



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL
COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO
SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES
DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**

Mercy Beatriz Pérez Ramírez

Asesorado por la Inga. Corin Yohana Quintana Salazar

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL
COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO
SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE
CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MERCY BEATRIZ PÉREZ RAMÍREZ

ASESORADO POR LA INGA. CORIN YOHANA QUINTANA SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL


GUATEMALA, ENERO DE 2013

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL
COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO
SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE
CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 16 de abril de 2012.


Mercy Beatriz Pérez Ramírez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Giovanni Rudamán Miranda Castañón
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

Guatemala 27 de agosto de 2012

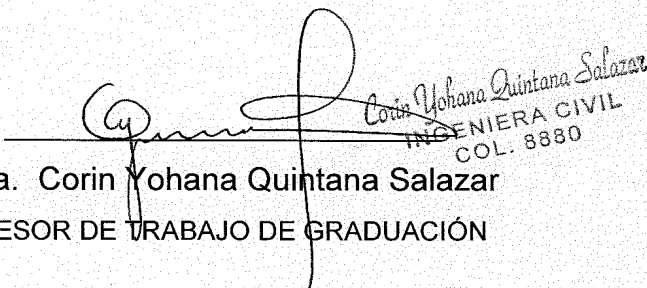
Ingeniero Mario Estuardo Arriola Ávila
Coordinador del Área de Topografía y Transportes
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por éste medio hago constar que he asesorado y revisado el trabajo de graduación de la estudiante universitaria Mercy Beatriz Pérez Ramírez, titulado: **ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO SACATEPEQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**

Para lo cual, después de la realización del análisis y las correcciones debidas, considero que cumple con los requisitos requeridos para su aprobación final.

Sin otro particular, me suscribo de usted, cordialmente.


Inga. Corin Yohana Quintana Salazar
ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
INGENIERA CIVIL
COL. 8880



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
12 de septiembre de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

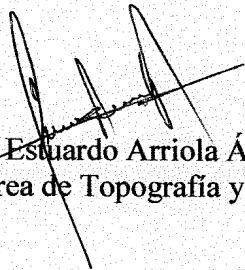
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL COMITANCILLO -SAN LORENZO - SANTA IRENE, SAN ANTONIO SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Mercy Beatriz Pérez Ramírez, quien contó con la asesoría de la Inga. Corin Yohana Quintana Salazar.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
Coordinador del Area de Topografía y Transportes




FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
TRANSPORTES
USAC

bbdeb.



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Corin Yohana Quintana Salazar y del Coordinador del Área de Topografía y Transportes, Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila al trabajo de graduación de la estudiante Mercy Beatriz Pérez Ramírez, titulado ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL COMITANCILLO - SAN LORENZO - SANTA IRENE, SAN ANTONIO SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM), da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero de 2013.

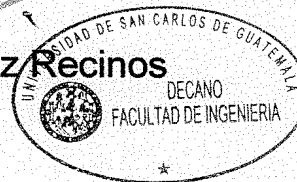
/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**, presentado por la estudiante universitaria **Mercy Beatriz Pérez Ramírez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 23 de enero de 2013

/cc

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROYECTO VIAL
COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE, SAN ANTONIO
SACATEPÉQUEZ, SAN MARCOS UTILIZANDO EL MODELO DE ESTANDARES DE
CONSERVACIÓN Y DISEÑO DE CARRETERAS (HDM)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 16 de abril de 2012.

Mercy Beatriz Pérez Ramírez

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser el amigo que nunca falla, quien ha estado en los momentos más felices y en los difíciles de mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado.
- Virgen santísima** Por interceder por mí ante tu hijo, iluminando mi camino. Gracias por tus bendiciones.
- Mis padres** Rubén Rodolfo Pérez Oliva y Rosa Aracely Ramírez Castro; por impulsarme a alcanzar mis metas y brindarme su apoyo incondicional en todo momento, gracias por todo.
- Mi abuela** María Magdalena Castro Corzo, por su amor incondicional y por todos aquellos consejos que me han brindado a lo largo de mi vida.
- Mis hermanos** Julyssa, Rubén, Julio y Pedro Pablo Pérez, por su cariño, paciencia, comprensión y por hacer mi vida más feliz con su compañía.

