni} - UT_{mi}]$$

Beneficios en el tiempo de viaje debidos al tránsito generado:

$$\Delta T_{CG} (m - n) = \sum \frac{1}{2} [TG_{mi} + TG_{ni}] [UT_{ni} - UT_{mi}]$$

Donde:

$\Delta T_{CN} (m - n)$  = Beneficios en el tiempo de viaje debidos al tránsito normal de la Alternativa m respecto a la alternativa n.

$UT_{ji}$  = Promedio del costo de tiempo de viaje para cada tipo de vehículo de la alternativa j.

$\Delta T_{CG} (m - n)$  = Beneficios en el tiempo de viaje debidos al tránsito generado para la alternativa m respecto de la alternativa n en un año determinado.

Las sumatorias  $\sum$  son sobre todos los tipos de vehículos especificados por el usuario

### 5.4. Metodología de Análisis

Como hemos visto en este capítulo existen diferentes tipos de costos, y todos o la gran mayoría se relacionan con el estado actual de la superficie del pavimento esto en gran medida por el tránsito y el medio ambiente, y si a lo anterior le agregamos el tiempo como medida de *evolución* podemos ver enseguida los distintos efectos que se pueden presentar.

#### 5.4.1. Efecto de la condición actual de la carretera en los Costos Totales

La condición actual del camino influye directamente con los costos totales ya que existe una relación directa entre el estado superficial del pavimento con el TPDA ya que si se tiene un buen estado superficial es menor el desgaste del vehículo que transite. El costo total en que se incurre en las posibilidades manejadas de IRI se

relaciona con el tiempo de evolución. A medida de que transcurre el tiempo se deteriora el camino y esto hace aumentar los costos en todos los sentidos además que en muchas ocasiones transitan vehículos demasiado pesados que afectan gravemente el estado del camino, estas condiciones se observan en las carreteras mexicanas, que en ocasiones se desvían del estricto cumplimiento del reglamento de 1994. Hay muchas combinaciones de condiciones; que se presentan en relación a los costos totales y al estado superficial, donde si el Índice de Rugosidad Internacional es menor menores serán los costos totales y reciprocamente si el IRI es mayor mayores serán los costos totales.

Ahora considerando la resistencia estructural puede decirse que es más influyente que el solo estado superficial actual, en los costos totales en que se incurre. Obviamente el tránsito modula la influencia de la sección resistente inicial; en tránsitos bajos, la diferencia en porcentaje entre conservar un camino débil y otro fuerte es más notable en el costo total que en tránsitos más altos, lo cual, entre otras cosas, también se debe a que a mayor circulación en la carretera, los costos operativos crecen más significativamente en comparación a los costos de obra, por ejemplo bajo un tránsito de 5000 vehículos, las diferencias en costo total que se obtienen al mantener un camino con la estructura más débil o con la más fuerte no exceden de un 10% y frecuentemente son bastante menores. Esta diferencia puede ser de un orden de un 30% para tránsitos del orden de 1000. los costos totales comparativos resultan siempre menores cuanto mejor se sostenga la calidad del camino (IRI) en tránsitos altos, si bien el caso de tránsitos bajos, los costos totales tienden a parecerse mucho para las evoluciones de la calidad hasta IRI igual a 3, 5 ó 7. Además, los menores costos relativos se obtienen conservando un IRI mayor.

Otra conclusión es que, como era de preverse, a tránsitos muy elevados los costos de operación son prácticamente los únicos que rigen y los costos de obra y mantenimiento no son mayormente influyentes en las cifras totales.

#### **5.4.2. Efecto del nivel de calidad en la Carretera en los Costos de Obra y de Operación**

El efecto de la calidad en el estado superficial de la carretera influye directamente en los costos de obra y operación, aunque como ya se comento. Y vemos que en los costos de obra si se desea una mayor calidad en el estado superficial mayores serán los costos a invertir. Al momento de hacer alguna intervención a la carretera para mejorar su estado superficial se debe considerar la constitución de nuestra sección estructural. La siguiente tabla 5.1 muestra los principales tipos de secciones con las que están constituidas las carreteras mexicanas.

SECCION	CAPA	ESPESOR	VRS
SECCIÓN I	Carpeta	5 cm.	-
	Base Granular	12 cm.	40
	Subbase Granular	15 cm.	20
	Subrasante	0 cm.	-
	Terracería	-	5
SECCIÓN II	Carpeta	5 cm.	-
	Base Granular	15 cm.	50
	Subbase Granular	20 cm.	30
	Subrasante	30 cm.	15
	Terracería	-	-
SECCIÓN III	Carpeta	7 cm.	-
	Base Granular	25 cm.	60
	Subbase Granular	25 cm.	30
	Subrasante	30 cm.	20
	Terracería	-	-
SECCIÓN IV	Carpeta	7.5 cm.	-
	Base Granular	30 cm.	80
	Subbase Granular	30 cm.	40
	Subrasante	40 cm.	30
	Terracería	-	-
SECCIÓN V	Carpeta	10 cm.	-
	Base Granular	30 cm.	80
	Subbase Granular	30 cm.	40
	Subrasante	40 cm.	30
	Terracería	-	-

Tabla 5.8  
Secciones Estructurales más Comunes de Carreteras Mexicanas

La evolución del costo de operación con el IRI en las diferentes secciones y tránsitos se relacionan íntimamente ya que para una sección I y tránsito regular el costo de operación será mayor aunque los costos de obra serán menores de manera inversa cuando mayor sea el tipo de sección mayor será el costo de obra aunque disminuirá el costo de operación en función de su estado superficial.

El mensaje general es claro. Las secciones débiles con tránsitos muy bajos conducen a una política económica consistente en permitir un IRI pobre, en tanto que a medida que el tránsito crece, resulta rápidamente más económico optar por una política de mantenimiento de la carretera en buenas o muy buenas condiciones de calidad, ello debido a la creciente influencia de los costos operativos. Específicamente, los análisis realizados demuestran de la conveniencia de conservar las carreteras de mayor importancia económica evitando que su calidad de rodamiento decaiga por debajo de un IRI = 3 para carreteras de baja importancia económica, el estado superficial puede dejarse decaer hasta un IRI =7 (pero no por debajo de este valor). Para carreteras de importancia intermedia, la situación idealmente óptima de IRI se ubica en valores intermedios a los señalados anteriormente para las condiciones de  $TPDA < 500$  y  $TPDA > 3000$  (por ejemplo IRI =6 para TDPA entre 500 y 1500, IRI =5 para TDPA entre 1500 y 2000 en IRI =4 para TDPA entre 2000 y 3000). Con lo anterior podemos decir que los tránsitos altos favorecen políticas conducentes a tener las carreteras en buen estado y cuantifican estas tendencias.

#### **5.4.3. Evolución de los Costos de Operación**

La evolución de los costos operativos va en función con el estado superficial de la carretera y con el TDPA. Si la carretera recibe un mantenimiento periódico mantendrá un nivel de servicio aceptable y esto a lo largo del tiempo se traduce en menores gastos de operación. De acuerdo con la política de intervenciones de conservación más frecuentes conduce a costos operativos ligeramente más bajos que si se da algún tipo de mantenimiento los costos operativos serían altísimos, que los que ocurrirían con la intervención fundamental de más largo plazo. También puede concluirse que la calidad final que se acepte para la carretera tiene una significación obvia, en el sentido de que cuanto más alta es la calidad, los costos operativos bajan como ejemplo (en valores de 15-20%, entre IRI = 7 y 3).

#### **5.4.4. Evolución de los Costos de Obra en Trabajos de Conservación y/o Reconstrucción**

A medida que pasa el tiempo y considerando el TDPA existen diversos tipos de deterioro como ya hemos visto, esto relaciona la evolución de los costos de obra en trabajos de conservación y/o reconstrucción de nuestra carretera de acuerdo con su estado superficial y su tipo de sección.

Para las secciones débiles se llega a menores costos de obra con intervenciones mayores a 15 años, efecto que tiende a agudizarse cuanto mayor sea el tránsito; sin embargo, para secciones estructurales más fuertes, el efecto se va atenuando y llega a revertirse, con notoria influencia de su estado superficial IRI bajo (calidad alta). Los cálculos respaldan la idea de que si se desea que carreteras de alto tránsito se mantengan en excelente niveles de calidad, deberá dotárselas de secciones estructurales resistentes.

### **5.5. Análisis Económico de Costos y beneficios**

La selección de la alternativa de mantenimiento o rehabilitación a implementar en una sección de pavimento requiere de un procedimiento sistemático de aproximación que considere todos los factores relevantes. Estos incluyen el diseño, análisis de ingeniería y análisis económicos de las diferentes alternativas. No existe un único método aceptado para el desarrollo de las alternativas de diseño factibles a considerar en un proyecto de pavimento. Un considerable criterio de ingeniería debe ser aplicado a cada proyecto en particular. La alternativa que puede ser seleccionada como la mejor para un determinado proyecto, determinando los costos y beneficios implica su implementación en el ciclo de vida bajo análisis.

El modelo que es presentado está diseñado para facilitar la comparación económica entre diferentes alternativas de mantenimiento, tomando en cuenta la relación que existe entre ellas y la calidad del camino (generalmente expresada en rugosidad, IRI) y los costos de operación de los vehículos o ingresos percibidos por cobro de peaje. Las alternativas son definidas mediante la asignación de diferentes alternativas de construcción y mantenimiento, tránsito, y la especificación de costos y beneficios exógenos. Cada modelo de costos provee la posibilidad de calcular los costos de conservación, mantenimiento y de operación de vehículos. La diferencia entre estos costos son la base para la evaluación económica de una alternativa respecto a la otra o de cualquier alternativa respecto de una estrategia definida como "Base" (situación sin proyecto).

El análisis de los costos en el ciclo de vida de un pavimento permite al diseñador escoger la alternativa que proveerá el comportamiento deseado al menor costo en el horizonte de tiempo bajo estudio. Para lograr esto, se deben tomar en cuenta, todos los costos asociados a la implementación de una alternativa determinada, incluyendo costos de construcción, mantenimiento y de usuarios. Algunos de estos costos deben ser predichos mediante el uso de modelos durante la vida del pavimento, pero esto no siempre es fácil de implementar. Costos asociados de pavimentos que pertenecen a la misma área pueden proveer un buen indicador de los costos relacionados a la alternativa de bajo análisis.

El rango más amplio de elementos asociados a un proyecto vial permite subdividir los costos de las siguientes tres categorías generales:

*Costos y beneficios no cuantificables* (mejoramiento en el bienestar social, impactos ecológicos, etc. )

*Costos y beneficios cuantificables pero no posibles de convertir unidades monetarias* (seguridad, nivel de ruido, etc. )

*Costos y beneficios cuantificables y posibles de convertir a unidades monetarias* (mantenimiento y rehabilitación, operación vehicular, tiempo de viaje, ingresos por cobros de peajes, etc.).

La posibilidad de poder o no poder cuantificar determinados costos o beneficios, depende de la existencia de los modelos o técnicas de medición que permitan así asignarles una magnitud. Además la posibilidad del hecho que sea posible establecer la magnitud de un determinado costo o beneficio no garantiza su valoración. Esto se debe principalmente a que algunos elementos están definidos a un nivel conceptual, sin tener una idea clara, por el momento, de cuál es realmente el costo o beneficio que provocan los usuarios de las carreteras.

### 5.5.1. Costos y beneficios de Carreteras

Para cada alternativa en un proyecto, y para cada año del período de análisis, las cantidades físicas involucradas en la construcción y en el mantenimiento son calculadas posteriormente multiplicadas por sus respectivos valores unitarios ( o como precios unitarios ). Los costos resultantes son clasificados de acuerdo a las categorías de capital y de recurrente.

Costos de capital son aquellos en los cuales se incurre debido a la materialización de una rehabilitación, realizados en un momento que es determinado por la evaluación técnica de la alternativa a implementar. Por otro lado, los costos recurrentes son aquellos que son realizados en forma anual durante la vida útil para que el pavimento sirva a los propósitos para los cuales fue diseñado.

Las diferencias de costos entre cada alternativa y la estrategia definida como base son calculadas a partir de los costos totales para cada una de estas dos categorías.

Costo Capital:  $\Delta CAP(m-n) = CAP m - CAP n$

Costo Recurrente:  $\Delta REC(m-n) = REC m - REC n$

Donde:

$\Delta CAP(m-n)$  = Diferencia entre los costos de capital entre la alternativa m con respecto a la alternativa n para un proyecto determinado en un año determinado.

$CAP_j$  = Costo total de capital incurrido en la implementación de la alternativa j.  
 $\Delta REC(m-n)$  = Diferencia entre los costos recurrentes entre la alternativa m con respecto a la alternativa n para un proyecto determinado en un año determinado.

$REC_j$  = Costo total recurrente incurrido en la implementación de la alternativa j.

### 5.5.2. Costos y beneficios de vehículos

Los beneficios anuales en términos de costos de operación de vehículos calculados para el tránsito normal generado. El tránsito normal está definido como el tránsito total por el caso base, el tránsito generado es el tránsito atraído o diferido en el camino debido a los mejoramientos realizados con respecto a la situación base. En el proceso de evaluación de los beneficios percibidos por los usuarios, cada grupo de vehículos es tratado como una entidad separada la cual tiene asociados a sus costos de viaje.

Las componentes de costos de operación relacionados con el comportamiento del pavimento son: Consumo de combustibles, Consumo de neumáticos, Gastos en mantenimiento, Gastos en lubricantes, depreciación del vehículo, Repuestos. El cálculo de cada componente es realizado por separado en cada tipo de vehículo y luego sumados para llegar al total de los costos de operación. En el contexto de las definiciones de tránsito normal y generado, los beneficios en una alternativa n, para un proyecto determinado en un determinado año, son calculados usando las siguientes fórmulas:

Beneficios en los costos de operación debidos al tránsito normal:

$$\Delta VCN(m-n) = \sum TN_i [UC_{ni} - UC_{mi}]$$

Beneficios en los costos de operación debidos al tránsito generado:

$$\Delta VCN(m-n) = \sum \frac{1}{2} [TG_{mi} + TG_{ni}] [UC_{ni} - UC_{mi}]$$

Donde:

$\Delta VCN(m-n)$  = Beneficios en los costos de operación de los vehículos debidos a la alternativa m respecto a la alternativa n.

$TN_i$  = Número de vehículos tipo i por año en ambas direcciones.

$UC_i$  = Promedio del costo de operación por viaje por el vehículo tipo i bajo la alternativa j.

$\Delta VCN(m-n)$  = Beneficios en los costo de operación de los vehículos debidos al tránsito generado en la alternativa m respecto a la alternativa n.

$TG_{mi}$  = Tránsito generado para tipo de vehículo  $i$  debido a la alternativa  $j$ , relativo a la alternativa base, en número de vehículos por año en ambas direcciones.

Las sumatorias  $\sum$  son sobre todos los tipos de vehículos especificados por el usuario.

### 5.5.3. Costos y beneficios exógenos

Los ahorros en los costos de operación y tiempo de viaje calculados por los modelos VOC (Costos de Operación Vehicular) normalmente constituyen la totalidad de los beneficios, posibles de evaluar, para la sociedad de producto de mejoramientos en los caminos. Dentro de las excepciones están las reducciones de accidentes, impactos ambientales, condiciones de flujo de tránsito, aumentó en los costos de operación debidos a congestión. Si estos efectos son significativos, ellos pueden ser estimados separadamente como valores externos a los efectos calculados internamente por el modelo VOC.

El modelo de costos y beneficios utiliza valores provistos por el usuario para calcular, en cada año de análisis, los beneficios y los costos externos, haciendo que los resultados estén disponibles para el modelo de análisis económico. Los flujos de costos y beneficios pueden ser especificados para comenzar en un determinado año o después de un proyecto de construcción.

Para cada par de alternativas a ser comparadas para una cierta sección de pista un determinado año, los beneficios externos son:

$$\Delta m - EXB_n - EXC_n$$

Donde:

$\Delta EXB(m-n)$  = Diferencia entre el beneficio neto de la alternativa  $m$  con respecto de la alternativa  $n$ .

$EXB_j$  = Beneficio externo para la alternativa  $j$ , dado por el modelo para un tramo y año determinado.

$EXC_j$  = Costo externo para la alternativa  $j$ , dado por el modelo para un tramo y año determinado.

#### 5.5.4. Comparaciones y análisis económicos

En este aspecto hay que diferenciar el punto de vista del análisis, ya sea social o privado, en cuanto a los beneficios sociales de una carretera, donde se pueden mencionar:

- Reducciones directas o indirectas
- De ganancias en los comercios aledaños a la obra, en valor y uso del suelo, intercambios comerciales, mejoras estéticas, aumento de actividades al sector involucrado.

Para poder evaluar los beneficios desde la reducción en los costos de operación es necesario determinar que variables afectan los costos de operación. En la Figura, se puede observar como el nivel de servicio afecta el comportamiento de la carretera, y esta última junto con los costos de tiempo de viaje y los costos de operación, afectan a los usuarios, tanto en sus costos como en sus beneficios. De su análisis pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- A medida que la índice de servicio disminuye, los costos de tiempo de viaje aumentan pues la velocidad disminuye.
- Cuando ocurre alguna rehabilitación o mejora, los tiempos de viaje aumentan a un máximo debido a las demoras ocasionadas por los trabajos.
- A medida que el índice de servicio se acerca a un nivel terminal, los costos de operación aumentan.
- Las estrategias que usan niveles terminales para iniciar la rehabilitación, producen mayores costos de operación.

En cuanto a los beneficios privados, desde el punto de vista de un concesionario u operador privado de una obra vial, sus beneficios normalmente están dados por los cobros que deben pagar los usuarios, denominados generalmente como peajes.

Existen dos tipos de evaluaciones económicas posibles de realizar en un proyecto vial. Estas son desde el punto de vista de la cantidad encargada de realizar la inversión, Social o Privada.

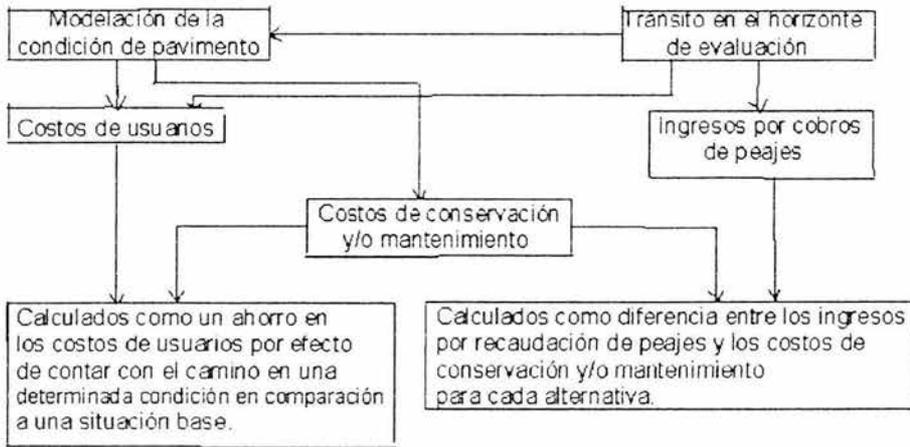


Figura 5.8.  
Beneficios sociales y privados

En una evaluación social son las agencias de gobierno o públicas las que realizan la inversión, por lo tanto su interés es el de maximizar el beneficio público con la realización de proyectos de mantenimiento o rehabilitación. Las carreteras son además operadas por agencias públicas de gobierno. El beneficio público es evaluado como un ahorro en los costos de los usuarios, como consecuencia de contar con carreteras en mejor condición.

Como contraparte, la evaluación privada busca maximizar los ingresos por concepto de costo de peajes a los usuarios con respecto al costo de mantenimiento y rehabilitación exigidos por una condición mínima aceptable de camino. La idea es dar un mejor servicio para que los flujos vehiculares sean atraídos a utilizar la carretera bajo concesión. Esta restricción es generalmente impuesta por agencias públicas de gobierno cuando el camino es entregado en concesión.

La factibilidad de un proyecto está dada principalmente por la relación entre sus costos y beneficios. Como se discutió anteriormente, entre los principios básicos se encuentra aquel que indica que todas las alternativas posibles deben considerar todos sus costos y beneficios correspondientes, por esto es necesario tener muy claro cuáles son estos en cada caso.

Capítulo

# 6

ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Métodos de Evaluación Económica

## Capítulo 6. Métodos de Evaluación Económica

### 6.1. El valor del dinero en el tiempo

Los estudios en la evaluación de carreteras de proyectos de capital deben considerar el rendimiento que un proyecto dado producirá o deberá producir, como los proyectos de infraestructura económica y social tienen la función de atender necesidades básicas de la población y el objetivo que se busca es generar la mayor cantidad de beneficios en bien de los usuarios. El concepto del valor del dinero en el tiempo para el caso de las carreteras se ve en la forma que al momento de invertir dinero en algún proyecto carretero este proyecto pueda reeditar a lo largo del tiempo el dinero invertido para poder recuperar los costos de inversión que se utilizaron para su construcción y/o mantenimiento para de esta forma brindar la mayor cantidad de beneficios a los usuarios.

Para poder llegar a lo anterior necesitamos pasar por varias etapas de estudios tanto técnicos como económicos, con esto vamos a generar varias alternativas que se van a evaluar, y ver cual es la que más nos conviene desde el punto de vista económico.

### 6.2. Comparación de Alternativas

En este capítulo se aplica el concepto de valor del dinero en el tiempo, para comparar las alternativas de inversión en nuestra carretera en estudio. Aunque con frecuencia intervienen múltiples objetivos en la comparación de alternativas. Un sistema que se puede usar para comparar alternativas económicas de inversión se resume como sigue:

- Definir el conjunto de alternativas de inversión y económicamente factibles para que se les compare.
- Definir el período de tiempo (horizonte de planificación) que se utilizará en el estudio económico.
- Obtener los perfiles de flujo de efectivo para cada alternativa.
- Especificar el valor del dinero en el tiempo que se va utilizar.
- Especificar la medida (o medidas) de eficacia que se van a utilizar.
- Comparar las alternativas utilizando la medida (o medidas) de eficacia.
- Escoger la mejor alternativa.

Además en este capítulo se presentan los distintos procedimientos para comparar alternativas de inversión, con el objeto de mejorar el tipo de mediciones de los aspectos cuantitativos de las alternativas de inversión de capital. Una comparación de alternativas de inversión, para ser completa requiere un conocimiento de las diferencias en flujos de efectivo entre las alternativas de inversión. En algunas

de las diferencias en flujos de efectivo entre las alternativas de inversión. En algunas aplicaciones del sector público la cuantificación de beneficios en unidades económicas no es una tarea trivial.

### 6.2.1. Alternativas mutuamente excluyentes

Una alternativa que se seleccione entre un conjunto de alternativas mutuamente excluyentes, puede estar constituida por varias propuestas de inversión, una propuesta de inversión es un proyecto único considerando como posibilidad de inversión. Es una posible opción de decisión. Así toda propuesta puede ser una alternativa de inversión, sin embargo, una alternativa de inversión puede estar formada por un grupo de alternativas de inversión.

Cuando la aceptación de una propuesta dentro de un grupo no tiene ningún efecto sobre la aceptación de otra alternativa, se dice que estas alternativas son independientes. Si la aceptación de una alternativa impide la aceptación de otra, se dice que las propuestas son mutuamente excluyentes.

Cuando se han formulado diversas propuestas o proyectos con la misma finalidad, para satisfacer la misma necesidad o para cumplir funciones equivalentes, entonces se habla de proyectos dependientes; ya que la elección de alguno de ellos invalida la elección de los otros, en este caso se dice que los proyectos son mutuamente excluyentes, pues al elegir uno se excluye la elección de los demás.

### 6.2.2. Horizonte de planeación

El horizonte de planeación constituye la amplitud de visión del proyecto en el tiempo, siendo sensibles los resultados del análisis económico a la selección de este parámetro. Un horizonte demasiado amplio trae consigo pérdida de confianza de los pronósticos del flujo de efectivo y un horizonte de planeación corto corre el peligro de no registrar quizás los movimientos del flujo de efectivo más importante de un proyecto.

Al comparar alternativas de inversión es importante hacerlo durante cierto período de tiempo denominado *horizonte de planeación*, en cierto sentido el horizonte de planeación define el ancho de la "ventana" que se usa para ver los flujos de efectivo que produce una alternativa, para hacer una evaluación objetiva se debe usar la misma ventana para ver todas las alternativas. En algunos casos el horizonte de planeación se determina con facilidad, para el caso de proyectos carreteros son horizontes de planeación largos de 10 hasta 30 años o quizá aún más.

### 6.2.3. Elección de la mejor alternativa

El paso final al comparar alternativas de inversión es la elección de la alternativa preferida. En este capítulo el estudio se concentra en el factor económico para determinar la alternativa más económica. La decisión fina se puede basar en una multitud de criterios y no sólo en el criterio de la economía. El proceso de selección se complica no sólo por la presencia de los objetivos múltiples, sino también por los riesgos e incertidumbre asociados con el futuro (Capítulo 7).

Consideraciones a tomar en cuenta en la elección de la mejor alternativa.

1. Las necesidades de capital por parte del proyecto se deben relacionar con necesidades de capitales anteriores y futuros, estimadas para inversiones similares. El rendimiento del flujo de efectivo descontado o valor presente neto del proyecto se debe comparara con el de los otros proyectos. La propuesta debe encajar en los planes a largo plazo del proyecto, se debe hacer una comparación con inversiones similares.
2. Se debe tomar en cuenta que esta propuesta de inversión es solamente una entre varias a revisar y que no todas las propuestas serán aceptadas, además de conocer las ventajas y debilidades de la propuesta de inversión frente a las demás.
3. No exagerar los aspectos técnicos de ingeniería de la propuesta de inversión, ya que muchas ocasiones los encargados de tomar decisiones se interesan principalmente en los aspectos económicos de la propuesta.

La decisión de elegir la mejor alternativa, van a influir distintos factores, principalmente los económicos, aquélla alternativa de que se obtengan mayores beneficios de menores costos será la que más se adecue a nuestras necesidades sobre todo para proyectos del sector carretero, ya que de cierto presupuesto se deben tomar decisiones que influyen directamente con la construcción, y/o mantenimiento para poder brindar servicios funcionales y adecuados a los usuarios de carreteras.

### 6.2.4. Tasa Mínima Atractiva de Rendimiento (TMAR)

La manifestación del dinero en el tiempo se le denomina interés.

Interés = Cantidad total acumulada – inversión original (principal)

Si el interés se expresa como un porcentaje de la cantidad original por unidad de tiempo, se dice que es una tasa de interés. A la unidad de tiempo utilizada se llama período del interés.

El interés simple se calcula considerando sólo al principal.

Interés Simple = principal (número de períodos) tasa de interés

$$F = P n i$$

Interés Compuesto considera el interés sobre el interés

$$F = P (1 + i)^n$$

Así la tasa mínima atractiva de retorno es el porcentaje que se usa para hacer las equivalencias entre dinero de diferentes períodos en un flujo de efectivo, es la tasa de descuento derivada del costo de oportunidad del dinero; el dinero debe invertirse en alguna alternativa sino puede tener rendimiento al menos tan grande como la TMAR, puesto que es razonable pensar que existan otras alternativas que si cumplen con esta condición.

### 6.3. Medidas de efectividad económica

Los parámetros básicos más conocidos, que sirven para medir la rentabilidad de proyectos utilizando el criterio de comparar costos y beneficios, también denominados indicadores o índices de rentabilidad, son:

- Método del Valor Presente
- Método del Valor Futuro
- Método del Valor Futuro Método del período de reembolso
- Método de la Tasa Interna de Retorno
- Método de Requerimiento de Ingreso
- Método de la Razón Costo/Beneficio

Mediante estos índices o parámetros se puede medir la rentabilidad de proyectos aislados, o bien comparar diversas alternativas de inversión entre sí. Todos estos métodos aplican distintos puntos de vista para analizar el comportamiento de rentabilidad de un proyecto, consideran el concepto del valor del dinero en el tiempo, por ello se sustentan en el hecho de que para poder comparar valores (beneficios y costos) que se presentan en distintos tiempos, resulta necesaria una base común de comparación. Esta base común es el valor actualizado de los beneficios y costos en una misma fecha utilizando la tasa de oportunidad (o TMAR) que representa el costo de oportunidad por dejar la que se supone es la segunda mejor opción de inversión.

Es evidente que para un proyecto en que sus costos y beneficios tienen lugar lapsos costos, no sería de gran valía tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

### 6.3.1. Método del Valor Presente (VP)

Los estudios económicos del valor presente determinan, para cada alternativa la cantidad de dinero requerido hasta el presente, para cubrir todos los gastos del mejoramiento propuesto por la duración del período estudiado. Así pues para alternativas de igual vida, el plan con el valor presente más bajo, o establecido diferentemente, que requiera la menor garantía de dinero, es más atractivo siendo entre otras cosas iguales.

Si se aplica el valor presente a los beneficios y los costos, se obtiene el valor presente neto, o valor anual neto VAN. Este método tiene la ventaja que puede aplicarse a proyectos con distintas vidas de servicio, o con etapas ya desarrolladas. Además los costos y beneficios se representan en términos actuales. Este método se aplica entre alternativas distintas. Cada alternativa se compara con otra denominada "base", la que puede ser la alternativa sin proyecto.

Una inversión es rentable cuando el valor actual neto es positivo, a una tasa de interés conveniente para el inversionista. Mide una moneda actual cuando más rico es el inversionista por invertir en el proyecto, en lugar de hacerlo en otra alternativa.

Entre las ventajas se pueden enumerar las siguientes:

- Los beneficios y costos pueden expresarse por un solo número.
- Proyectos de diferentes vidas de servicio y con etapas de desarrollo son directa y fácilmente comparables.
- Los costos y beneficios son expresados en términos presentes.
- El método es computacional mente simple.

Dentro de las desventajas se puede decir:

- El método no se puede aplicar a alternativas únicas, donde no se pueden evaluar beneficios.
- El resultado no es tan fácil de comprender como lo sería una tasa interna de retorno o el costo anual.

Este método puede considerar sólo los costos, los beneficios, y también los costos junto con los beneficios. Este involucra traer al valor presente el costo de futuras erogaciones, mediante una tasa de descuento apropiada.

$$VAN = \sum_{k=0}^{k=n} Bk(1+i)^{-k} - \sum_{k=0}^{k=n} Ck(1+i)^{-k}$$

Donde:

VAN: Valor presente

Bk: Beneficio futuro

Ck: Costo futuro

j: Tasa de descuento

n. Año en que se realiza el gasto o se obtiene el beneficio

Una inversión es rentable cuando el valor actual de los flujos de ingresos es mayor que el valor actual de los flujos de costos.

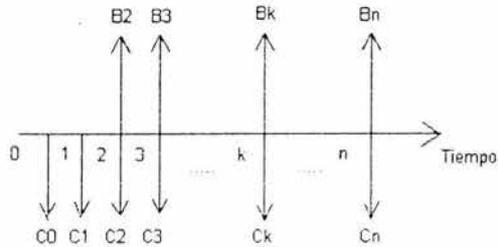


Figura 6.1  
Flujo de de Costos y Beneficios para el valor presente neto

Para el caso particular de comparación de estrategias en infraestructura vial se utiliza una ecuación modificada que corresponde a:

$$VAN = \sum_{y=1}^Y \frac{\Delta BN_{ky(m-n)}}{[1 + 0.01^y i]}$$

donde:

$\Delta BN_{ky(m-n)}$  = Beneficio económico neto de la estrategia m relativa a la estrategia n en el año y para la sección de carretera k.

i = Tasa de descuento.

Y = Período de análisis especificado

### 6.3.2. Método del Valor Anual (VA)

Este método combina el costo de capital inicial y todos los gastos futuros en una sola erogación constante todos los años. Expresado de otra forma, cuánto debe tenerse hoy para que anualmente se tenga un valor constante durante un cierto período de tiempo, a la tasa  $i$ .

$$P = A \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

Donde:

P: Valor presente

A: Costo anual equivalente

$i$ : Tasa de descuento

$n$ : Número de años

Al igual que antes e le puede dar la siguiente interpretación:

$$A = P \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

Es decir, un dinero actual  $P$ , cuando me rinde en sumas anuales iguales,  $A$ , en un determinado, número de años  $n$ :

### 6.3.3. Método del Valor Futuro (VF)

En algunas ocasiones se prefiere estimar el valor futuro en vez del VPN. El valor futuro (VF) se calcula para el flujo de costos y beneficios de la siguiente manera como se muestra en la figura 6.2.

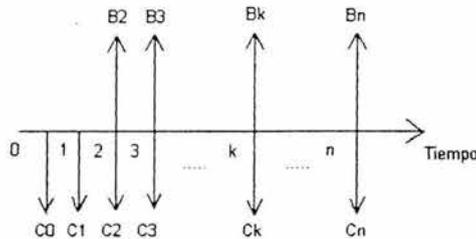


Figura 6.2  
Flujo de de Costos y Beneficios para el  
Método del Valor Futuro

Utilizando

$$VF = \sum_{k=0}^{k=n} B_k (1+i)^{n-k} - \sum_{k=0}^{k=n} C_k (1+i)^{n-k}$$

En la expresión anterior se observa que la rentabilidad del proyecto con el método del valor futuro va a ser la diferencia entre los beneficios y los costos del proyecto para cierto período de tiempo.

#### 6.3.4. Método del Período de Reembolso (Recuperación)

Todos los métodos presentados hasta aquí reflejan la rentabilidad de una alternativa propuesta para un período de estudio  $N$ . El método de reembolso, que con frecuencia se llama método de liquidación simple, indica principalmente la liquidez de un proyecto más que su rentabilidad. Históricamente, el método de reembolso se ha utilizado como una medida de riesgo de proyecto, ya que la liquidez tiene que ver con que tan rápido se puede recuperar la inversión. Un período reducido de reembolso de valor se considera conveniente. El método de reembolso calcula en forma muy sencilla el número de años que se requieren para que los flujos de entrada sean exactamente iguales a los flujos de salida. De aquí que el período de reembolso simple siempre sea el valor más pequeño de  $M$  ( $M < N$ ) para que esta relación se satisfice bajo nuestra convención normal de flujo efectivo de final de año

$$\sum_{k=1}^M (\text{Ingresos}_k - \text{Erogaciones}_k) - \text{Inversión} > 0$$

### 6.3.5. Método de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR), también llamada tasa interna de rendimiento o tasa interna de recuperación, es uno de los parámetros de evaluación más actualizados. La TIR es la tasa de descuento que hace que los beneficios y los costos actualizados a una misma fecha, sean equivalentes. Según lo anterior, para la TIR la relación beneficio/costo vale uno y el valor presente neto vale cero.

$$\text{TIR} \leftrightarrow B = C \quad \text{TIR} \leftrightarrow B/C = 1 \quad \text{ó} \quad \text{VPN} = 0$$

La TIR es la medida de la rentabilidad de un proyecto dada como tasa de descuento. La TIR de algún fondo de inversión es la tasa de rendimiento que proporciona dicho fondo. Si la TIR es mayor que el costo de oportunidad, el proyecto es atractivo; si la TIR es menor que la tasa de oportunidad, o que la TMAR seleccionada, el proyecto no es rentable.

Este método resuelve la tasa de interés que iguala el valor equivalente de una alternativa de flujos de entrada de efectivo, figura 6.3.

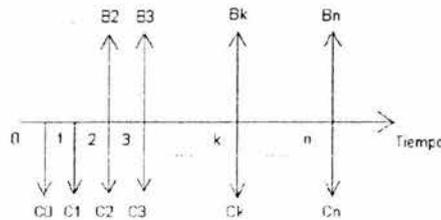


Figura 6.3  
Flujo de de Costos y Beneficios para el método de la  
Tasa Interna de Retorno

El método de la tasa interna de retorno actualiza los costos y los beneficios, por lo que esta variable aparece en ambos miembros de la igualdad de la siguiente manera por el flujo anterior:

$$\sum_{k=1}^{k=n} C_k (1 + \text{TIR})^{-k} = \sum_{k=0}^{k=n} B_k (1 + \text{TIR})^{-k}$$

Para el cálculo de la TIR se requiere proceder por aproximaciones sucesivas, proponiendo una TIR y verificando si cumple o no la igualdad. Cuando el cálculo se realiza a mano, este proceso consume mucho tiempo, por lo que para aproximar su valor se puede buscar únicamente dos valores de tasa (próximos entre sí) una que dé un valor mayor del lado izquierdo de la ecuación y otra que de un valor

mayor del lado derecho, es decir una que de un valor de B/C mayor que uno (o VPN mayor a cero) y otra tasa que reporte un valor de B/C menor que uno (o VPN menor a cero). La otra forma de plantear el problema de encontrar la TIR, con la notación de flujo de efectivo es resolviendo la expresión:

$$\sum_{k=0}^{k=n} FE_k (1+i)^{-k} = 0$$

que también se resuelve por aproximaciones sucesivas, que a su vez es equivalente a la siguiente expresión:

$$VPN = 0 = FE_0 + \frac{FE_1}{(1+TIR)} + \frac{FE_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FE_n}{(1+TIR)^n}$$

que se puede escribir como:

$$VPN(x) = 0 = FE_0 + FE_1 x + FE_2 x^2 + \dots + FE_n x^n$$

donde  $x = 1/(1+TIR)$  y  $VPN(x)$  es un polinomio de grado  $n$  que tiene exactamente  $n$  raíces, entre ellas, las reales pueden ser TIR. El número de raíces positivas (o disminuido de dos en dos) está dado por el número de cambios de signo en  $VPN(x)$  de acuerdo con la regla de los signos de Descartes. En el caso más frecuente, la inversión inicial hace que el primer valor del FE (Flujo Efectivo) o los primeros valores sea negativo, pues en él se realiza la inversión inicial y todos los demás valores son positivos; entonces hay un solo cambio de signo y por tanto hay forzosamente una raíz real sea positiva y un valor único de la TIR que puede ser estimado como ya se indicó.

### 6.3.6. Método de la Razón Costo/Beneficio (C/B)

La Relación beneficio/costo es el cociente que resulta de dividir los beneficios actualizados a una fecha establecida (utilizando la TMAR) entre los costos actualizados esa misma fecha y con la misma tasa de descuento. Esa la medida de la rentabilidad de un proyecto que indica cuando reditúa cada una unidad monetaria invertida en él. Si B/C es mayor que 1, significa que el proyecto es rentable, pues por cada unidad invertida se recupera una cantidad mayor; por el contrario, si B/C es menor a la unidad, quiere decir que el proyecto no es rentable. Si B/C vale uno, el proyecto no proporciona ganancias ni implica pérdidas.