Mis familiares

En especial a mis abuelos Julia Oliva, Rubén Pérez y Rosario Ramírez (q.e.p.d.) por todas sus enseñanzas y cariño, a mis tíos por su apoyo. A mis primos por su amistad y amor fraternal.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Creador y arquitecto del mundo, luz, guía y esperanza en el andar de mi camino.
Mis queridos padres	Rubén Pérez y Rosa Ramírez por su amor, dedicación, esfuerzo y sacrificio para brindarme la educación; porque este triunfo es para ustedes.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme mi formación profesional.
Mi asesora de tesis	Ingeniera Corin Quintana, por su aprecio y valiosa colaboración, por darme las herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo.
Ingeniero Mario Arriola	Por el apoyo brindado en la revisión y finalización de este trabajo de graduación.
Los ingenieros	Gabriel Berditchevski y Rolando Gutiérrez, por su aprecio y valiosa colaboración.
Carlos Ignacio Barrientos	Por estar junto a mí día a día en los momentos más difíciles de nuestra carrera; gracias amor.

Mis compañeros de trabajo

Por su convivencia, amistad y cariño.

Mis amigos y amigas

Que de una u otra manera me impulsaron a salir adelante; brindándome apoyo, seguridad y confianza y por su amistad sincera.

A todas las personas que han confiado y creído en mí e hicieron esto posible, agradezco a Dios hayan estado en los momentos importantes de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. GESTIÓN DE LOS PAVIMENTOS	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Niveles de gestión de pavimentos	12
1.2.1. Descripción de los elementos a nivel de red.....	15
1.2.1.1. Inventario vial	16
1.2.1.2. Evaluación del estado de rodadura ...	18
1.2.1.3. Determinación de las necesidades de financiamiento	23
1.2.1.4. Priorización de secciones candidatas	24
1.2.1.5. Determinación de los efectos o impactos de las decisiones presupuestarias	27
1.2.1.6. Análisis económico	28
1.2.2. Descripción de los elementos a nivel de proyectos	29
1.3. Diseños nuevos	30
1.4. Tratamientos de mantenimiento, rehabilitación y	

	reconstrucción	34
1.4.1.	Elementos de costos a considerar en las opciones de mantenimiento, reconstrucción y rehabilitación	41
1.4.2.	Selección de la mejor estrategia	42
1.5.	Relación entre los elementos a nivel de red y nivel de proyecto.....	44
1.6.	Importancia de los sistemas de gestión de pavimentos.....	45
1.7.	Beneficios de la administración de pavimentos	46
2.	MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS.....	49
2.1.	Gestión del mantenimiento de los pavimentos	49
2.2.	Modelos de deterioro de los pavimentos	49
2.3.	Técnicas para el desarrollo de los modelos.....	51
2.3.1.	Extrapolación lineal	52
2.3.2.	Regresión	53
2.3.3.	Distribución de probabilidad	54
2.3.4.	Modelo de deterioro de pavimentos asfálticos (HDM)	54
2.4.	Calibración de los modelos de deterioro.....	56
3.	VISIÓN GENERAL DEL HDM	59
3.1.	Antecedentes de HDM.....	59
3.2.	Objetivos del desarrollo de HDM	61
3.3.	Marco analítico del HDM-4	63
3.3.1.	Concepto del análisis del ciclo de vida.....	64
3.4.	El papel del HDM en la gestión de carreteras	66
3.4.1.	Gestión de carreteras.....	66
3.4.1.1.	Planificación	66

	3.4.1.2.	Programación	68
	3.4.1.3.	Preparación	69
	3.4.1.4.	Operación	70
	3.4.2.	El ciclo de gestión.....	70
	3.4.3.	Funciones de la gestión.....	71
3.5.		Aplicaciones del HDM.....	73
	3.5.1.	Análisis de estrategias.....	75
	3.5.2.	Análisis del programa	78
	3.5.3.	Análisis del proyecto.....	80
3.6.		Necesidad de datos	81
	3.6.1.	Visión general.....	82
	3.6.2.	Configuración de HDM	82
	3.6.3.	Redes de carreteras	83
	3.6.4.	Parque de vehículos	84
	3.6.5.	Obras	84
4.		APLICACIÓN DEL HDM A UN PROYECTO DE CARRETERAS	87
	4.1.	Costo del sistema de transporte por carretera	87
	4.2.	Técnicas de conservación y mantenimiento de carreteras	89
	4.3.	Indicadores del comportamiento estructural del pavimento	94
	4.3.1.	Número estructural, deformación bajo carga	94
	4.3.2.	Irregularidad e índice internacional de Irregularidad (IRI).....	94
	4.4.	Creación de estándares de conservación	96
	4.5.	Elección del módulo HDM-4.....	97
	4.6.	Creación de las alternativas de conservación.....	97
	4.7.	Análisis de proyecto.....	98
	4.8.	Generación de informes.....	98
	4.9.	Resultados importantes a considerar.....	101