La relación beneficio/costo es invariante en el tiempo, su valor siempre es el mismo, no importando el momento elegido para elegir la actualización.

$$B/C = \frac{\text{Beneficios actualizados}}{\text{Costos actualizados}}$$

Una expresión para el cálculo de B/C es la siguiente:

$$B/C = \frac{\sum_{k=0}^{k=n} B_k (1+i)^{-k}}{\sum_{k=0}^{k=n} C_k (1+i)^{-k}}$$

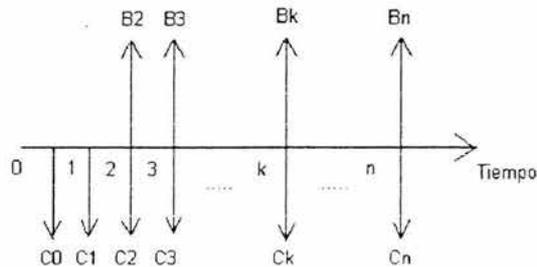


Figura 6.4  
Flujo de de Costos y Beneficios para el método de la  
Razón Costo/Beneficio

#### 6.4. Evaluación económica en presencia de restricción presupuestaria

Como toda organización ejecutora de proyectos, las agencias viales deben enfrentar, además de las dificultades técnicas y de planificación que impone su actividad, la siempre presente escasez de recursos. En tal sentido, los responsables de la actividad deben ser capaces de resolver lo que matemáticamente se define como un problema de programación entera.

Conceptualmente, el problema consiste en maximizar algún indicador que describa el logro del objetivo que persigue la agencia, sujeto a la restricción de presupuesto que enfrente. Esta definición indica que es posible construir tantos ejercicios de optimización, como objetivos puede querer alcanzar la agencia. En términos generales es posible identificar dos grandes objetivos particulares siendo del alcance de la agencia vial. Objetivos públicos u objetivos particulares. Los primeros, habitualmente perseguidos por organismos estatales, están orientados básicamente a maximizar el beneficio social que sus acciones, son capaces de generar; los segundos, buscados por empresas privadas como pueden ser las sociedades concesionarias, intentan maximizar los beneficios económicos propios.

Sin embargo, cualquiera que sea el objetivo perseguido, ambos debe tener en cuenta dos aspectos básicos de evaluación:

- El VAN es un buen indicador de aumento de la riqueza (social o privada), considerando el valor de los beneficios. Este valor está asociado a una tasa de descuento (social o privada).
- Toda evaluación considera un período de análisis que permita comparar entre diferentes proyectos o acciones.

Si consideramos que la agencia vial, sea esta de alcance público o privado, desea definir un programa de conservación óptimo para toda la red, debe identificar aquellas acciones que, dados los costos y beneficios que generan (sociales o privados), maximicen el VANT (Valor actual neto total) social o privado de toda la red. Sin embargo, y como ya se mencionó, las diferentes acciones del programa de conservación generan costos. Tales costos pueden ser sólo privados (básicamente asociados a la provisión de los recursos para la definición y ejecución de las acciones) o sociales (costos sociales de proveer las acciones más costos de usuarios). En ambos casos, existe una cantidad de recursos económicos que de todas formas debe ser provista por la agencia vial para la definición y realización de las acciones, y que por lo tanto deben ajustarse a las restricciones presupuestarias de tal agencia. En definitiva, la identificación de las acciones de conservación por parte de las agencias viales, sujetas a restricciones presupuestarias (primera restricción) y de exclusividad mutua (segunda restricción, que equivale a imponer que cada tramo sólo se le puede asignar una acción de conservación).

**Capítulo**

# **7**

ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## **Análisis y Proyecciones Financieras**

## Capítulo 7. Análisis y Proyecciones Financieras

### 7.1. Estados financieros básicos

Hay algunos textos que no hacen mayor distinción entre la evaluación económica y el análisis financiero de una alternativa de solución, se les considera incluso como sinónimos. Para nuestro caso de estudio en la evaluación de carreteras, estableceremos una diferencia: definiremos una evaluación económica (ya definida en capítulos anteriores) como aquella en que se miden los costos y beneficios de una propuesta, es decir, se evalúan los valores de una alternativa y en ocasiones incluye la interrelación entre el alternativa y el sistema económico en que se desarrolla.

Así pues, el análisis financiero se ocupa de evaluar la alternativa tomando en cuenta el origen y las condiciones en que se obtienen los recursos financieros para materializar una propuesta y la factibilidad de pagar esos recursos con los beneficios que generara el proyecto y otras fuentes de ingresos. Puede ocurrir que un proyecto sea atractivo desde el punto de vista económico, pero no sea factible conseguir los recursos financieros necesarios para ponerlo en práctica, también se da el caso de que un proyecto financieramente atractivo no resulte viable por otros aspectos, como los intangibles (que no cumpla con las normas mínimas para la construcción y/o conservación de carreteras).

La evaluación económica de un proyecto carretero puede considerar dentro de sus costos los correspondientes al financiamiento, pero un análisis estrictamente financiero no puede tomar en cuenta aspectos que se incluyen en algunas evaluaciones económicas, como los beneficios debidos a la mejor distribución del ingreso. Es frecuente sustentar la diferencia entre evaluación económica y análisis financiero, en que la primera es un criterio que se aplica en la toma de decisiones de proyectos del sector público, mientras que el análisis financiero sirve para evaluar proyectos de inversión promovidos por empresas privadas. Realmente tanto la evaluación económica como el análisis financiero tienen aplicación en los dos ámbitos, aunque cada uno de ellos se utilice de distinta manera. El Gobierno, para el manejo presupuestal, funciona como una gran empresa que tiene ingresos y gastos, aunque la forma de decisiones gubernamentales se deben aplicar simultáneamente varios criterios además de los económicos y financieros, como los sociales, ambientales y políticos. De hecho suele considerarse como parte de la evaluación económica de proyectos carreteros del sector público a los aspectos sociales y ambientales. El propósito de la toma de decisiones en el ámbito gubernamental debe ser para mejorar la calidad de vida de la población y lograr la convivencia armónica de la sociedad, en congruencia con el principio de equidad social.

## 7.2. Análisis y fuentes de usos de recursos

Esta sección aborda las fuentes de dinero obtenido para las carreteras, para el financiamiento en la construcción y/o conservación de estas. Se examinarán principalmente los métodos usuales del suministro de dinero para los gastos en las carreteras.

Existen dos métodos generales para el financiamiento de carreteras, el primero de estos es el conocido como *pago según avance* en el cual el pago de todas las mejoras realizadas en carreteras y los costos de mantenimiento y operación se efectúan de los fondos públicos disponibles. El segundo método es el financiamiento mediante préstamos para pagar el costo de mejoras que se hagan a la carretera, cargando el reembolso de la suma inicial y el interés a los ingresos futuros durante un determinado tiempo.

Si examinamos los diferentes impuestos que se aplican a las carreteras, se consideran en muchos casos, como fuentes de fondos públicos, aún cuando pueden utilizarse también para el servicio de deuda, los fondos pueden tomarse como garantía de pagos futuros. Los fondos necesarios para el mejoramiento del sistema de carreteras se obtienen de una variedad de fuentes, las principales son:

- Impuestos a los usuarios de carreteras
- Impuestos a la propiedad
- Cuotas

Los *impuestos a los usuarios de carreteras* constituyen la fuente principal de fondos para carreteras tanto a nivel estatal como federal, los impuestos a los usuarios de carreteras son en general de tres tipos: a) Impuestos a los combustibles, b) Impuestos y derechos de registro, c) Impuestos especiales a los vehículos comerciales. Los *impuestos a la propiedad* son las contribuciones sobre bienes y raíces adyacentes a una carretera en la que se han hecho mejoras. Las *cuotas* son para recuperar los costos realizados en la construcción y/o conservación de carreteras y por un mejor servicio, las cobran organismos oficiales. Los ingresos públicos en general, considerados como la mayor fuente de dinero para financiar los gastos de las carreteras, son los fondos provenientes de los demás impuestos.

## 7.3. Fuentes de financiamiento de inversiones

En algunas ocasiones es necesario o aconsejable para las dependencias oficiales obtener fondos para el desarrollo de carreteras utilizando un crédito financiero. En estos casos el gobierno tiene que hacer uso de su crédito para conseguir un préstamo, reembolsable con intereses normalmente a lo largo de varios años. Una mejora muy necesaria puede financiarse de esta manera. La mayor parte del financiamiento a crédito de las carreteras se realiza por medio de la emisión de bonos.

Un tipo de bono que puede utilizarse para financiar el desarrollo de las carreteras, es el bono de obligación general. Este tipo de bonos se respalda en la confianza y el crédito del organismo emisor. En años recientes, los bonos de obligación general han ido perdiendo aceptación que tuvieron al principio y la tendencia actual es hacia el empleo de los llamados bonos de obligación limitada. Por lo regular estos bonos están asegurados por las rentas públicas que se espera obtener de alguna fuente particular de ingresos. Los bonos de obligación limitada son también llamados algunas veces bonos de rentas públicas. La mecánica de emisión de bonos y su reembolso posterior puede describirse como sigue. La dependencia gubernamental interesada decide el monto total de la inversión, después se aprueba por referéndum o por medio de una acción legislativa, una vez cumplido lo anterior, los bonos se emiten y salen a la venta, es frecuente que se ofrezcan con un interés atractivo, tanto a los bancos como compañías de inversiones u organizaciones similares. Se dice que los bonos han sido liquidados cuando se reembolsan. La principal desventaja del financiamiento con bonos es el costo añadido por el pago de intereses. Este inconveniente se contrarresta frecuentemente, si se toma en cuenta los beneficios resultantes de las mejoras y la reducción en el costo del transporte por carreteras.

#### 7.4. Análisis de Sensibilidad, Riesgo e Incertidumbre

En la evaluación de alternativas realizamos un pronóstico del comportamiento esperado de nuestro proyecto; intentamos prever que ventajas y desventajas implica su futura ejecución, es decir realizamos una evaluación *ex-ante* de un prospecto con objeto de proporcionar elementos de juicio para orientar la decisión sobre la conveniencia de llevarlo a cabo.

La evaluación *ex-post* de un proyecto se ocupa de estudiar su comportamiento durante la fase de operación o su revisión final de su vida útil, es decir, se ocupa de escribir su historia; es fuente de información para evaluar prospectos futuros de la misma naturaleza y es útil para auditar la forma en que se administró el proyecto.

En la mayoría de los casos, la evaluación de proyectos carreteros que requerimos efectuar es el tipo *ex-ante* y como no contamos con una bola de cristal para ver el futuro, nuestras estimaciones tienen un cierto margen de error. Para la evaluación de proyectos, tomando en cuenta que no tenemos certeza de que nuestros pronósticos se cumplirán con precisión, se han desarrollado técnicas de análisis que se conocen con el nombre genérico de análisis en condiciones de riesgo e incertidumbre.

La escasez de conocimientos preciso con respecto a las futuras condiciones del estado económico del país, ocasiona que exista riesgo e incertidumbre en las actividades de la toma de decisiones. Las decisiones bajo riesgo son decisiones en las que el analista modela el problema de decisión en términos de los supuestos resultados futuros posibles, o escenarios, cuyas probabilidades de ocurrencia se pueden estimar. Una decisión bajo incertidumbre, por el contrario, es aquella donde

el principal problema es que hay varios futuros desconocidos cuyas probabilidades de ocurrencia no pueden estimarse.

De hecho la diferencia entre riesgo e incertidumbre es algo arbitraria. Una escuela contemporánea de pensamiento propone que los resultados futuros probables y representativos y sus probabilidades siempre se pueden producir de manera subjetiva. Por lo tanto no es absurdo sugerir que la toma de decisiones bajo riesgo es el marco más plausible y conveniente para tratar con el poco conocimiento sobre el futuro. Aunque podemos distinguir técnicamente entre riesgo e incertidumbre, ambos pueden ocasionar que el estudio arroje resultados diferentes de las predicciones, y rara vez se consigue algo significativo al intentar tratarlos por separado. Por tanto en adelante los términos riesgo e incertidumbre se usarán indistintamente.

Cuando se trata de la incertidumbre, a menudo es útil determinar en qué medida los cambios de una estimación afectarían una decisión de inversión de capital, es decir, que tan sensible es una determinada inversión a cambios en los factores (parámetros) particulares no conocidos plenamente. Si parámetros como vida del proyecto o ingreso anual pueden modificarse ampliamente sin afectar demasiado la decisión bajo consideración no es sensible a ese factor particular. Por el contrario, si un cambio pequeño en la magnitud relativa de un particular. Por el contrario, si un cambio pequeño en la magnitud relativa de un parámetro modifica un decisión de inversión, se concluye que la decisión es altamente sensible al parámetro.

#### 7.4.1. Sensibilidad de Alternativas

Tal vez la forma más objetiva de visualizar la variabilidad y la sensibilidad de las bondades y puntos débiles de un proyecto, para el que no se puede estimar cuantitativamente los riesgos es efectuar lo que se conoce como *análisis de sensibilidad*.

El *análisis de sensibilidad* como su nombre lo indica, consiste en estudiar que tan sensibles son las medidas de efectividad económica de la evaluación (B/C, VP, TIR) ante cambios en las variables del proyecto (beneficios, costos, vida útil del proyecto). Se identifican cuales son las variables para las que las medidas de efectividad sean más sensibles y se determinen los límites en los que los costos sean mayores a los beneficios.

El análisis de sensibilidad se efectúa eligiendo un intervalo de variación de las variables del proyecto, por ejemplo de la gráfica 7.2 del 70% al 139% de los valores originalmente estimados, se calcula para distintos valores de cada variable en el intervalo elegido, por ejemplo cada 5% o 10% el valor del parámetro en el que se desea verificar la sensibilidad del proyecto, por decir la relación B/C.

Es útil determinar que tan sensible es la situación a los diversos factores de interés de modo que se les pueda asignar el peso y la consideración apropiados, en general, el término sensibilidad se refiere a la magnitud relativa de cambio en la medida del valor (como el VP) ocasionada por uno o más cambios en los valores estimados en el factor de estudio. Algunas veces cuando se habla se la sensibilidad se hace referencia específicamente a la magnitud relativa del cambio en uno o más factores que puede invertir el proceso de elección de alternativas.

Podemos concluir que el análisis de sensibilidad es una técnica básica no probabilística, muy accesible, para proporcionar información sobre el impacto potencial de la incertidumbre en estimaciones del factor seleccionado. Su uso rutinario es fundamental para lograr resultados sólidos útiles en el proceso de decisión.

Contemplando el grado de incertidumbre que existe en las condiciones económicas de México, tanto interna como externamente, se ha considerado conveniente examinar los resultados de la evaluación económica a la luz de las variaciones a la tasa de actualización base

#### 7.4.2. Reconocimiento de Riesgo

El grado de conocimiento que se posee de nuestro proyecto carretero va creciendo a medida que avanza a través del estudio técnico, rehabilitación y/o conservación y operación. Un proyecto se conoce plenamente cuando su vida útil ha concluido. Cuando podemos escribir su historia estamos en condiciones de asegurar cuales fueron y cuanto representaron los costos incurridos, cuales fueron y cuanto importaron los beneficios generados, el grado de conocimientos de un proyecto se comporta como si indica en la figura 7.1.

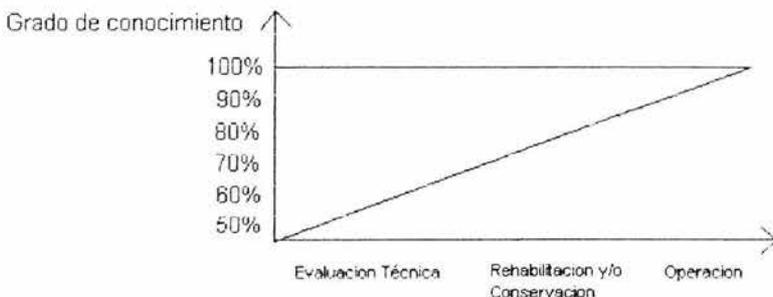


Figura 7.2.  
Grado de conocimiento de un proyecto carretero

Como el grado de conocimiento es menor en las etapas iniciales de un proyecto, el margen de error en el cálculo de los costos y beneficios es mayor, como se ilustra en la figura 7.2.

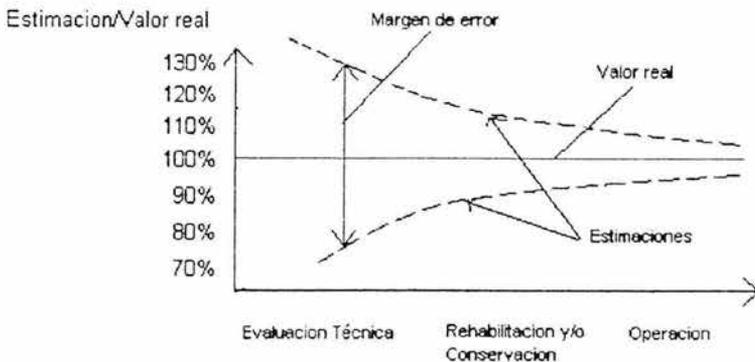


Figura 7.2.  
Margen de error de acuerdo al grado de conocimiento  
de un proyecto carretero

Así cuando nos encontramos en la etapa de nuestra evaluación técnica, es la fase en la que recopilamos información para conocer más nuestro proyecto a evaluar, y es ahí cuando el intervalo de la incertidumbre de las estimaciones es más amplio. De acuerdo con esto el cálculo de las medidas de evaluación, como la relación de Beneficio/Costo, el Valor Presente y la Tasa interna de Rendimiento. Tienen un cierto margen de error. En términos generales, las evaluaciones de los proyectos se efectúan con una de las siguientes hipótesis: a) Hay certeza en el comportamiento de las variables que se aprovechan para al cálculo de los parámetros de evaluación, es decir, se trata de un problema determinístico que tiene solución única.; b) Se conoce el comportamiento probabilística de las variable utilizadas en el cálculo de los parámetros de evaluación; c) Hay incertidumbre cuando al comportamiento de las variables que inciden en las medidas de efectividad económica y no poseen elementos para calcular sus probabilidades de ocurrencia.

El *análisis en condiciones de certeza* es una utopía, pues no hay proyecto para el que pueda proveerse con certeza el comportamiento futuro de todas las variables que intervienen en el proceso. Todo proyecto, esta sujeto a la influencia del comportamiento de variables exógenas. Los fenómenos naturales, las políticas macroeconómicas, son algunos de los factores que pueden afectar al estudio de nuestro proyecto y estos están fuera del control de este y por ende son elementos que restan certidumbre a la evaluación de un proyecto carretero.

El tipo de análisis que necesitamos es el de conocer las probabilidades de ocurrencia de los valores de las variables presentes en la evaluación. Esto es factible cuando se trabaja con un proyecto similar a otros proyectos para los cuales se cuenta con estadísticas de su comportamiento histórico. En general es poco frecuente encontrarse frente a esta situación, pues se requiere de haber realizado

varios proyectos similares, este análisis recibe el nombre de *análisis en condiciones de riesgo*.

#### 7.4.3. Decisiones bajo Incertidumbre

Consiste en evaluar un proyecto sin conocer cuál es la probabilidad de ocurrencia de las variables que intervienen en la evaluación. Es útil considerar los factores que afecten la incertidumbre involucrada en una inversión de capital, de modo que se pueden relacionar con la medición económica del valor que se debe cumplir o superar a fin de que se justifique una inversión. Sería casi imposible listar y analizar todos estos factores.

La primera fuente, siempre presente, es la posible inexactitud de las estimaciones utilizadas en el estudio. Si se dispone de información exacta con respecto a las partidas de ingresos y gastos, el resultado debe ser bastante preciso. Si por otro lado, se cuenta con poca información objetiva y casi todos los factores se tienen que estimar, la precisión del resultado puede ser alta o baja, lo que dependerá de la forma en la que se obtienen los valores estimados.