4.9.1.	Del deterioro y efectos de la carretera	101
4.9.2.	Flujo de costos	103
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE.....	105
5.1.	Antecedentes.....	105
5.2.	Descripción del proyecto Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene longitud 26,02 kilómetros	106
5.3.	Censo de tráfico.....	113
5.3.1.	Información de las estaciones de conteo	114
5.3.2.	Tipología de vehículos contabilizados	115
5.3.3.	Resumen del tráfico promedio diario	116
5.4.	Tasa de crecimiento del tráfico promedio diario	119
5.5.	Modelo computacional utilizado, HDM-4	120
5.6.	Metodología de evaluación económica.....	124
5.7.	Estándares y alternativas de conservación y mejora.....	124
5.8.	Costos de los proyectos	128
5.9.	Evaluación económica del proyecto	129
5.9.1.	Criterios básicos.....	129
5.9.2.	Beneficios económicos.....	130
5.10.	Costos económicos	137
5.10.1.	Ahorro en costos de operación de vehículos (COV)	137
5.10.2.	Costos de capital y recurrente.....	140
5.11.	Resumen técnico y económico del proyecto	142
5.11.1.	Pavimentación con Doble Tratamiento Superficial (DTS)	142
5.11.2.	Concreto Asfáltico (CA).....	144
5.12.	Resultados del análisis económico.....	146

5.12.1.	Rentabilidad del proyecto	146
5.13.	Análisis de sensibilidad	149
5.13.1.	Valores sensibles.....	150
5.14.	Sensibilidad al tráfico	151
5.15.	Resumen del proyecto y análisis de resultados	154
CONCLUSIONES		163
RECOMENDACIONES		165
BIBLIOGRAFÍA		167
APÉNDICE.....		169

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efectos del tratamiento oportuno sobre los gastos de recuperación sobre inversiones en redes de carreteras.....	7
2.	Curva de deterioro del pavimento.....	9
3.	Guía para rehabilitación y mantenimiento.....	11
4.	Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro.....	51
5.	Extrapolación lineal.....	53
6.	Efecto del estado de la carretera en los costos de operación del vehículo.....	65
7.	Ciclo de gestión de carreteras.....	72
8.	Costos del sistema de transporte por carretera.....	88
9.	Carretera de terracería Santa Irene – San Lorenzo.....	111
10.	Carretera de terracería San Lorenzo - Comitancillo.....	112
11.	Carretera de terracería Santa Irene – Río Blanco.....	113
12.	Estación de conteo.....	114
13.	Tráfico promedio diario.....	117
14.	Tipo de vehículos por proyecto.....	118
15.	Proyección del tráfico promedio diario.....	120
16.	TM Costos de operación de vehículos.....	131
17.	Clase de caminos por superficie y condición.....	133
18.	TM Costos del tiempo de viaje.....	135
19.	Rugosidad (IRI).....	139
20.	Programa de inversión departamento de San Marcos – indicadores económicos del Doble Tratamiento Superficial.....	148

21.	Programa de inversión departamento de San Marcos – indicadores económicos de Concreto Asfáltico	148
22.	Escenarios de la tasa de crecimiento vehicular.....	152
23.	Características del proyecto	154