Con frecuencia es difícil determinar la precisión de los flujos entrantes de efectivo estimados. Si se basó en una considerable cantidad de experiencia pasada o se han determinado mediante adecuadas encuestas de mercado, se les puede reconocer un razonable grado de confiabilidad. Pero si sólo son resultado de una conjetura, con un considerable elemento de esperanza añadido, desde luego se puede estimar que contienen una parte considerable de incertidumbre.

Un ahorro en los gastos de operación existentes generaría menos incertidumbre, normalmente es más fácil determinar que el ahorro será debido a que existe una experiencia considerable en el cual basar las estimaciones. De forma similar, no debe haber grandes errores en las estimaciones de capital a menudo se refleja como contingencia en el costo real.

La segunda fuente principal que afecta la incertidumbre es el tipo de negocio que tiene que ver con la salud futura de la economía: algunos negocios son notoriamente menos estables que otros. Cada vez que se invierte capital en una empresa, se deben considerar la naturaleza e historia del negocio así como las perspectivas de las condiciones económicas futuras (por ejemplo, tasas de interés) al decidir qué riesgo está presente.

Una tercera fuente que afecta la incertidumbre es el tipo de planta y equipo involucrados. Algunos tipo de estructuras tienen vidas económicas y valores de mercado bastante definidos. Se conoce poco de las vidas físicas o económicas de otras y casi no tienen un valor de reventa.

La cuarta fuente de incertidumbre, muy importante, que siempre se debe considerar al evaluar es la longitud del período del estudio supuesto. A lo largo del período de estudio deben existir las condiciones que se suponen con respecto al ingreso y gasto a fin de obtener un rendimiento satisfactorio sobre la inversión de capital. Un período largo de estudio naturalmente disminuye la probabilidad de que todos los factores sean como estimaciones. Por tanto, un período largo de estudio, si todo se mantiene igual siempre aumenta la incertidumbre de una inversión de capital.

**Capítulo**

# **8**

ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

## Ejemplo de Aplicación

## Capítulo 8. Ejemplo de Aplicación

*En nuestro ejemplo de aplicación, vamos a hacer la evaluación tanto técnica como económica de un tramo carretero de la red de carreteras mexicanas del sector público. El caso presentado y desarrollado se realizó con datos reales y precios actualizados al 2003.*

### Planteamiento

Se necesita realizar una evaluación a un tramo de una carretera de dos carriles que presenta distintos grados de deterioro, y que brinda un bajo nivel de servicio. El tramo en estudio tiene una longitud de 26 Km., se encuentra en terreno plano y tiene carpeta asfáltica

### Evaluación Técnica

#### Recursos humanos requeridos para la evaluación

Para poder hacer una evaluación técnica, se necesita el siguiente equipo de personas para tomar distintos datos de campo y después generar distintas alternativas para su rehabilitación (programa de mantenimiento y/o reconstrucción).

- a) 1 Coordinador: que fungirá como responsable y coordinará todas las acciones necesarias para llevar a cabo los estudios de mantenimiento de carreteras, desde la obtención de datos de campo y gabinete hasta la obtención de alternativas de reconstrucción y/o conservación.
- b) Ingenieros Administradores que Formularan políticas y alternativas de mantenimiento, Sistemas de administración de la conservación, Análisis económico, Financiamiento y administración de carreteras, Evaluación de prioridades, Revisión del funcionamiento
- c) 1 Responsable de Mediciones de Campo: Coordinará todas las acciones requeridas para obtener los datos de campo y acompañara al resto del grupo a lo largo de las evaluaciones, para medir Índices de servicio, Deflexiones, Inventario de deterioros y Características Geotécnicas
- d) Ingenieros y técnicos responsables de datos generales, evaluación de condiciones, procedimientos y materiales para el mantenimiento, control de costos, capacitación de personal, que estén abocados a la obtención de datos de gabinete que se requieren para completar parámetros básicos, como clasificación del tránsito por ejes, pesos promedio, tasas de crecimiento, volúmenes TDPA, accidentes, características geométricas e historial de reparaciones de los pavimentos por estudiar.
- e) 3 Técnicos Evaluadores: Para obtener datos del formato ISA, se requiere de tres técnicos que acompañen al responsable de las mediciones de campo, para entre los cuatro, formar el panel o grupo que asigne las calificaciones de Índices de Servicio Actual de los tramos por estudiar. Además puedan calcular el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), con la viga móvil de tres metros o bien con otro equipo como el perfilógrafo, esto para tener otra referencia en cuanto al nivel de Servicio que brinda la carretera a los usuarios.

- f) 1 Chofer para ISA: Personal que conducirá el vehículo que se utilice para mediciones de Índices de Servicio, a velocidad de operación del tramo y auxiliando al panel evaluador para indicar cotas y kilometrajes de inicio-terminación de cada tramo de 5 kilómetros.
- g) 2 personas para el Inventario de deterioros existentes: Para la Evaluación o inventario de deterioros existentes en los tramos de carretera por estudiar, se requerirá de dos personas como mínimo con experiencia, pudiendo obtener los datos necesarios el ingeniero responsable de mediciones de campo acompañado de uno o dos de los técnicos evaluadores.
- h) 6 personas para medición de deflexiones: Para la medición de deflexiones en el campo se requiere de un responsable de mediciones, un técnico para la Viga Benkelman, un ayudante de Viga Benkelman, dos bandereros antes y después del tren de medición, un chofer del camión de volteo lastrado.

### Datos Generales del Tránsito

La densidad del tránsito en la carretera tiene un T.D.P.A. de 4000 veh./día. Este volumen lo componen 1100 camiones comerciales (Autobús Foráneo, C2, C3) 500 camiones de tipo pesado (T3-S2, T3-S3, T3-S2-R4), y el resto de automóviles.

En base en la información del tránsito diario promedio anual tenemos:

Tipo de Vehículo	Dirección	TDPA
Camión Articulado (T3-S3)	Total ambas direcciones	180
Camión Articulado (T3-S2)	Total ambas direcciones	300
Camión Articulado (T3-S2-R4)	Total ambas direcciones	20
Camión de 3 ejes (C3)	Total ambas direcciones	280
Camión de 2 ejes (C2)	Total ambas direcciones	420
Autobús Foráneo	Total ambas direcciones	400
Vehículo Liger o Utilitario	Total ambas direcciones	2400

Tabla 8.1. Tipo y cantidad de vehículos que transitan por la carretera en estudio

La tasa de crecimiento anual de tránsito es del 5%, además del registro consultado el porcentaje promedio de accidentes de tránsito en el tramo de estudio son debidos al estado superficial del pavimento. La temperatura promedio anual del lugar es de 25°, la precipitación del lugar es de 1100 mm/año y la calidad del drenaje es regular, el número de años para el cual se pretende extender la vida útil del pavimento en estudio es de 20 años.

Se espera que para el año 12 se tenga la capacidad máxima de la vía, la proyección del tránsito que se espera es la siguiente:

Año	Vehículos	Autobús	C2	C3	T3-S2-R4	T3-S2	T3-S3	TDPA
0	2400	400	420	280	20	300	180	4000
1	2520	420	441	294	21	315	189	4200
2	2646	441	464	309	23	331	199	4413
3	2779	464	488	325	25	348	209	4638
4	2918	488	513	342	27	366	220	4874
5	3064	513	539	360	29	385	231	5121
6	3218	539	566	378	31	405	243	5380
7	3379	566	595	397	33	426	256	5652
8	3546	595	625	417	35	448	268	5934
9	3724	625	657	438	37	471	282	6234
10	3911	657	690	460	39	495	297	6549
11	4107	690	725	483	41	520	312	6878
12	4314	725	762	508	44	546	328	7227
13	4314	725	762	508	44	546	328	7227
14	4314	725	762	508	44	546	328	7227
15	4314	725	762	508	44	546	328	7227
16	4314	725	762	508	44	546	328	7227
17	4314	725	762	508	44	546	328	7227
18	4314	725	762	508	44	546	328	7227
19	4314	725	762	508	44	546	328	7227
20	4314	725	762	508	44	546	328	7227

Tabla 8.2. Proyección del Tránsito

### Calculo del Índice de Servicio Actual

La Información indispensable para obtener el ISA (Índice o nivel de servicio actual) de diseño de la carretera en estudio. Es referente al confort del usuario y su seguridad al transitarla. Así mismo, es un indicador palpable de las condiciones superficiales y estructurales del pavimento.

Para hacer la evaluación se requieren cuatro evaluadores con experiencia, a bordo de un vehículo con buena suspensión, alineación de ruedas y dirección estable, se deberán hacer recorridos continuos a la velocidad de operación promedio en el tramo y registrar su evaluación cada 4 Km. Es importante hacer notar que las calificaciones promedio servirán para decidir el tipo y la intervención urgente de los tramos. Esto es, segmentos de Km. de longitud que obtenga una calificación promedio de 2.0, manifiestan a este punto una situación o condición crítica al estar en el límite permisible.

Se considera exclusivamente la condición "actual o presente" del pavimento por calificar, la evaluación deberá basarse en el hecho que el pavimento soportará grandes volúmenes de tránsito mixto, en toda clase de climas, no se tomarán en cuenta cruces de Ferrocarriles, bordes en puentes, alcantarillas hundidas o salientes así como las características geométricas, al recorrer nuevos tramos no se pueden comparar con anteriores ya calificados, cada sección deberá juzgarse en forma individual e independiente.

Los datos obtenidos son los siguientes:

INDICE DE SERVICIO ACTUAL (ISA)					
KILOMETRAJE	VALUADOR 1	VALUADOR 2	VALUADOR 3	VALUADOR 4	CALIFICACION
0+000 A 4+000	2.5	2.8	3.0	2.5	0 = Intransitable
4+000 A 8+000	2.7	2.8	3.0	2.6	1 a 2 = Malo
8+000 A 12+000	3.0	3.0	2.9	2.8	2 a 3 = Regular
12+000 A 16+000	2.5	2.6	2.8	2.6	3 a 4 = Bueno
16+000 A 20+000	2.3	2.5	2.4	2.5	4 a 5 = Excelente
20+000 A 26+000	1.8	1.9	2.0	2.0	
VEL. DE OPERACIÓN: <u>60</u> km/Hr			NO. DE VALUADORES: <u>4</u>		

Tabla 8.3. Valores obtenidos para calcular el Índice de Servicio Actual

Con lo anterior podemos calcular en Índice de Servicio Actual de la carretera que es de ISA = 2.56, de acuerdo con la clasificación de la SCT es una carretera regular o mala, para tener otro índice que nos indique el nivel de servicio que brinda la carretera, vamos a calcular el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

#### Calculo del Índice de Rugosidad Internacional

Debido a la inquietud de obtener un método alternativo para el cálculo del nivel de servicio, el Índice Internacional de Rugosidad se realiza por medio del levantamiento topográfico con nivel y estado, utilizando el equipo denominado viga móvil de tres metros. La viga de tres metros es un equipo del tipo móvil que se desplaza a la velocidad del operador (aproximada 2 Km. /HR) sobre la rodada del camino, el equipo registra sobre un papel graficador la diferencia de alturas entre el punto medio de una línea horizontal formada por la rueda delantera y la rueda trasera, con la altura de la parte central del camino, determinado por una rueda móvil. Esta diferencia de alturas se denomina valor de viga de tres metros.

Para el cálculo del valor promedio (V Prom.) de la viga de tres metros existen dos métodos, el primero denominado indirecto y consiste en la aplicación del algoritmo de este equipo sobre perfiles topográficos de diferentes tramos. Esto permite obtener la correlación entre V Prom. Con el valor del IRI para diversos tramos, con esta correlación se puede calcular el IRI a partir de un levantamiento topográfico.

El segundo método directo que consiste en hacer pasar la viga de tres metros sobre el perfil del camino y obtener el Valor Promedio (V Prom.), mediante el registro gráfico del equipo. Este puede ser un método alternativo para la obtención del IRI para tramos de prueba sin realizar el levantamiento del perfil, aplicando la fórmula de correlación entre V Prom. Y el IRI.

Obteniendo el IRI con el algoritmo de la viga de tres metros aplicado a perfiles topográficos:

La tabla 6.4 representa la aplicación del algoritmo de la viga de tres metros en los datos de levantamiento topográfico de un perfil con elevación a cada 25 cm.

Cálculo de V prom. Para levantamientos @ 25 cm				
Número de Puntos	Distancia X (m)	Cota (mm)	V (mm)	ABS(V) (mm)
A	B	C	D	E
1	0.00	10871		
2	0.25	10868		
3	0.50	10863		
4	0.75	10859		
5	1.00	10855		
6	1.25	10850		
7	1.50	10846	-5.00	5.00
8	1.75	10842	-5.00	5.00
9	2.00	10837	-4.50	4.50
10	2.25	10829	-3.00	3.00
11	2.50	10824	-4.00	4.00
12	2.75	10820	-4.50	4.50
13	3.00	10811	-3.50	3.50
14	3.25	10806	0.00	0.00
15	3.50	10802	-3.00	3.00
16	3.75	10793	-1.50	1.50
17	4.00	10787	0.00	0.00
18	4.25	10781	4.50	-4.50
19	4.50	10773	4.50	-4.50
20	4.75	10770	3.50	-3.50
21	5.00	10763	5.00	-5.00
22	5.25	10756	4.00	-4.00
23	5.50	10750	4.50	-4.50
24	5.75	10747	-2.00	2.00
25	6.00	10743	-4.00	4.00
26	6.25	10739	-4.50	4.50
27	6.50	10734	-4.00	4.00
28	6.75	10737	-4.00	4.00
29	7.00	10722	-4.00	4.00
30	7.25	10711	3.50	-3.50
31	7.50	10707	3.50	-3.50
32	7.75	10705	2.00	-2.00
33	8.00	10699	4.00	-4.00
34	8.25	10692	3.50	-3.50
35	8.50	10688	<b>SUMA</b>	<b>98.50</b>
36	8.75	10682		
37	9.00	10678		
38	9.25	10671		
39	9.50	10670		
40	9.75	10662		

Tabla.8.4.  
Cálculo del Valor promedio de la viga de tres metros  
mediante levantamiento topográfico

Para  $dx = 0.25$  m

$V$  promedio = suma/(número de puntos - 12)

$V$  promedio =  $98.5/(40-12) = 3.52$  mm

Correlación de  $V$  promedio y el IRI

Se realizó el cálculo del valor promedio de la viga de tres metros ( $V$  promedio), con el algoritmo de este equipo e los datos de 36 levantamientos topográficos realizados a cada 25 cm, con estos mismos datos topográficos La figura representa la relación entre el valor promedio de la viga de 3 metros y el valor del IRI calculados para los tramos de prueba. La gráfica obtenida es de tipo lineal cuya fórmula es:

$$IRI = 1.71 (V \text{ promedio}) + 0.17$$

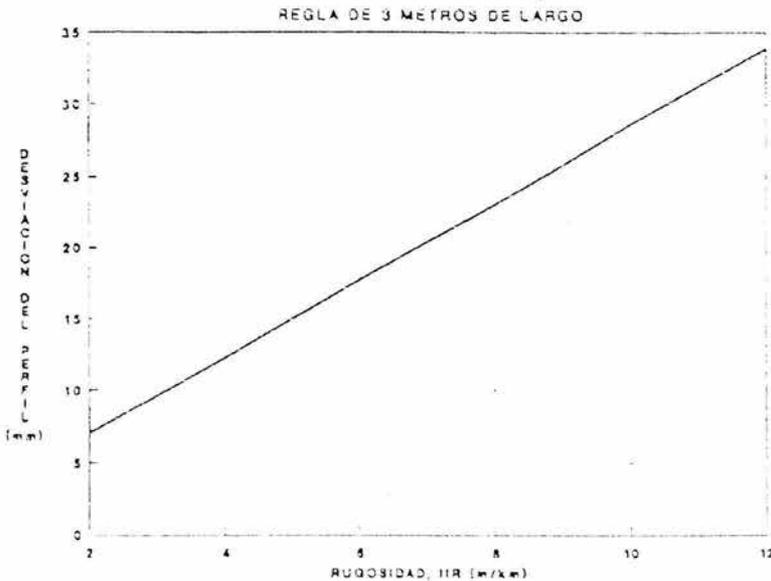


Figura 8.1.

Relación entre el IRI y el valor promedio de la viga de tres metros

De esta manera:

$$\text{IRI} = 1.71 (\text{V promedio}) + 0.17$$

$$\text{IRI} = 1.71 (3.52) + 0.17$$

$$\text{IRI} = 6.18 (\text{m/Km.})$$

Con lo anterior, tenemos un IRI de 6.18 m/Km., que con la escala manejada por la SCT se trata de un pavimento dañado en algunos sectores.

### Capacidad Estructural en función de las deflexiones

Deflexión es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga y es función no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. La medición de ella, generalmente se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

La Capacidad estructural se medirá en función de la Deflexión que será medida en Campo con equipo de Viga Benkelman, Dynaflect o similar y servirá para que el sistema procese tramos que obtuvieron un calificación de Índice de Servicio

igual o menor que 2.5. El tramo de estudio de deflexiones se selecciona entre los 5 Km., evaluados con Índice de servicio, eligiendo la zona más crítica de 500 metros.

Se registraron 25 lecturas de deflexiones a cada 20 metros, completando los 500 metros de estudio. Los valores de deflexiones se registran en unidades enteras, y la temperatura promedio de la carpeta asfáltica fue de 37°C, en el momento en que fueron obtenidas las mediciones de la deflexión, como se muestra en la Tabla 8.6, también se obtuvo el CBR de las diferentes capas que forman la estructura del pavimento (uno por cada 500 metros de longitud de estudio), los datos de CBR de la base, subbase, subrasante, terraplén y el terreno natural.

El equipo que se uso fue el siguiente::

Viga Benkelman Estándar, Camión de volteo lastrado a 8.2 toneladas en el eje trasero, Llantas 10X20X12, presión de inflado 80 pis., termómetro (con lecturas superior, media y baja de carpeta asfáltica), taladro.

CAPACIDAD ESTRUCTURAL						
LECTURAS DE DEFLEXIÓN (@ 20 M ) EN MM				NO. DE LECTURAS DE DEFLEXIÓN: 25		
D01: 0.8128	D02: 0.9652	D03: 0.9144	D04: 0.5588	D05: 0.9398	D06: 0.7620	D07: 1.2192
D08: 0.3048	D09: 0.6350	D10: 1.0668	D11: 0.8636	D12: 0.9389	D13: 0.6604	D14: 0.7620
D15: 0.5842	D16: 0.8382	D17: 0.7874	D18: 1.1684	D19: 0.4064	D20: 1.2192	D21: 0.9144
D22: 0.5588	D23: 0.8890	D24: 0.9398	D25: 10.922			
CBR TERR.NAT: 30 %			CBR SUBBASE: 40 %			
CBR BASE: 80%			TEMP. CARP.ASF: 37 °C			
CBR TERRAPLEN: 40 %						

Tabla 8.5.  
Capacidad Estructural, con el cálculo de las deflexiones

La información de las deflexiones, como los resultados producto del análisis, tienen una gran variedad de aplicaciones en los distintos niveles en la evaluación de pavimentos. Siendo muy importantes para definir la condición del pavimento a lo largo del proyecto, a fin de determinar áreas que requieran tratamientos u otras opciones de rehabilitación.

*Caracterización de los materiales de las capas:* La caracterización de las capas según sus parámetros de resistencia estructural que se obtuvieron fueron las siguientes

CAPA	ESPESOR	CBR
Carpeta	5 cm.	-
Base Granular	15 cm.	80
Subbase Granular	20 cm.	40
Subrasante	30 cm.	20
Terracería	-	40

Tabla 8.6. Sección del tramo carretero en estudio

*Evaluación estructural:* La evaluación estructural, permite realizar diversos estudios sobre la capacidad de los pavimentos, entre ellos se encuentran: La Capacidad estructural, la vida remanente y el diseño de reencarpetados.