TABLAS

I.	Componentes del inventario físico vial	17
II.	Tipos de deterioros en pavimentos asfálticos	36
III.	Tipos de técnicas de mantenimiento, reconstrucción y rehabilitación en pavimentos asfálticos	36
IV.	Tipos de deterioros y sus causas probables.....	37
V.	Funciones de gestión y las aplicaciones HDM-4 correspondientes	73
VI.	Características del proyecto	109
VII.	Velocidad de diseño, según tipo de sección	110
VIII.	Distribución porcentual del TPD	116
IX.	Proyección del TPD – Proyecto: Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene	119
X.	Características de los proyectos.....	123
XI.	Costos de los proyectos	128
XII.	Características y costos económicos por vehículo	132
XIII.	COV & costo de tiempo de viaje (M US\$).....	138
XIV.	Costo de capital y recurrente (M US\$).....	141
XV.	Evaluación económica para DTS.....	144
XVI.	Evaluación económica para CA.....	145
XVII.	Comparación y rentabilidad del proyecto.....	147
XVIII.	Resultados de análisis económico.....	149

XIX.	Switching Values Multipliers (valores límites para los costos son iguales a los beneficios).....	150
XX.	Indicadores económicos para el proyecto Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene.....	151
XXI.	Comparación por medio de VPN y TIR utilizando Doble Tratamiento Superficial y Concreto Asfáltico	153
XXII.	Resumen de los indicadores económicos por tipo de alternativa (Doble Tratamiento Superficial)	159
XXIII.	Resumen de los indicadores económicos por tipo de alternativa (carpeta de Concreto Asfáltico).....	159

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Beneficio
C	Costos
CA	Concreto Asfáltico
FC	Factor de cuantificación del ahorro en los costos del usuario
h	Hora
Km	Kilómetro
M	Millones
m	Metro

GLOSARIO

AASHTO	Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials).
Agencias de carreteras	Instituciones Guatemaltecas encargadas de conservar, mejorar o construir carreteras. Entre ellas las instituciones del estado, iniciativa privada y municipalidades.
ASTM	Organización científica y técnica para el establecimiento y la difusión de normas relativas a las características y prestaciones de materiales, productos, sistemas y servicios. (International develops international standards for materials, products, systems and services used in construction, manufacturing and transportation).
Bacheo en carreteras	Sustitución de las diferentes capas incluyendo el pavimento que conforman la estructura de la carretera, en las zonas inestables bajo la estructura del pavimento.

Base	Es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura.
CCCS	Calificación compuesta de condición superficial.
Clasificación Funcional	Clasificación que se le da a una red de carreteras con relación descendente al nivel de servicios que presta a los usuarios.
Conservación periódica	Mantenimiento que previene el deterioro de la superficie de rodadura de una carretera.
Conservación Rutinaria	Mantenimiento destinado a la limpieza del derecho de vía y estructuras de drenaje de una carretera.
Costo operacional vehicular	Costos del vehículo que representa un significativo gasto para el automotor y sus pasajeros.
COV	Costos de operación vehicular.
COVIAL	Unidad Ejecutora de Conservación Vial.
DGC	Dirección General de Caminos.

Doble Tratamiento Superficial	Doble capa de revestimiento formada por riegos sucesivos y alternados con material bituminoso y agregados pétreos triturados de tamaño uniforme, que mediante el proceso de compactación son acomodados y orientados en su posición más densa.
DTS	Doble tratamiento superficial.
Ejes equivalentes	Cargas equivalentes de ejes sencillos estándar de 8,2 toneladas.
Gestión vial	Manejo de los elementos de la infraestructura vial a través de un conjunto complementario de actividades que permiten un comportamiento armónico de la estructura.
Hombro	Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.
HDM	Software Modelo de estándares de conservación de carreteras (Highway Design and Maintenance Standards Model).
IEP	Índice del estado del pavimento.

Implementación	Construcción de vías de acuerdo a lo diseñado y planeado. Ajustes en el proceso. Ejecución del programa de mantenimiento, rehabilitación y reposición.
Infraestructura vial	Conjunto de elementos que permiten el desplazamiento entre vehículos en forma confortable y segura: pavimento, puentes, túneles, dispositivos de seguridad, señalización, etcétera.
Inventario vial	Conjunto de datos que determinan las características físicas de un tramo de carretera.
IRI	Índice de rugosidad internacional.
LCPC	Laboratorio Central Francés de Puentes y Carreteras (<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>).
Mejoramiento	Ejecución de las actividades necesarias para dotar a una carretera existente de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor nivel de servicio.