Con el método de Tramos testigos se pudo realizar un análisis más detallado de las distintas capas del pavimento se necesita conocer algunas propiedades tales como: el espesor de las capas, los módulos elásticos de cada capa, las propiedades de fatiga tanto para la carga como para la temperatura, la deformación permanente en cada capa y las propiedades del suelo de fundación.

Es importante destacar que los *resultados que se incluyen en su mayoría no son directos de la revisión estructural*, sino que se obtienen de la información registrada por ella.

#### La evaluación estructural aplicando el Método AASTHO

Consiste fundamentalmente en la estimación de la capacidad requerida para soportar el tráfico futuro, evaluando la capacidad de soporte actual, para así determinar la deficiencia en ella para soportar cargas futuras, a través de la siguiente fórmula:

$$SN_{ol} = adD_{ol} = SN_f - SN_{eff}$$

$SN_{ol}$  = Número estructural requerido para el reencarpetado

$ad$  = Coeficiente estructural para el reencarpetado

$D_{ol}$  = Espesor requerido para el reencarpetado

$SN_f$  = Número estructural requerido para soportar el tráfico futuro

$SN_{eff}$  = Número estructural efectivo del pavimento existente

Si conocemos  $a_d = 0.40$   $D_{ol} = 5$  cm., entonces:  
 $SN_{ol} = 0.40 \cdot (5 \text{ cm.}) = 2.00$  cm.

Como se observa en la figura 8.2 el  $SN_{ol}$  es el número estructural requerido para nuestra nueva carpeta que vamos a proponer a partir de nuestra evaluación que para este caso sería una carpeta asfáltica de 7 cm.



Figura 8.2 Número estructural requerido para nuestro tramo carretero en estudio.

CAPA	ESPESOR	CBR
Carpeta	7 cm.	-
Base Granular	25 cm.	60
Subbase Granular	25 cm.	30
Subrasante	30 cm.	20
Terracería	-	-

Tabla 8.7. Sección del tramo carretero y sus posibles espesores de las capas que se pretende llegar

Otra forma de calcular la capacidad estructural del pavimento es por medio del daño por fatiga del tránsito, la Tabla 8.7. Los principales pesos promedio de los diferentes tipos de vehículos que circulan por la red de carreteras nacionales.

**Falta página**

**N° 155**

---

*Vehículos de que transitan por la red de carreteras nacionales provocando muchos daños a las carreteras y nuestro tramo carretero en estudio no es la excepción.*

### ***Inventario de Deterioros***

Se requiere obtener la información indispensable para hacer el inventario a levantamiento de deterioros con su cuantificación estimada. Forzosamente se realizará una inspección visual detallada a pie, a lo largo del tramo bajo estudio, esto lo llevarán a cabo 2 personas con suficiente experiencia en el reconocimiento de fallas o deterioros de pavimento, el recorrido de cada observador deberá cubrir de 1.75 a 2.0 metros de ancho, para así cuantificar adecuadamente el ancho total del carril de estudio. Se registrarán las fallas listadas que se consideran las más comunes y representativas en la carpeta asfáltica como: Roderas, Baches, Grietas Longitudinales, Grietas Transversales, Desprendimientos/Erosión, Asfalto Aflorado, Agrietamiento Piel de Cocodrilo, Hundimiento/Depresiones y Otros.

TIPO DE FALLA	SEVERIDAD	EXTENSIÓN EN KILOMETROS			
		0+000	6+500	13+000	19+500
		A 6+500	A 13+000	A 19+500	A 26+000
Roderos		1	1	2	1
Baches	A-B	1	2	1	2
	C	1	1	1	1
	D-E	2	1	2	1
Grietas Longitudinales	A-B	0	0	0	0
	C	1	0	1	1
	D-E	1	2	1	1
Grietas Transversales	A-B	0	0	1	0
	C	1	0	1	0
	D-E	1	0	1	0
Desprendimientos	A-B	0	0	0	2
	C	1	2	0	2
	D-E	1	0	0	0
Asfalto Aflorado	A-B	1	2	2	2
	C	1	1	1	2
	D-E	1	2	1	2
Grietas Piel de Cocodrilo	A-B	2	3	4	2
	C	2	2	3	4
	D-E	5	4	6	3
Pulido superficial	A-B	0	0	0	1
	C	1	1	1	2
	D-E	2	0	0	2
Depresión y Hundimiento	A-B	1	2	2	2
	C	2	1	1	2
	D-E	3	4	3	2
Drenaje	A-B		0		
	C		3		
	D-E		5		

(A) Despreciable (B) Consideración (C) Media (D) Grave (E) Muy Grave

Tabla 8.9. Valores correspondientes a los distintos niveles de deterioro en los distintos tipos de falla

Se observa que entre las más comunes están la *pérdida de agregados* debidos principalmente al déficit de aditivo o bien a la facturación y/o desintegración de partículas debido a las cargas, el *desgranamiento* debido a la pérdida progresiva del material desde la superficie hasta abajo o a la infiltración de agua por deficiente compactación de la mezcla o su causa puede ser por endurecimiento del asfalto por

envejecimiento, se detecto cierta *ondulación transversal* esto debido a frenadas bruscas de vehículos pesados como el T3-S3, T3-S2 y T3-S2-R4. Se observó *hundimientos* (depresión transversal en la zona de circulación) estos hundimientos se presentan por distintas causas como baja capacidad de las capas estructurales, bermas inestables que no garantizan un adecuado soporte lateral. Lo más común que se observó fueron *agrietamientos* en la zona de circulación, los agrietamientos son causados por cargas excesivas con relación a la estructuración del pavimento, el tipo de agrietamiento que se observó en varios tramos fue el *agrietamiento tipo piel de cocodrilo* (Grietas que forman una red, en forma de bloques de tamaños irregulares cuyas dimensiones son indicativas del nivel en el cual ocurre la falla). Bloques cuyos lados son menores que 15 cm., indican fallas en las bases. Este agrietamiento normalmente va acompañado de deformaciones verticales y ocurre en capas asfálticas de poco espesor.

### Características Geotécnicas

El comportamiento de un pavimento no solo depende de las propiedades del suelo a nivel de la subrasante, también influyen las características de los cortes, terraplén, que pueden llegar a ser aspectos importantes dentro de la operación de la infraestructura.

De acuerdo a las observaciones del comportamiento del terraplén a través de la revisión visual, se propone la siguiente clasificación de las fallas observadas:

- Asentamiento por disminución de huecos del suelo de relleno
- Hundimiento por consolidación del suelo de fundación

Como se observa en la Tabla 8.9. en lo que respecta a las características geotécnicas las que más se presentan son el asentamiento y el hundimiento

### Modelos de deterioro aplicados a nuestra evaluación

La forma de los modelos es incremental, por lo que predicen el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento en el tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las solicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\Delta (\text{deterioro futuro tras el incremento del tiempo}) = f (\text{condición actual, cargas y volumen de tránsito, resistencia del pavimento, clima y mantenimiento aplicado})$$

#### Modelo de inicio de grietas

Para establecer el modelo de inicio de grietas, el estudio toma en cuenta las siguientes características:

*Severidad de grietas, Tipo de grietas y Tipo de pavimento*

$$\text{Concreto asfáltico sobre base granular} \quad \text{TYCR2} = 4.49 * e^{(0.127 * \text{SNC} - 20.5 * \frac{\text{YE2}}{\text{SNC}^2})}$$

$$\text{Tratamiento superficial sobre base granular} \quad \text{TYCR2} = 13.2 * e^{(24.3 * (1 + \text{CQ}) * \frac{\text{YE2}}{\text{SNC}^2})}$$

$$\text{Pavimentos sobre bases tratadas con cemento} \quad \text{TYCR2} = 10.8 * e^{(-1.21 * \text{DEF} - 1.02 * \text{YE} + 4 * \text{DEF})}$$

TYCR2 = Tiempo de iniciación del agrietamiento para las grietas (1 a 3 mm de ancho), en años SNC = Número estructural corregido en pulgadas NE2 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, para el inicio del agrietamiento, basado en un exponente de equivalencia de carga 2, en millones/pista YE2 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, basado en un exponente de equivalencia de carga 2 millones/pista/año. YE4 = Número de ejes equivalentes de 80 KN, basado en un exponente de equivalencia de carga 4, millones/pista/año. DEF = Deflexión mediante viga Benkelman (carga estándar de 80 KN) en ambas ruedas mm. H = Espesor de la carpeta asfáltica, mm. CQ = Indicador de la calidad del pavimento (1= defectuosa, 0= otros casos). (Datos obtenidos de la evaluación estructural)

Además para los sellos y las lechadas asfálticas, se ha estimado un período fijo para el inicio de grietas con los siguientes valores:

Sellos sobre tratamiento superficial TVCR2 = 2.88 años

Sellos sobre concreto asfáltico TVCR2 = 1.20 años

Lechadas sobre tratamiento superficial TVCR2 = 1.38 años

*Agrietamiento piel de cocodrilo*

El origen del agrietamiento se debe, fundamentalmente a las deformaciones horizontales producidas en la base del asfalto siendo un índice del grado de fatiga del pavimento asfáltico. La resistencia a la fatiga se puede calcular según la siguiente fórmula planteada por Finn et al. (1986), donde se define como un 10% del área de agrietado.

$$\log N_f = 15.947 - 3.291 \log \left( \frac{e}{10^{-6}} \right) - 0.854 \log \left( \frac{E}{10^3} \right)$$

Donde:

Nf = número de veces que tiene que pasar un vehículo para que se produzca un agrietamiento del 10%.

e = deformación unitaria horizontal en la base de la superficie del asfalto

E = módulo elástico del asfalto

### Hundimiento

El hundimiento, se debe fundamentalmente a las deformaciones verticales producidas en la superficie de la subrasante. Su resistencia a la fatiga se puede calcular según la siguiente fórmula planteada por la U.S. Army Corp of Engineers [ERES consultans, 1994].

$$N_f = \left( \frac{0.005511}{e} \right)^{6.527}$$

Donde:

Nf = número de aplicaciones para que se produzca un ahuecamiento de 0.205 Pulgadas.

e = deformación unitaria vertical en la superficie de la subrasante.

Con las deflexiones calculadas tenemos lo siguiente para el caso de la subrasante  $d_0 = 0.00045$  in.

$$N_f = (0.005511/0.00185)^{6.527}$$

$$N_f = (2.978)^{6.527}$$

Nf = 1242.2 aplicaciones para que se produzca un ahucamiento de 0.5207 cm. o bien 0.205 in.

### Evaluación Económica

Con los datos de la evaluación técnica obtenidos anteriormente, se llegan a distintas conclusiones entre las más destacadas están tres alternativas. Ya que la carretera presenta distintos grados de deterioro y tiene carencias en el funcionamiento de su superficie.

La **alternativa 1** es reparar y reconstruir la carpeta asfáltica de la carretera a un costo de \$59,662 000.00 pesos. Se requerirá entonces reparar la carpeta asfáltica a un costo de \$22,420000.00 pesos, al final cada periodo de 10 años. El mantenimiento anual para la alternativa 1, costará \$ 89,680.00/Km.

La **alternativa 2**, es trazar una nueva carretera siguiendo el trazo de la anterior sólo que haciendo algunas mejoras cuya longitud se acorte a 22 Km. Su inversión inicial será de \$ 98 648 000 pesos y requerirá un reencarpetamiento superficial cada 10 años a un costo total de \$ 20,178 000 pesos. El mantenimiento anual será de \$89,680.00/Km. La **alternativa 3** también es una nueva carretera que por consideraciones prácticas y de diseño se construirá más corta casi en línea recta con una longitud de 20.5 Km. Sin embargo la inversión inicial será de \$113,933000 pesos debido a la excavación necesaria a lo largo de este trazo. También habrá que rehacer la carpeta asfáltica cada 10 años a un costo \$ 20 178 000 pesos y el mantenimiento anual será \$ 173,755.00/Km. Este incremento con relación a la carretera de la alternativa 2 se debe a los refuerzos adicionales que se requerirán para retener a los terraplenes.

La tarea consiste en elegir una de estas tres alternativas considerando un horizonte de planeación de 20 años con un valor residual despreciable para cada una de ellas al final de dicho período. Una de estas alternativas es la que se requiere porque la carretera actual tiene notables deterioros y no cumple con las Normas mínimas aceptables tanto para el Índice de Servicio o bien para el Índice de Rugosidad Internacional. Se puede calcular entonces la inversión inicial anual equivalente y el costo anual del mantenimiento de cada alternativa usando una TMAR del 6%.

### Costo de Construcción y Reconstrucción de la Carpeta Asfáltica

Alternativa 1.

$$\begin{aligned} CC &= [59662000 + 22420000(P | F 6, 10) + 22420000(P | F 6, 20)] [A | P 6, 30] \\ &= [59662000 + 22420000(1/(1+0.06)^{10}) + 22420000(1/(1+0.06)^{20})] \\ &\quad * [(1+0.06)^{30} * (0.06) / ((1+0.06)^{30} - 1)] \\ &= [59662000 + 22420000(0.5584) + 22420000(0.3118)] (0.0726) \\ &= \$5, 747, 878.78 / \text{año} \end{aligned}$$

Alternativa 2.

$$\begin{aligned} CC &= [98648000 + 20178000(P | F 6, 10) + 20178000(P | F 6, 20)] [A | P 6, 30] \\ &= [98648000 + 20178000(1/(1+0.06)^{10}) + 20178000(1/(1+0.06)^{20})] \\ &\quad * [(1+0.06)^{30} * (0.06) / ((1+0.06)^{30} - 1)] \\ &= [98648000 + 20178000(0.5584) + 20178000(0.3118)] (0.0726) \\ &= \$8, 436, 620.00 / \text{año} \end{aligned}$$

Alternativa 3.

$$\begin{aligned} CC &= [113933000 + 20178000(P | F 6, 10) + 20178000(P | F 6, 20)] [A | P 6, 30] \\ &= [113933000 + 20178000(1/(1+0.06)^{10}) + 20178000(1/(1+0.06)^{20})] \\ &\quad * [(1+0.06)^{30} * (0.06) / ((1+0.06)^{30} - 1)] \end{aligned}$$

$$= [98648000 + 20178000(0.5584) + 20178000(0.3118)](0.0726)$$

$$= \$15,354,311.00 / \text{año}$$

### Costo de Mantenimiento

Alternativa 1.

$$\text{Alternativa 1} = (\$89,680.00 \text{ \$/Km.-año})(26 \text{ Km.})$$

$$= \$2,331,680.00 / \text{año}$$

PROGRAMA DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO Y SUS COSTOS			
ALTERNATIVA 1			
AÑO	MANTENIMIENTO RUTINARIO	RIEGO DE SELLO	SOBRECARPETA
1°	\$ 2,331,680.00		
2°	\$ 2,399,765.05		
3°	\$ 2,469,838.19		
4°	\$ 2,541,957.47		
5°	\$ 2,616,182.62	\$7,770,000.00	
6°	\$ 2,692,575.16		
7°	\$ 2,771,198.35		
8°	\$ 2,852,117.34		
9	\$ 2,935,399.17		
10	\$ 3,021,112.83	\$7,770,000.00	\$ 22,420,000.00
11	\$ 3,109,329.32		
12	\$ 3,200,121.74		
13	\$ 3,293,565.29		
14	\$ 3,389,737.40		
15	\$ 3,488,717.73	\$7,770,000.00	
16	\$ 3,590,588.29		
17	\$ 3,695,433.47		
18	\$ 3,803,340.12		
19	\$ 3,914,397.66		
20	\$ 4,028,698.07	\$7,770,000.00	\$ 22,420,000.00

Tabla 8.10. Programa de conservación y mantenimiento en 20 años para la alternativa 1

Alternativa 2.

$$\text{Alternativa 2} = (\$89,680.00 \text{ \$/Km.-año})(22 \text{ Km.})$$

$$= \$1,972,960.00 / \text{año}$$

PROGRAMA DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO Y SUS COSTOS			
ALTERNATIVA 2			
AÑO	MANTENIMIENTO RUTINARIO	RIEGO DE SELLO	SOBRECARPETA
1°	\$ 2,331,680.00		
2°	\$ 2,399,765.05		
3°	\$ 2,469,838.19		
4°	\$ 2,541,957.47		
5°	\$ 2,616,182.62	\$ 7,770,000.00	
6°	\$ 2,692,575.16		
7°	\$ 2,771,198.35		
8°	\$ 2,852,117.34		
9	\$ 2,935,399.17		
10	\$ 3,021,112.83	\$ 7,770,000.00	\$ 20,178,000.00
11	\$ 3,109,329.32		
12	\$ 3,200,121.74		
13	\$ 3,293,565.29		
14	\$ 3,389,737.40		
15	\$ 3,488,717.73	\$ 7,770,000.00	
16	\$ 3,590,588.29		
17	\$ 3,695,433.47		
18	\$ 3,803,340.12		
19	\$ 3,914,397.66		
20	\$ 4,028,698.07	\$ 7,770,000.00	\$ 20,178,000.00

Tabla 8.11. Programa de conservación y mantenimiento en 20 años para la alternativa 2

Alternativa 3.

Alternativa 3= (\$173,755.00 \$/Km.-año)(20.5 Km.)

= \$ 3, 561,978.00 /año

PROGRAMA DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO Y SUS COSTOS			
ALTERNATIVA 3			
AÑO	MANTENIMIENTO RUTINARIO	RIEGO DE SELLO	SOBRECARPETA
1°	\$ 3,561,978.00		
2°	\$ 3,665,987.75		
3°	\$ 3,773,034.60		
4°	\$ 3,883,207.21		
5°	\$ 3,996,596.86	\$ 7,770,000.00	
6°	\$ 4,113,297.48		
7°	\$ 4,223,405.77		
8°	\$ 4,357,021.22		
9	\$ 4,484,246.24		
10	\$ 4,615,186.23	\$ 7,770,000.00	\$ 201,780,000.00
11	\$ 4,749,949.67		
12	\$ 4,888,648.20		
13	\$ 5,031,396.73		
14	\$ 5,178,313.51		
15	\$ 5,329,520.27	\$ 7,770,000.00	
16	\$ 5,485,142.26		
17	\$ 5,645,308.42		
18	\$ 5,810,151.42		
19	\$ 5,979,807.85		
20	\$ 6,154,418.23	\$ 7,770,000.00	\$ 20,178,000.00

Tabla 8.12. Programa de conservación y mantenimiento en 20 años para la alternativa 3

Es claro que la Alternativa 1 cuesta menos que la Alternativa 2, la cual cuesta menos que la Alternativa 3. Se puede deducir ahora que la *Alternativa 1 debe ser la que se escoja* con base en el costo, pero esto no necesariamente, ya que sólo se analizó un lado del problema, ahora vamos a analizar otros aspectos que influyen directamente en la evaluación de la carretera para elegir la alternativa que más se adecuen a nuestras necesidades

La Alternativa 1 hará posible que los camiones comerciales de tipo C3 y C2 alcancen velocidades medias de 65 KM/HR, mientras que para los camiones de tipo pesado alcancen velocidades medias de 60 KM/HR, mientras los automóviles pueden mantener una velocidad media de 75 KM/HR. Las alternativas 2 y 3 permitirán a los camiones de tipo comercial promediar 70 KM/HR, a los pesados de 65 KM/HR, y a los automóviles promediar una velocidad de 80 KM/HR.

Hay un factor significativo de seguridad que se debe incluir. A lo largo de la actual carretera ha habido un excesivo número de accidentes por año. La Alternativa 1 reducirá el número de vehículos que sufren accidentes a 35 y se espera que las alternativas 2 y 3, sólo tengan 30 a 45 accidentes por año, respectivamente. El costo medio por vehículo por un accidente se estima en \$49,324.00, considerando el daño real a la propiedad física, salarios perdidos a causa de lesiones, gastos médicos y otros costos pertinentes.

Los índices de servicio proyectados son los siguientes.

AÑOS	ALTERNATIVAS		
	1	2	3
0	4.3	4.3	4.3
1	4.22	4.21	4.2
2	4.14	4.13	4.11
3	4.06	4.04	4.02
4	3.98	3.95	3.93
5	3.9	3.86	3.84
6	3.82	3.77	3.74
7	3.74	3.68	3.65
8	3.66	3.59	3.56
9	3.58	3.50	3.47
10	3.5	3.41	3.38
11	3.42	3.32	3.28
12	3.34	3.23	3.19
13	3.26	3.14	3.1
14	3.18	3.05	3.01
15	3.1	2.96	2.92
16	3.02	2.87	2.82
17	2.94	2.79	2.73
18	2.86	2.70	2.64
19	2.78	2.61	2.55
20	2.70	2.52	2.46



Figura 8.3. Grafica para cada Alternativa Proyectada

Tabla 8.13 Proyección del índice de Servicio para cada alternativa

## Costos de Operación Vehicular

Con lo anterior podemos concluir que lo que nos interesa es poder calcular **los costos de operación anuales por kilómetro**, en cada tramo se calculan para cada tipo de vehículo, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{COA} = \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365$$

Donde:

COA: es el costo de operación anual por kilómetro para todos los vehículos de un mismo tipo

Fb: es el Factor del Costo de Operación Base que se lee de las gráficas para el tipo de vehículo, tipo de terreno y estado superficial deseados. (Gráficas 5.1 a 5.7)

CB: es el Costo de Operación Base del vehículo. (Tablas 5.1 a 5.7)

TDPA: es el Tránsito Diario Promedio Anual del vehículo

365: corresponde al número de días del año

De esta manera considerando las gráficas 5.1 al 5.7 y las tablas del 5.1 al 5.7 del capítulo 5 vamos a calcular el Costo de Operación Anual para cada tipo de vehículo (ya descritos anteriormente), de esta manera tenemos lo siguiente:

Camión Articulado (T3-S3)

$$\begin{aligned} \text{COA} &= \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365 = (1.05) (8.26) (180) (365) \\ &= \$ 569,816.10/\text{KM} \end{aligned}$$

Camión Articulado (T3-S2)

$$\begin{aligned} \text{COA} &= \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365 = (1.05) (7.56) (300) (365) \\ &= \$ 869,211.00/\text{KM} \end{aligned}$$

Camión Articulado (T3-S2-R4)

$$\begin{aligned} \text{COA} &= \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365 = (1.05) (10.32) (20) (365) \\ &= \$ 79,102.80/\text{KM} \end{aligned}$$

Camión de Tres Ejes (C3)

$$\begin{aligned} \text{COA} &= \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365 = (1.05) (5.16) (280) (365) \\ &= \$ 553,719.60/\text{KM} \end{aligned}$$

Camión de Dos Ejes (C2)

$$\begin{aligned} \text{COA} &= \text{Fb} \times \text{CB} \times \text{TDPA} \times 365 = (1.05) (3.59) (420) (365) \\ &= \$ 577,864.35/\text{KM} \end{aligned}$$

## Autobús Foráneo

$$\begin{aligned} \text{COA} &= F_b \times CB \times \text{TDPA} \times 365 = (1.03) (6.09) (400) (365) \\ &= \$ 915,814.20/\text{KM} \end{aligned}$$

## Vehículo Ligero

$$\begin{aligned} \text{COA} &= F_b \times CB \times \text{TDPA} \times 365 = (1) (1.45) (2400) (365) \\ &= \$ 1,184,990.75/\text{KM} \end{aligned}$$

Sumando todos los COA (Costo de Operación Anual) por kilómetro para todos los vehículos, tenemos:

$$\begin{aligned} \sum \text{COA} (T3-S3+ T3-S2+ T3-S2-R4+ C3+ C2+ \text{Autobús Foráneo} + \text{Vehículo Ligero}) &= \$ 569,816.10/\text{KM} + \$ 869,211.00/\text{KM} + \$ 79,102.80/\text{KM} + \$ 553,719.60/\text{KM} \\ &+ \$ 577,864.35/\text{KM} + \$ 915,814.20/\text{KM} + \$ 1,184,980.00/\text{KM} = \mathbf{\$ 4,750,518.80/\text{KM}} \end{aligned}$$

Ahora evaluando para cada alternativa:

## Alternativa 1

$$\begin{aligned} \text{Costo de Operación Vehicular} &= \sum \text{COA}(i). \times \text{Longitud total de la alternativa 1} \\ &= \$ 4,750,518.80/\text{KM} \times 26 \text{ KM} \\ &= \$ 123,513,488.80/\text{año} \end{aligned}$$

## Alternativa 2.

$$\begin{aligned} \text{Costo de Operación Vehicular} &= \sum \text{COA}(i). \times \text{Longitud total de la alternativa 2} \\ &= \$ 4,750,518.80/\text{KM} \times 22 \text{ KM} \\ &= \$ 104,511,419.60/\text{año} \end{aligned}$$

## Alternativa 3

$$\begin{aligned} \text{Costo de Operación Vehicular} &= \sum \text{COA}(i). \times \text{Longitud total de la alternativa 2} \\ &= \$ 4,750,518.80/\text{KM} \times 20.5 \text{ KM} \\ &= \$ 97,385,635.40/\text{año} \end{aligned}$$

## Costos de Seguridad

Considerando el costo de seguridad para cada alternativa:

Alternativa 1 = (35 vehículos/año)(\$ 49,324.00) = \$ 1,726 940.00/año

Alternativa 2 = (30 vehículos/año)(\$ 49,324.00) = \$ 1,479 720.00/año

Alternativa 3 = (45 vehículos/año)(\$ 49,324.00) = \$ 2,712 820.00/año

Ahora todos los costos anuales para cada alternativa son los siguientes:

<b>Costos Anuales</b>			
	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
Costo Anual del Gobierno	\$5,747,878.78	\$8,436,620.65	\$15,354,311.62
Costos de Mantenimiento	\$2,331,680.00	\$1,972,960.00	\$3,561,977.50
Costos de Operación Vehicular	\$123,503,554.87	\$103,339,764.00	\$94,965,486.00
Costos de Seguridad	\$1,726,940.00	\$1,479,720.00	\$2,712,820.00
Total de Costos del Gobierno	\$8,079,558.78	\$10,409,580.65	\$18,916,289.12
Total de Costos del Público	\$125,230,494.87	\$104,819,484.00	\$97,678,306.00
<b>Total de Costos</b>	<b>\$133,310,553.65</b>	<b>\$115,229,064.65</b>	<b>\$116,594,595.12</b>

Tabla 8.14. Costos anuales a partir del primer año, para cada alternativa

Así con los costos anteriores podemos decir que la alternativa 2 es la más aceptable sobre las demás, sin embargo es preferible hacer un análisis con las medidas de efectividad económica vistas en el capítulo 6.

Si se desea comparar estas tres alternativas con las medidas de efectividad económica mencionados en el Capítulo 6, el primero será la razón beneficio/costo. Puede que se deba escoger una de estas alternativas, cuando se supone que lo ideal es tomar la alternativa que tenga el costo más bajo, en este caso la alternativa 2, a menos que se obtengan resultados mediante gastos extra, como en las alternativas 1 y 3. Como no se han definido los "beneficios" se consideran los beneficios de los usuarios como la reducción incremental de sus costos, desde las alternativas menos costosas a las más costosas. Puesto que se están examinando los beneficios incrementales necesarios, para alcanzar los beneficios adicionales.

### Método de la razón Beneficio/Costo

Los beneficios incrementales para la Alternativa 2, comparados con los correspondientes a la Alternativa 1, para  $i = 5\%$ , son los siguientes:

$$\begin{aligned}\Delta B_{2-1} &= \text{Costos Públicos (2)} - \text{Costos Públicos (1)} \\ &= \$ 125,230\,494.87 - \$ 104,819\,484.00 \\ &= \$ 20,411\,010.87/\text{año}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C_{2-1} &= \text{Costos Gubernamentales (2)} - \text{Costos Gubernamentales (1)} \\ &= \$ 10,409\,580.65 - \$ 8,079\,558.78 \\ &= \$ 2,330\,021.87/\text{año}\end{aligned}$$

Es decir para un gasto incrementado de \$ 2,330 021.87/año el gobierno puede proporcionar beneficios adicionales de \$ 20,411 010.87/año, para el público. La razón beneficio-costo apropiada entonces:

$$\begin{aligned}\Delta B/C_{2-1} &= \Delta B_{2-1} / \Delta C_{2-1} \\ &= \$ 20,411\,010.87/\text{año} / \$ 2,330\,021.87/\text{año} \\ &= 8.760 > 1\end{aligned}$$

Esto indica claramente que los fondos adicionales para la Alternativa 2, son valiosos, y se prefiere la *alternativa 2* en lugar de la alternativa 1. Usando un análisis similar, se calculan ahora los beneficios, los costos y la razón B/C para determinar si la alternativa 3 es preferible o no a la alternativa 2.

$$\begin{aligned}\Delta B_{3-2} &= \text{Costos Públicos (3)} - \text{Costos Públicos (2)} \\ &= \$ 104,819\,484.00 - \$ 97,678\,306.00 \\ &= \$ 7,141\,178.00/\text{año}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C_{3-2} &= \text{Costos Gubernamentales (3)} - \text{Costos Gubernamentales (2)} \\ &= \$ 18,916\,289.12 - \$ 10,409\,580.65 \\ &= \$ 8,506\,708.47/\text{año}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta B/C_{3-2} &= \Delta B_{3-2} / \Delta C_{3-2} \\ &= \$ 7,141\,178.00/\text{año} / \$ 8,506\,708.47/\text{año} \\ &= 0.839 < 1\end{aligned}$$

La razón beneficio-costo, con un valor menor que 1, indica que el gasto adicional de \$ 8,506 708.47/año, para constituir y mantener la alternativa 3 no proporcionará mejores beneficios al público. En realidad los ahorros de los usuarios serían únicamente de \$ 7,141 178.00/año. Por lo tanto de las tres alternativas la alternativa 2 es la que se prefiere.

El siguiente criterio beneficio-costo aprovecha el hecho de que si  $\Delta B/C > 1$ , entonces  $\Delta (B-C) > 0$ . Es decir, la diferencia en los beneficios y costos incrementales se pueden usar en vez de la razón incremental beneficio-costo.

Aplicando esta medida a las carreteras, podemos hacer los siguientes cálculos para comparar las alternativas 1 y 2, se sabe que:

$$\Delta B_{2-1} = \$ 20,411\ 010.87/\text{año}$$

$$\Delta C_{2-1} = \$ 2,330\ 021.87/\text{año}$$

Esto origina

$$\Delta (B-C)_{2-1} = \Delta B_{2-1} - \Delta C_{2-1}$$

$$= \$ 20,411\ 010.87/\text{año} - \$ 2,330\ 021.87/\text{año}$$

$$= \$ 18,080\ 989.00/\text{año}$$

De lo que se deduce nuevamente que la *alternativa 2* es preferible que la *alternativa 1*. Así mismo:

$$\Delta (B-C)_{3-2} = \Delta B_{3-2} - \Delta C_{3-2}$$

$$= \$ 71,411\ 178 - \$ 8,506\ 708.47$$

$$= \$ 1,365\ 530.47/\text{año}$$

Que indica que la alternativa 3 no merece el gasto adicional requerido y se debe construir la alternativa 2.

Los criterios beneficio-costos son compatibles con las medidas de efectividad económica presentadas en el capítulo 6.

### Método del Valor Presente

El valor presente de todos los costos para cada alternativa son los siguientes:

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 1
Crecimiento de la demanda 5.0%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 59,662,000.00	\$ 8,079,558.78	\$ 8,079,558.78
1	\$ 125,230,494.00	\$ 2,331,680.00	\$ 127,562,174.00	\$ 102,049,739.20
2	\$ 131,492,018.70	\$ 2,448,264.00	\$ 133,940,282.70	\$ 85,721,780.93
3	\$ 138,066,619.64	\$ 2,570,677.20	\$ 140,637,296.84	\$ 72,006,295.98
4	\$ 144,969,950.62	\$ 2,699,211.06	\$ 147,669,161.68	\$ 60,485,288.62
5	\$ 152,218,448.15	\$ 10,101,680.00	\$ 162,320,128.15	\$ 53,189,059.59
6	\$ 159,829,370.55	\$ 2,834,171.61	\$ 162,663,542.17	\$ 42,641,271.60
7	\$ 167,820,839.08	\$ 2,975,880.19	\$ 170,796,719.28	\$ 35,818,668.14
8	\$ 176,211,881.04	\$ 3,124,674.20	\$ 179,336,555.24	\$ 30,087,681.24
9	\$ 185,022,475.09	\$ 3,280,907.91	\$ 188,303,383.00	\$ 25,273,652.24
10	\$ 194,273,598.84	\$ 25,700,907.91	\$ 219,974,506.76	\$ 23,619,582.81
11	\$ 203,987,278.79	\$ 3,444,953.31	\$ 207,432,232.09	\$ 17,818,293.06
12	\$ 214,186,642.72	\$ 3,617,200.97	\$ 217,803,843.70	\$ 14,967,366.17
13	\$ 224,895,974.86	\$ 3,798,061.02	\$ 228,694,035.88	\$ 12,572,587.58
14	\$ 236,140,773.60	\$ 3,987,964.07	\$ 240,128,737.68	\$ 10,560,973.57
15	\$ 247,947,812.28	\$ 11,757,964.07	\$ 259,705,776.36	\$ 9,137,584.67
16	\$ 260,345,202.90	\$ 4,187,362.28	\$ 264,532,565.18	\$ 7,445,929.76
17	\$ 273,362,463.04	\$ 4,396,730.39	\$ 277,759,193.44	\$ 6,254,581.00
18	\$ 287,030,586.20	\$ 4,616,566.91	\$ 291,647,153.11	\$ 5,253,848.04
19	\$ 301,382,115.51	\$ 4,847,395.26	\$ 306,229,510.76	\$ 4,413,232.35
20	\$ 316,451,221.28	\$ 27,267,395.26	\$ 343,718,616.54	\$ 3,962,805.85
			VPN 25%	\$ 631,359,781.19

Tabla 8.15. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 1 considerando una tasa de actualización de 25%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 2
Crecimiento de la demanda 5.0%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00
1	\$ 104,819,484.00	\$ 1,972,960.00	\$ 106,792,444.00	\$ 85,433,955.20
2	\$ 110,060,458.20	\$ 2,071,608.00	\$ 112,132,066.20	\$ 71,764,522.37
3	\$ 115,563,481.11	\$ 2,175,188.40	\$ 117,738,669.51	\$ 60,282,198.79
4	\$ 121,341,655.17	\$ 2,283,947.82	\$ 123,625,602.99	\$ 50,637,046.98
5	\$ 127,408,737.92	\$ 10,101,680.00	\$ 137,510,417.92	\$ 45,059,413.75
6	\$ 133,779,174.82	\$ 2,398,145.21	\$ 136,177,320.03	\$ 35,698,067.38
7	\$ 140,468,133.56	\$ 2,518,052.47	\$ 142,986,186.03	\$ 29,986,376.60
8	\$ 147,491,540.24	\$ 2,643,955.10	\$ 150,135,495.33	\$ 25,188,556.34
9	\$ 154,866,117.25	\$ 2,776,152.85	\$ 157,642,270.10	\$ 21,158,387.33
10	\$ 162,609,423.11	\$ 22,954,152.85	\$ 185,563,575.96	\$ 19,924,737.25
11	\$ 170,739,894.27	\$ 2,914,960.49	\$ 173,654,854.76	\$ 14,916,838.44
12	\$ 179,276,888.98	\$ 3,060,708.52	\$ 182,337,597.50	\$ 12,530,144.29
13	\$ 188,240,733.43	\$ 3,213,743.94	\$ 191,454,477.37	\$ 10,525,321.20
14	\$ 197,652,770.10	\$ 3,374,431.14	\$ 201,027,201.24	\$ 8,841,269.81
15	\$ 207,535,408.61	\$ 11,144,431.14	\$ 218,679,839.75	\$ 7,694,112.85
16	\$ 217,912,179.04	\$ 3,543,152.70	\$ 221,455,331.74	\$ 6,233,413.43
17	\$ 228,807,787.99	\$ 3,720,310.33	\$ 232,528,098.32	\$ 5,236,067.28
18	\$ 240,248,177.39	\$ 3,906,325.85	\$ 244,154,503.24	\$ 4,398,296.52
19	\$ 252,260,586.26	\$ 4,101,642.14	\$ 256,362,228.40	\$ 3,694,569.08
20	\$ 264,873,615.57	\$ 24,279,642.14	\$ 289,153,257.71	\$ 3,333,710.09
VPN 25%				\$ 621,185,004.99

Tabla 8.16. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 2 considerando una tasa de actualización de 25%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 3
Crecimiento de la demanda 5.0%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00
1	\$ 97,678,306.00	\$ 3,561,978.00	\$ 101,240,284.00	\$ 81,645,390.32
2	\$ 102,562,221.30	\$ 3,740,076.90	\$ 106,302,298.20	\$ 69,135,209.55
3	\$ 107,690,332.37	\$ 3,927,080.75	\$ 111,617,413.11	\$ 58,541,911.31
4	\$ 113,074,848.98	\$ 4,123,434.78	\$ 117,198,283.77	\$ 49,571,779.74
5	\$ 118,728,591.43	\$ 10,101,680.00	\$ 128,830,271.43	\$ 43,945,002.75
6	\$ 124,665,021.00	\$ 4,329,606.52	\$ 128,994,627.53	\$ 35,484,730.55
7	\$ 130,898,272.05	\$ 4,546,086.85	\$ 135,444,358.90	\$ 30,047,554.10
8	\$ 137,443,185.66	\$ 4,773,391.19	\$ 142,216,576.85	\$ 25,443,493.39
9	\$ 144,315,344.94	\$ 5,012,060.75	\$ 149,327,405.69	\$ 21,544,893.60
10	\$ 151,531,112.19	\$ 25,190,060.75	\$ 176,721,172.94	\$ 20,562,302.02
11	\$ 159,107,667.80	\$ 5,262,663.79	\$ 164,370,331.58	\$ 15,423,569.49
12	\$ 167,063,051.19	\$ 5,525,796.98	\$ 172,588,848.16	\$ 13,060,280.62
13	\$ 175,416,203.75	\$ 5,802,086.82	\$ 181,218,290.57	\$ 11,059,108.59
14	\$ 184,187,013.93	\$ 6,092,191.17	\$ 190,279,205.10	\$ 9,364,567.75
15	\$ 193,396,364.63	\$ 13,862,191.17	\$ 207,258,555.80	\$ 8,225,971.30
16	\$ 203,066,182.86	\$ 6,396,800.72	\$ 209,462,983.59	\$ 6,704,406.26
17	\$ 213,219,492.00	\$ 6,716,640.76	\$ 219,936,132.76	\$ 5,677,118.20
18	\$ 223,880,466.60	\$ 7,052,472.80	\$ 230,932,939.40	\$ 4,807,237.19
19	\$ 235,074,489.93	\$ 7,405,096.44	\$ 242,479,586.37	\$ 4,070,644.39
20	\$ 246,828,214.43	\$ 27,583,096.44	\$ 274,411,310.87	\$ 3,715,081.15
			VPN 25%	\$ 631,963,252.27

Tabla 8.17 Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 2 considerando una tasa de actualización de 25%

Puesto que el valor presente de todos los costos para la **alternativa 2** es el menor, de nuevo se ve que esta alternativa es la preferida.

Alternativa	Costo Actualizado Acumulado
1	\$ 631,359,781.19
2	\$ 621,185,004.99
3	\$ 631,963,252.27

El costo anual equivalente se calcula simplemente multiplicando una constante por el valor.

Ahora calculando el costo anual uniforme equivalente mediante:

$$VA \text{ total } (i) = VA \text{ costos gubernamentales totales } (i) + VA \text{ costos públicos totales } (i)$$

Se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Alternativa 1: } VA_1 &= \$ 8, 079 558.78 + \$ 125, 230 494.87 \\ &= \$ 133,310 553.65/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alternativa 2: } VA_2 &= \$ 10, 409 580.65 + \$ 104, 819 484 \\ &= \$ 115,229 064.65/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alternativa 3: } VA_3 &= \$ 18, 916 289.12 + \$ 97, 678 306.00 \\ &= \$ 116,594 595.12/\text{año} \end{aligned}$$

Y nuevamente la **alternativa 2** es la preferida

Es interesante y lógico hacer constar que las diferencias en costos anuales uniformes equivalentes para las alternativa 1, 2 y 3 son iguales que las diferencias en los beneficios incrementales menos los costos incrementales para las alternativas 1, 2 y 3. Es decir;

$$\begin{aligned} VA_{(1)} - VA_{(2)} &= \$ 133, 310 553.65 - \$ 115, 229 064.65 \\ &= \$ 18, 081 489/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta B_{(2)} - (1) - \Delta C_{(2)} - (1) &= \$ 20, 411 010.87 - \$ 2, 330 021.87 \\ &= \$ 18, 080 489/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VA_{(2)} - VA_{(3)} &= \$ 115, 229 064.65 - \$ 116, 594 595.12 \\ &= \$ 1, 365 530.47/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta B_{(3)} - (2) - \Delta C_{(3)} - (2) &= \$ 7, 141 178 - \$ 8, 506 708.47 \\ &= \$ 1, 365 530.47/\text{año} \end{aligned}$$

Finalmente los criterios beneficio-costos se pueden relacionar también con el método de la Tasa Interna de Rendimiento, se observa que la tasa de interés hace que los beneficios anuales incrementales equivalentes menos los costos incrementales sean iguales a cero.

Se puede usar el método de la tasa interna de rendimiento hallando el valor de la tasa interna de interés,  $i$ , que iguala los beneficios incrementales. Es decir:

$$\Delta W_{k-j} = 0 = \Delta B_{k-j}(i) - \Delta C_{k-j}(i)$$

Usando esta expresión para considerar la *alternativa 2* frente a la *alternativa 1*, se tiene:

$$\begin{aligned}\Delta B(2) - (1) &= \$ 125,230,494.87 - \$ 104,819,484 \\ &= \$ 20,411,010.87\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C(2) - (1) &= [\$ 98,648,000 + \$ 20,178,000 (P|F i, 10) + \$ 20,178,000 (P|F i, 20)] \\ & (A|P i, 30) + \$ 1,972,960 + [\$ 59,662,000 + \$ 22,420,000 (P|F i, 10) + \$ 22,420,000 (P|F i, 20)] \\ & [A|P i, 30] + \$ 2,331,680\end{aligned}$$

Buscando el valor de  $i$  que da  $AW(2) - (1)(i) = AB(2) - (1)(i) - AC(2) - (1)(i)$ . La tasa de interés que se busca se encuentra entre 30 y 35 % o sea aproximadamente 32%, en cualquier caso,  $i$  excede fácilmente de 6% y se prefiere la **alternativa 2** a la alternativa 1.

Usando el Método de la tasa de rendimiento se pueden comparar también las alternativas 2 y 3.

$$\begin{aligned}\Delta B(3) - (2) &= \$ 104,819,484 + \$ 97,678,306 \\ &= \$ 7,141,178\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta C(3) - (2) &= [\$ 193,933,000 + \$ 20,178,000 (P|F i, 10) + \$ 20,178,000 (P|F i, 20)] \\ & (A|P i, 30) + \$ 3,561,977.50 - [\$ 98,648,000 + \$ 20,178,000 (P|F i, 10) + \$ 20,178,000 (P|F i, 20)] \\ & [A|P i, 30] + \$ 1,972,960\end{aligned}$$

La tasa de interés que hace que  $VA(3) - (2)(i) = AB(3) - (2)(i) - AC(3) - (2)(i) = 0$  se encuentra entre el 2.5% y el 3%, aproximadamente el 2.73%, puesto que  $i$  es menor que 6% se prefiere la **alternativa 2** a la alternativa 3.

### Análisis de Sensibilidad

Contemplando el grado de incertidumbre que existe en las condiciones económicas de México, tanto interna como externamente, se ha considerado conveniente examinar los resultados de la evaluación económica a la luz de variaciones a la tasa de actualización, fijada en 25%, las variantes consideradas a la tasa de actualización son 10%, 20%, 30%, 40% y 50%.

TASA i	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
10%	\$ 1,569,739,337.49	\$ 1,408,082,783.84	\$1,353,739,182.99
20%	\$ 806,713,654.74	\$ 768,240,247.13	\$ 747,918,136.62
30%	\$ 514,839,713.66	\$ 523,465,704.79	\$ 516,183,122.56
40%	\$ 373,489,733.69	\$ 404,920,621.24	\$ 403,964,993.30
50%	\$ 292,643,210.02	\$ 337,119,385.83	\$ 339,786,324.81

Tabla 8.18. Estudio de Sensibilidad a las Tasas de Actualización  
(Crecimiento de la demanda del 5%)

Como se puede apreciar en la Tabla 8.18, sobre la base de un crecimiento de demanda de un 5%, el cálculo de los costos actualizados acumulados para un horizonte de planificación de 20 años. Para tasas de actualización menores al 30% la alternativa 3 sería preferente a las alternativas 1 y 2. Siguiendo la alternativa 2 de la alternativa 1. Sin embargo para tasas del 40% y mayores la alternativa que se prefiere es la alternativa 1, seguido por alternativa 2 y la alternativa 3.

Preferencia	Tasa de Actualización				
	10%	20%	30%	40%	50%
Alternativa 1	3	3	1	1	1
Alternativa 2	2	2	3	3	2
Alternativa 3	1	1	2	2	3

Tabla 8.19.  
Jerarquización de alternativas por su preferencia económica

Podemos también observar las sensibilidades a las tasas de actualización pero ahora para crecimientos de la demanda de sólo el 2.5% anual y del 7.5% anual, en la Tablas 8.20 y 8.21 respectivamente.

TASA <i>i</i>	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
10%	\$1,312,483,686.85	\$ 1,192,724,650.06	\$1,150,469,809.82
20%	\$ 713,365,964.57	\$ 690,095,414.32	\$ 674,154,970.94
30%	\$ 471,777,069.51	\$ 487,416,329.22	\$ 482,152,638.27
40%	\$ 349,788,780.29	\$ 385,079,628.03	\$ 385,233,176.19
50%	\$ 277,881,747.49	\$ 324,761,967.70	\$ 328,117,975.08

Tabla 8.20. Crecimiento de la Demanda del 2.5%

TASA <i>i</i>	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
10%	\$1,903,555,754.69	\$ 1,687,530,596.63	\$1,617,327,284.99
20%	\$ 921,970,476.86	\$ 864,725,428.73	\$ 838,944,564.27
30%	\$ 565,726,316.95	\$ 566,064,600.55	\$ 556,379,088.18
40%	\$ 400,555,880.69	\$ 427,578,656.46	\$ 425,348,861.28
50%	\$ 309,083,882.85	\$ 350,882,490.98	\$ 352,778,102.96

Tabla 8.21. Crecimiento de la Demanda del 7.5%

### Sensibilidad al crecimiento de la demanda

Ante la incertidumbre de conocer el desenvolvimiento futuro de la demanda de este tramo de la carretera, se ha optado por observar los resultados económicos del proyecto ante variaciones en su tasa de crecimiento de utilización; por lo anterior, además de las tasa del 5% se realizaron ejercicios de la evaluación para 2.5% y 7.5%, esto es una reducción o un aumento del 50% de la demanda.

Para la disminución de la tendencia de la demanda vehicular del 2.5%, los nuevos costos actualizados acumulados para cada alternativa se muestran en los cuadros 8.22, 8.23, 8.24, sin embargo de los resultados se puede concluir que esta tasa de crecimiento de la demanda del 2.5% no modifica en nada las preferencias de las alternativas, luego la alternativa 2 es la preferida

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 1
Crecimiento de la demanda 2.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 59,662,000.00	\$ 8,079,558.78	\$ 8,079,558.78
1	\$ 125,230,494.00	\$ 2,331,680.00	\$ 127,562,174.00	\$ 102,049,739.20
2	\$ 128,361,256.35	\$ 2,389,972.00	\$ 130,751,228.35	\$ 83,680,786.14
3	\$ 131,570,287.76	\$ 2,449,721.30	\$ 134,020,009.06	\$ 68,618,244.64
4	\$ 134,859,544.95	\$ 2,510,964.33	\$ 137,370,509.29	\$ 56,266,960.60
5	\$ 138,231,033.58	\$ 10,101,680.00	\$ 148,332,713.58	\$ 48,605,663.58
6	\$ 141,686,809.42	\$ 2,763,506.33	\$ 144,450,315.75	\$ 37,866,783.57
7	\$ 145,228,979.65	\$ 2,832,593.99	\$ 148,061,573.64	\$ 31,050,762.53
8	\$ 148,859,704.14	\$ 2,903,408.84	\$ 151,763,112.98	\$ 25,461,625.27
9	\$ 152,581,196.75	\$ 2,975,994.06	\$ 155,557,190.81	\$ 20,878,532.72
10	\$ 156,395,726.66	\$ 25,395,994.06	\$ 181,791,720.73	\$ 19,519,737.38
11	\$ 160,305,619.83	\$ 3,050,393.91	\$ 163,356,013.74	\$ 14,032,174.73
12	\$ 164,313,260.33	\$ 3,685,293.76	\$ 167,998,554.09	\$ 11,544,772.73
13	\$ 168,421,091.84	\$ 3,761,553.61	\$ 172,182,645.45	\$ 9,465,841.04
14	\$ 172,631,619.13	\$ 3,853,685.96	\$ 176,485,305.09	\$ 7,761,905.80
15	\$ 176,947,409.61	\$ 10,101,680.00	\$ 187,049,089.61	\$ 6,581,204.77
16	\$ 181,371,094.85	\$ 3,950,028.11	\$ 185,321,122.96	\$ 5,216,325.88
17	\$ 185,905,372.22	\$ 4,202,570.11	\$ 190,107,942.33	\$ 4,280,850.29
18	\$ 190,553,006.53	\$ 4,301,320.81	\$ 194,854,327.33	\$ 3,510,183.50
19	\$ 195,316,831.69	\$ 4,406,385.06	\$ 199,723,216.75	\$ 2,878,314.89
20	\$ 200,199,752.48	\$ 26,826,385.06	\$ 227,026,137.54	\$ 2,617,433.16
			<b>VPN 25%</b>	<b>\$ 569,967,401.23</b>

Tabla 8.22. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 1 considerando una tasa de actualización de 25%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 2
Crecimiento de la demanda 2.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00
1	\$ 104,819,484.00	\$ 1,972,960.00	\$ 106,792,444.00	\$ 71,194,962.67
2	\$ 107,439,971.10	\$ 2,022,284.00	\$ 109,462,255.10	\$ 48,649,891.16
3	\$ 110,125,970.38	\$ 2,072,841.10	\$ 112,198,811.48	\$ 33,244,092.29
4	\$ 112,879,119.64	\$ 2,124,662.13	\$ 115,003,781.76	\$ 22,716,796.40
5	\$ 115,701,097.63	\$ 10,101,680.00	\$ 125,802,777.63	\$ 16,566,620.92
6	\$ 118,593,625.07	\$ 2,177,778.68	\$ 120,771,403.75	\$ 10,602,702.11
7	\$ 121,558,465.70	\$ 2,430,320.68	\$ 123,988,786.38	\$ 7,256,773.96
8	\$ 124,597,427.34	\$ 2,484,765.15	\$ 127,082,192.49	\$ 4,958,549.20
9	\$ 127,712,363.02	\$ 2,545,523.16	\$ 130,257,886.19	\$ 3,388,306.55
10	\$ 130,905,172.10	\$ 22,723,523.16	\$ 153,628,695.26	\$ 2,664,156.61
11	\$ 134,177,801.40	\$ 2,609,161.24	\$ 136,786,962.64	\$ 1,581,396.80
12	\$ 137,532,246.43	\$ 3,177,249.32	\$ 140,709,495.76	\$ 1,084,496.86
13	\$ 140,970,552.59	\$ 3,242,478.35	\$ 144,213,030.95	\$ 740,999.88
14	\$ 144,494,816.41	\$ 3,321,909.59	\$ 147,816,726.00	\$ 506,344.33
15	\$ 148,107,186.82	\$ 11,091,909.59	\$ 159,199,096.41	\$ 363,556.33
16	\$ 151,809,866.49	\$ 3,494,648.89	\$ 155,304,515.38	\$ 236,441.63
17	\$ 155,605,113.15	\$ 3,582,015.11	\$ 159,187,128.26	\$ 161,568.44
18	\$ 159,495,240.98	\$ 3,671,565.49	\$ 163,166,806.47	\$ 110,405.10
19	\$ 163,482,622.01	\$ 3,763,354.62	\$ 167,245,976.63	\$ 75,443.49
20	\$ 167,569,687.56	\$ 23,941,354.62	\$ 191,511,042.18	\$ 57,592.86
			VPN 25%	\$ 324,809,097.59

Tabla 8.23. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 2 considerando una tasa de actualización de 25%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 3
Crecimiento de la demanda del 2.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00
1	\$ 97,678,306.00	\$ 3,561,978.00	\$ 101,240,284.00	\$ 80,992,227.20
2	\$ 100,120,263.65	\$ 3,651,027.45	\$ 103,771,291.10	\$ 66,413,626.30
3	\$ 102,623,270.24	\$ 3,742,303.14	\$ 106,365,573.38	\$ 54,459,173.57
4	\$ 105,188,852.00	\$ 3,835,860.71	\$ 109,024,712.71	\$ 44,656,522.33
5	\$ 107,818,573.30	\$ 10,101,680.00	\$ 117,920,253.30	\$ 38,640,108.60
6	\$ 110,514,037.63	\$ 3,931,757.23	\$ 114,445,794.86	\$ 30,001,278.45
7	\$ 113,276,888.57	\$ 4,030,051.16	\$ 117,306,939.73	\$ 24,601,048.33
8	\$ 116,108,810.78	\$ 4,130,802.44	\$ 120,239,613.23	\$ 20,172,859.63
9	\$ 119,011,531.05	\$ 4,234,072.50	\$ 123,245,603.56	\$ 16,541,744.90
10	\$ 121,986,819.33	\$ 24,412,072.50	\$ 146,398,891.83	\$ 15,719,461.31
11	\$ 125,036,489.81	\$ 4,339,924.32	\$ 129,376,414.13	\$ 11,113,349.35
12	\$ 128,162,402.06	\$ 4,448,422.42	\$ 132,610,824.48	\$ 9,112,946.47
13	\$ 131,366,462.11	\$ 4,670,843.55	\$ 136,037,305.66	\$ 7,478,729.97
14	\$ 134,650,623.66	\$ 4,787,614.63	\$ 139,438,238.30	\$ 6,132,558.57
15	\$ 138,016,889.26	\$ 12,557,614.63	\$ 150,574,503.89	\$ 5,297,869.37
16	\$ 141,467,311.49	\$ 4,909,698.81	\$ 146,377,010.29	\$ 4,120,146.56
17	\$ 145,003,994.27	\$ 5,032,441.28	\$ 150,036,435.55	\$ 3,378,520.18
18	\$ 148,629,094.13	\$ 5,158,252.31	\$ 153,787,346.44	\$ 2,770,386.54
19	\$ 152,344,821.48	\$ 5,287,208.62	\$ 157,632,030.10	\$ 2,271,716.97
20	\$ 156,153,442.02	\$ 25,465,208.62	\$ 181,618,650.64	\$ 2,093,920.48
			VPN 25%	\$ 559,901,195.07

Tabla 8.24. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 3 considerando una tasa de actualización de 25%

Si la tasa de crecimiento de la demanda fuera del 7.5%, esto es, un incremento del 50% de la actual, la preferencia entre alternativas no cambia resultando mejor la alternativa 2. Como se observa en las Tablas 8.25, 8.26, 8.27.

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 1
Crecimiento de la demanda 7.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 59,662,000.00	\$ 8,079,558.78	\$ 8,079,558.78
1	\$ 125,230,494.00	\$ 2,331,680.00	\$ 127,562,174.00	\$ 102,049,739.20
2	\$ 134,622,781.05	\$ 2,506,556.00	\$ 137,129,337.05	\$ 87,762,775.71
3	\$ 144,719,489.63	\$ 2,694,547.70	\$ 147,414,037.33	\$ 75,475,987.11
4	\$ 155,573,451.35	\$ 2,896,638.78	\$ 158,470,090.13	\$ 64,909,348.92
5	\$ 167,241,460.20	\$ 10,101,680.00	\$ 177,343,140.20	\$ 58,111,800.18
6	\$ 179,784,569.72	\$ 3,654,264.78	\$ 183,438,834.49	\$ 48,087,389.83
7	\$ 193,268,412.45	\$ 3,928,334.64	\$ 197,196,747.08	\$ 41,355,155.25
8	\$ 207,763,543.38	\$ 4,222,959.73	\$ 211,986,503.11	\$ 35,565,433.52
9	\$ 223,345,809.13	\$ 4,539,681.71	\$ 227,885,490.85	\$ 30,586,272.83
10	\$ 240,096,744.82	\$ 26,959,681.71	\$ 267,056,426.53	\$ 28,674,965.45
11	\$ 258,104,000.68	\$ 4,880,157.84	\$ 262,984,158.52	\$ 22,590,167.20
12	\$ 277,461,800.73	\$ 6,902,133.97	\$ 284,363,934.70	\$ 19,541,340.80
13	\$ 298,271,435.79	\$ 7,268,145.81	\$ 305,539,581.59	\$ 16,797,216.14
14	\$ 320,641,793.47	\$ 7,785,805.86	\$ 328,427,599.33	\$ 14,444,398.57
15	\$ 344,689,927.98	\$ 10,101,680.00	\$ 354,791,607.98	\$ 12,483,119.95
16	\$ 370,541,672.58	\$ 8,369,741.30	\$ 378,911,413.87	\$ 10,665,408.14
17	\$ 398,332,298.02	\$ 9,127,367.30	\$ 407,459,665.32	\$ 9,175,175.98
18	\$ 428,207,220.37	\$ 9,755,097.89	\$ 437,962,318.27	\$ 7,889,627.73
19	\$ 460,322,761.90	\$ 9,983,282.08	\$ 470,306,043.98	\$ 6,777,824.40
20	\$ 494,846,969.04	\$ 32,403,282.08	\$ 527,250,251.12	\$ 6,078,781.53
			VPN 25%	\$ 707,101,487.22

Tabla 8.25. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 1 considerando una tasa de actualización de 25%, para un crecimiento de la demanda del 7.5%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 2
Crecimiento de la demanda 7.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00	\$ 98,648,000.00
1	\$ 104,819,484.00	\$ 1,972,960.00	\$ 106,792,444.00	\$ 71,194,962.67
2	\$ 112,680,945.30	\$ 2,120,932.00	\$ 114,801,877.30	\$ 51,023,056.58
3	\$ 121,132,016.20	\$ 2,280,001.90	\$ 123,412,018.10	\$ 36,566,523.88
4	\$ 130,216,917.41	\$ 2,451,002.04	\$ 132,667,919.45	\$ 26,206,008.78
5	\$ 139,983,186.22	\$ 10,101,680.00	\$ 150,084,866.22	\$ 19,764,262.22
6	\$ 150,481,925.18	\$ 2,634,827.20	\$ 153,116,752.38	\$ 13,442,348.63
7	\$ 161,768,069.57	\$ 3,392,453.20	\$ 165,160,522.77	\$ 9,666,459.49
8	\$ 173,900,674.79	\$ 3,590,065.24	\$ 177,490,740.03	\$ 6,925,412.20
9	\$ 186,943,225.40	\$ 3,844,499.23	\$ 190,787,724.63	\$ 4,962,826.55
10	\$ 200,963,967.31	\$ 24,022,499.23	\$ 224,986,466.53	\$ 3,901,609.54
11	\$ 216,036,264.85	\$ 4,132,836.67	\$ 220,169,101.52	\$ 2,545,379.37
12	\$ 232,238,984.72	\$ 5,934,524.11	\$ 238,173,508.83	\$ 1,835,685.79
13	\$ 249,656,908.57	\$ 6,244,486.86	\$ 255,901,395.43	\$ 1,314,880.50
14	\$ 268,381,176.71	\$ 6,689,576.17	\$ 275,070,752.88	\$ 942,251.40
15	\$ 288,509,764.97	\$ 14,459,576.17	\$ 302,969,341.14	\$ 691,878.44
16	\$ 310,147,997.34	\$ 7,191,294.38	\$ 317,339,291.72	\$ 483,129.66
17	\$ 333,409,097.14	\$ 7,730,641.46	\$ 341,139,738.60	\$ 346,242.93
18	\$ 358,414,779.43	\$ 8,310,439.57	\$ 366,725,218.99	\$ 248,140.76
19	\$ 385,295,887.88	\$ 8,933,722.53	\$ 394,229,610.42	\$ 177,834.21
20	\$ 414,193,079.48	\$ 29,111,722.53	\$ 443,304,802.01	\$ 133,314.46
VPN 25%				\$ 351,020,208.07

Tabla 8.26. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 2 considerando una tasa de actualización de 25%, para un crecimiento de la demanda del 7.5%

CALCULO DEL COSTO ACTUALIZADO				Alternativa 3
Crecimiento de la demanda del 7.5%				
AÑO	COSTO DE OPERACIÓN	INVERSIÓN Y MANTENIMIENTO	COSTOS TOTALES	COSTOS ACTUALES
0		\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00	\$ 113,933,000.00
1	\$ 97,678,306.00	\$ 3,561,978.00	\$ 101,240,284.00	\$ 80,992,227.20
2	\$ 105,004,178.95	\$ 3,829,126.35	\$ 108,833,305.30	\$ 69,653,315.39
3	\$ 112,879,492.37	\$ 4,116,310.83	\$ 116,995,803.20	\$ 59,901,851.24
4	\$ 121,345,454.30	\$ 4,425,034.14	\$ 125,770,488.44	\$ 51,515,592.06
5	\$ 130,446,363.37	\$ 10,101,680.00	\$ 140,548,043.37	\$ 46,054,782.85
6	\$ 140,229,840.62	\$ 4,756,911.70	\$ 144,986,752.32	\$ 38,007,407.20
7	\$ 150,747,078.67	\$ 5,113,680.08	\$ 155,860,758.75	\$ 32,686,370.19
8	\$ 162,053,109.57	\$ 5,497,206.08	\$ 167,550,315.65	\$ 28,110,278.37
9	\$ 174,207,092.79	\$ 5,909,496.54	\$ 180,116,589.33	\$ 24,174,839.39
10	\$ 187,272,624.75	\$ 26,087,496.54	\$ 213,360,121.29	\$ 22,909,368.58
11	\$ 201,318,071.60	\$ 6,352,708.78	\$ 207,670,780.38	\$ 17,838,784.20
12	\$ 216,416,926.98	\$ 6,829,161.94	\$ 223,246,088.91	\$ 15,341,354.41
13	\$ 232,648,196.50	\$ 7,341,349.08	\$ 239,989,545.58	\$ 13,193,564.80
14	\$ 250,096,811.24	\$ 7,891,950.26	\$ 257,988,761.50	\$ 11,346,465.72
15	\$ 268,854,072.08	\$ 15,661,950.26	\$ 284,516,022.34	\$ 10,010,517.60
16	\$ 289,018,127.48	\$ 8,483,846.53	\$ 297,501,974.02	\$ 8,373,936.12
17	\$ 310,694,487.05	\$ 9,120,135.02	\$ 319,814,622.07	\$ 7,201,585.06
18	\$ 333,996,573.57	\$ 9,804,145.15	\$ 343,800,718.72	\$ 6,193,363.15
19	\$ 359,046,316.59	\$ 10,539,456.04	\$ 369,585,772.63	\$ 5,326,292.31
20	\$ 385,974,790.34	\$ 30,717,456.04	\$ 416,692,246.37	\$ 4,804,134.52
			<b>VPN 25%</b>	<b>\$ 667,569,030.38</b>

Tabla 8.27. Cálculo del Valor presente Neto, para la alternativa 3 considerando una tasa de actualización de 25%, para un crecimiento de la demanda del 7.5%

Crecimiento Anual de la Demanda			
Preferencia	2.50%	5.00%	7.50%
Alternativa 1	3	2	3
Alternativa 2	1	1	1
Alternativa 3	2	3	2

Tabla 8.28. Jerarquización de alternativas por su preferencia económica

En la tabla 8.28 observamos claramente que a pesar de variar la demanda para un 50% con respecto a la demanda del 5% de crecimiento anual a 2.5% y a 7.5% la alternativa que más conviene a la carretera es la **alternativa 2**, ya que mantiene costos más bajos.

**Capítulo**

# **9**

ANÁLISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

# Conclusiones

## Capítulo 9. Conclusiones

En este trabajo se han revisado distintas metodologías para la evaluación de carreteras, de cómo hacer una correcta evaluación, para determinar si está se encuentra en buen estado y mantenga un nivel de servicio aceptable, considerando todo el entorno que envuelve a la carretera. La evaluación comienza cuando se tiene la suficiente información, esto sirve para tener prioridades de actuación e indicar tipo y cantidades de obra de mantenimiento y/o reconstrucción se llevaran a cabo. Una parte importante en la evaluación de las carreteras es el deterioro provocado por el tránsito y el clima, el tránsito por los efectos de las cargas de los vehículos en el pavimento y el clima, por la temperatura además de precipitaciones que puedan existir, estos efectos se manifiestan a través del tiempo en distintos grados.

Estos deterioros afectan no sólo al pavimento si también a la estructura de la carretera, lo que son la base, subbase, subrasante, terracería, drenaje, etc. De esta forma la revisión estructural de las carreteras proporciona un conocimiento detallado del estado de está, la información recopilada debe ser producto de mediciones realizadas con procedimientos y equipos confiables, y con esto podemos generar modelos que puedan predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo y pronosticar los efectos del mantenimiento a corto y largo plazo, con el objeto de realizar estimaciones razonables para generar alternativas para llevar a cabo su conservación

Es importante evaluar la condición superficial mediante el monitoreo periódico y permanente de la red nacional de carreteras. Un Índice muy importante para poder hacer esta evaluación es el Índice Internacional de Rugosidad ya que influye de manera directa en los costos de operación de los vehículos, por ello es necesario contar con una escala que permitirá correlacionar los valores dados por los diversos equipos existentes en el mundo para la medición de la rugosidad. En nuestro país es necesario implantar el Índice Internacional de Rugosidad para una mejor evaluación del estado superficial de los pavimentos. Conviene dejar de evaluar subjetivamente las carreteras con el Índice de Servicio Actual.

Se espera que este trabajo haga ver en forma cuantitativa que en una carretera importante desde el punto de vista nacional, con tránsito notable y susceptible de desarrollarse, la mejor política técnica y económicamente hablando estriba en dotarla de una estructura inicial realmente fuerte, que evite frecuentes acciones de conservación. En caminos relativamente poco importantes será donde puedan tener cabida políticas de inversiones iniciales más bajas y más frecuentes acciones de conservación.

El objetivo básico de la evaluación de carreteras es usar información segura y consistente para desarrollar criterios de decisión, para otorgar alternativas realistas y contribuir a la eficiencia en la toma de decisiones, para así conseguir un programa de

acción económicamente óptimo y en el cual se provea una retroalimentación de las consecuencias de las decisiones tomadas, como medio de asegurar su efectividad.

Debe hacerse notar también que los costos de transporte y de preservación de la infraestructura que figuran en este trabajo se refieren a la corriente vehicular que realmente circula por las carreteras mexicanas según información de campo analizada por el Instituto Mexicano del Transporte y por la propia Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

La construcción y conservación de carreteras ocupa un lugar muy importante entre las preocupaciones de los responsables de la infraestructura nacional. Los usuarios ya no se conforman actualmente con disponer de vías de comunicación, sino que demandan que éstas les permitan desplazamientos rápidos, cómodos, económicos y seguros. El buen estado de la infraestructura carretera resulta vital para la eficiencia del transporte, el cual tiene una influencia preponderante en el estado general de la economía del país.

En lo referente a la construcción de carreteras nuevas, es posible que este trabajo tenga una utilidad, al permitir establecer criterios bien cuantificados sobre el cuál será la necesidad de conservación en función de las características estructurales y de rodamiento de la carretera que se proyecte. De esta manera, se tendrá un criterio que permitirá tomar en cuenta durante la etapa de proyecto las necesidades futuras de conservación. Siempre se ha dicho que un buen proyecto carretero debe contemplar estas necesidades, pero hay que reconocer que los criterios para tomarlas en cuenta en el momento de proyectar son sumamente débiles y de carácter muy general y no cuantitativo.

Esto se puede llevar a cabo mediante la creación de modelos de deterioro que nos indiquen cual va a ser el grado de deterioro y como podemos cuantificar nuestros recursos a través del tiempo y cuando es cuando se deben aplicar mejoras a nuestra carretera. Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten producir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento en su puesta en servicio o durante su funcionamiento, además permiten pronosticar los efectos a corto y largo plazo del mantenimiento efectuado en ellos, esto es una herramienta importante para generar alternativas de conservación, para lo cual es necesario implementar un modelo conceptual del mantenimiento carretero que permita racionalizar y sistematizar las acciones con la óptima aplicación de los recursos.

Los cálculos, representativos presentados en este trabajo son de situaciones reales, permiten afirmar que el gasto adicional por kilómetro, debido a la ausencia de una conservación eficaz (ausencia de conservación o conservación inadecuada), cubre con suficiencia los montos necesarios para mantener índices de servicio altos (rugosidades bajas), por períodos de tiempo razonablemente prolongados. En otras palabras, un supuesto ahorro aplicando acciones de conservación baratas, que no

atacan los problemas de raíz, pero que alcanzan para hacer algo en el mayor número de kilómetros, costaría varios millones de pesos al País, por el costo adicional de operación que significa para los usuarios recorrer caminos que rápidamente alcanzarían índices de servicio bajos (rugosidades altas). Es conveniente, en términos generales, por alto que sea su costo, rápidamente será recuperado por el País, al reducirse los costos de operación de los usuarios.

En términos y construcción iniciales, resulta también conveniente gastar más en la construcción de las carreteras para tener estructuras estables y pavimentos resistentes y con ello caminos más durables, con menos interrupciones al tránsito para su conservación y, por tanto, más seguros y acumulativamente más económicos para los usuarios y para el País en general, que gastar menos en la inversión inicial, buscando un ahorro fugaz y repercutiendo en altos costos de conservación a la dependencia responsable y de operación a los usuarios y, por ende, al País en su conjunto durante toda la vida útil del camino. Habrá casos, sin duda, en los que la conclusión no será favorable al realizar una mayor inversión inicial en la construcción o en conservación. La recuperación o justificación de esta, gracias a la reducción de costos de operación, puede variar en forma importante e incluso no darse en el periodo de vida útil de un camino. Ello dependerá, por su puesto, de las magnitudes del tránsito, de su composición de su crecimiento anual, de los ritmos del deterioro de los caminos y del tamaño de los montos de inversión implicados. Como se observa en el desarrollo de este trabajo la parte económica es muy importante al momento de hacer nuestra evaluación de la carretera en estudio, ya que dependiendo los recursos con los que se cuenten se podrán cubrir más rápido los distintos tipos de costos y esto podrá generar una mayor cantidad de beneficios. Es indispensable que existan mayores fuentes de financiamiento de inversiones, que puedan ayudar a generar la creación de más obras viales y de infraestructura en las carreteras nacionales.

## ANALISIS EN LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS

---

# Bibliografía

## Bibliografía

- 1) AASHTO, "**AASHTO Guide for Design of Pavemente Structures**" American Association of State Highway and Transportation, 1993.
- 2) Archondo-Callao, R., "**Vehicle Operating Costs Model, VOC**". Version 3.0, 1989.
- 3) Bennett, C.R. and Paterson, William D.O. "**Documentation of HDM-4, Version 1.0 International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM)**" United King, 2000.
- 4) Blank Laland T. "**Ingeniería Económica**" México, McGraw-Hill 1993.
- 5) Chester, Andrew y Harrison, Robert. "**Vehicle Operating Costs, Evidence from Developing Countries**" The Highway Design and Maintenance Standards Series. World Bank. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, EU, 1987
- 6) Cohen, Ernesto y otros, "**Evaluación de Proyectos Sociales**" México Siglo XXI Editores, 1996.
- 7) Durán G. Modelo VOCMEX, "**Traducción de Vehicle Operating Costs Model**". versión 3.0, Instituto Mexicano del transporte, Querétaro, México 1994.
- 8) E, Paul DeGarmo, "**Ingeniería Económica 10ª Edición**" Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 1997.
- 9) Héctor Bolívar Villagómez, "**Elementos para la Evaluación de Proyectos de Inversión**", Facultad de Ingeniería UNAM 2001.
- 10) Hernán de Solminihaç T. "**Administración de Infraestructura Vial**" Ediciones Textos Universitarios de la Universidad Católica de Chile 1998.
- 11) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Documento Técnico No. 3  
**Primera Fase**  
**"Sistema Mexicano para la Administración de los Pavimentos (SIMAP)"**  
Rico Rodríguez A, Rodolfo Téllez G., Juan M. Orozco y Alfredo Pérez G.
- 12) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Documento Técnico No. 4

**Manual Operativo de Campo**

**"Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos (SIMAP)"**

Rico Rodríguez A, Rodolfo Téllez G. y A. Mauricio Elizondo R.

- 13) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Documento Técnico 8  
**"Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas. Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras"**  
Mendoza Díaz A, Cadena Rodríguez A.
- 14) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Documento Técnico No. 15  
**Modulo Técnico**  
**"Sistema Mexicano para la Administración de Pavimentos (SIMAP versión 2.0)"**  
**Manual del Usuario**  
Rico Rodríguez A, Rodolfo Téllez G. y Juan M. Orozco.
- 15) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 20  
**"Elementos de proyecto y costos de operación en carreteras"**  
Aguerrebere Salido R, Cepeda Narváez F (1991).
- 16) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 21  
**"Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas"**  
Tellez G. Rodolfo México 1991.
- 17) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 30  
**"Estado superficial y costos de operación en carreteras"**  
Aguerrebere Salido R, Cepeda Narváez F 1991.
- 18) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 61  
**"Análisis económico del comportamiento de secciones estructurales de carreteras en diversas circunstancias"**  
Rico Rodríguez A, Mendoza Díaz A, Mayoral Grajeda E F, Durán Hernández G  
1995.
- 19) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 67

***“La respuesta dinámica de un cuarto de carro y el índice internacional de rugosidad”***

Romero Navarrete J A, Lozano Guzmán A (1995).

- 20) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 108  
***“Índice internacional de rugosidad, aplicación en la red carretera de México”***  
Arriaga Patiño M, Gamica Anguas P (1998).
- 21) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 111  
***“Diagnóstico de las características superficiales de los pavimentos”***  
Arriaga Patiño M, Gamica Anguas P (1998).
- 22) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 145  
***“Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la explotación de bancos de materiales y construcción de cortes y terraplenes”***  
TÜV Rheinland de México, S.A. de C.V. , Damián Hernández S A, Martínez Soto A, Aguirre Pérez J M, Téllez Gutiérrez R (2000).
- 23) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 164  
***“Aplicación del HDM-III a la red carretera federal del estado de Puebla”***  
Mendoza Díaz A, Campos Mirón J, Mayoral Grajeda E F (2001).
- 24) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 190  
***“Estudio de la distribución espacial del daño a pavimentos causado por vehículos pesados”***  
Romero Navarrete J A, Rakheja S, Lozano Guzmán A, Ahmed W, Martínez Madrid M (2002).
- 25) Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes  
Publicación Técnica No. 202  
***“Estado superficial y costos de operación en carreteras”***  
Arroyo Osorno J A, Aguerrebere Salido R (2002).
- 26) John A. White, ***“Técnicas de Análisis Económico en Ingeniería”***  
Editorial Limusa 1981.

- 27) LeBlank, P.A. y Woodrooffe, J.H.F. 1995 "**Spatial correlation ok dinamic wheel loads**" Proceedings of the fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. UMTRI Ann Arbor.
- 28) Michael W. Sayers. "**Two Quarter-Car models for defining road roughness: IRI and HRI**" Transportation Reseach Board 1989.
- 29) Miklos, Tomás y otros "**Planeación y prospectiva Una estrategia para el diseño futuro**" México, Noriega Limusa, 1991.
- 30) Núñez Jiménez, Enrique y Néstor Fernández Verti, "**Evaluación Financiera y Económica: Aplicación de Casos**", México Centro de Actualización Profesional (CICM) 1982.
- 31) Rico Alfonso., Del Castillo, H. "**La Ingeniería de Suelos en la Vías Terrestres**" Limusa, México 1982.
- 32) Sepúlveda José. "**Ingeniería Económica**", México, McGraw Hill- Schaum 1992.
- 33) Steiner George A. "**Planeación estratégica**" México, Continental 1983.
- 34) Taylor George A. "**Ingeniería Económica**" México Limusa 1977.
- 35) Thuesen. H. G. "**Ingeniería Económica**" México, Prentice Hall 1986.
- 36) Paterson William D.O. "**Road deterioration and Maintenance Effects, Models for Planning and Management**" The Highway Design and Maintenance Standards Series. World Bank. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, EU, 1987.
- 37) Paul H. Wright, "**Ingeniería de Carreteras**" Editorial Limusa 1993.
- 38) Watanatada T. et "**The Highway Design and Maintenance Standards Model**" World Bank. Transportation Department. Washington D.C. 1987.
- 39) Watanatada T. et al. "**The Highway Design and Maintenance Standards Model**". Volumen 1- Description of the HDM-III Model and Volumen 2 – User's Manual for the HDM-III Model. The World Bank. The John Hopkins University Press. London 1987.
- 40) Wong, J, Y. 1993. "**Theory of ground vehicles**". John Wiley and Sons. 2a Edition.

41) Yoder E, Witczak "*Principles of Pavement Design*"  
John Wiley&Sons, Inc. New York 1975.

#### Otras Fuentes

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT (portal en Internet)
- Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, AMIVT (portal en internet)