MIT	Instituto Tecnológico de Massachussets (<i>Massachusetts Institute of Technology</i>).
Planeamiento	Adopción de una estrategia de gestión de pavimentos, metas y programación, organización, diseño y asignación de recursos.
Pavimento	Estructura integral de las diferentes capas colocadas sobre la subrasante, destinadas a soportar las cargas vehiculares.
RD	Deterioro de la carretera (road deterioration).
Rugosidad	Es la desviación vertical del perfil de un pavimento y su cuantificación es por medio del Índice de Rugosidad Internacional IRI.
SGP	Sistema de Gestión de Pavimentos.
Superficie de rodadura	La parte superior de un pavimento, por lo general de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.
Sección transversal	Vista vertical a través de la carretera perpendicular a la línea central.
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana.

Subbase	Capa granular localizada entre la base y la subrasante seleccionada cuidadosamente para transmitir las cargas provenientes de la base a la subrasante.
Supuestos presupuestarios Sistema	Presupuestos preparados con un margen de variación. Modelo de ordenamiento que se aplica en una determinada organización y que opera en un entorno cambiante (Kováčević, 1990).
TIR	Tasa Interna de Retorno.
TM	Tránsito motorizado.
TNM	Tráfico no motorizado.
TPD	Tránsito promedio diario.
TPDA	Tráfico promedio diario.
TRRL	Laboratorio de Transporte e Investigación de Carreteras de Gran Bretaña (Transport and Road Research Laboratory).
VAN	Valor Actual Neto.

Viga Venkelman	Ensayo no destructivo que se realiza para determinar las deflexiones sobre una superficie de pavimento.
Verificación	Contraste entre lo planeado y lo ejecutado. Verificación y pronóstico.
VPN	Valor Presente Neto.

RESUMEN

En los tiempos actuales, actividades como el transporte de insumos y productos, el traslado de las personas y el acceso a servicios son fundamentales para el desarrollo de las sociedades. Para que estas acciones puedan desenvolverse adecuadamente, es necesario que los caminos que componen las redes viales presenten un apropiado nivel de serviciabilidad. En otras palabras, las vías deben ser seguras y confortables. Para poseer estas características, no sólo es necesario desarrollar buenos diseños y procesos constructivos, sino también, implementar eficaces planes de mantención y conservación, que permitan retardar el deterioro de los caminos y prolongar sus vidas útiles.

Los costos de mantención de las redes viales son sumamente altos y, lo que es peor, aumentan con el tiempo debido a que estas se encuentran en una constante expansión. Por otro lado, los recursos destinados para estos efectos son escasos, especialmente, en los países en vías de desarrollo como Guatemala; por ello, se hace indispensable que las autoridades posean un sistema de gestión vial eficiente que administre los recursos disponibles de tal manera que las redes viales puedan satisfacer lo mejor posible los requerimientos de sus usuarios.

La elección de estrategias de mantención de pavimentos comúnmente se basa en determinar la periodicidad de la implementación de los tratamientos, por ejemplo, cada cierta cantidad de años o tantos kilómetros por año o en la intervención de los pavimentos en el momento en que la predicción del estado de ellos ha adquirido una condición límite establecida, como ejemplo, cierto nivel de área agrietada; los tratamientos de mantención son diversos, así como, el momento en que es pertinente su implementación y el efecto que producen en la condición de los pavimentos.

Los Sistemas de Gestión de pavimentos tienen como finalidad ayudar a elaborar programas de conservación de carreteras, justificar con eficiencia técnica y financiera nuevos proyectos que distribuyan las tareas que más convenga realizar, para optimizar los recursos limitados y disponibles, a partir de una base de datos obtenida del estado de la rodadura de la carretera, de un inventario vial, de los datos del tránsito y de factores climáticos de la región.

Existe comercialmente gran cantidad de estos sistemas, compuestos por manuales, formatos, programas de cómputo, etcétera.

Los sistemas empleados comúnmente en los países de América Latina son: Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM-III) y (HDM4) o Modelos de estándares de conservación de carreteras, elaborados por el Banco Mundial.

Como la mayoría de los sistemas de administración de pavimentos, el HDM-III y HDM4 parte de una base de registros o inventarios referentes a las características importantes del estado físico actual de los distintos componentes de la red de carreteras, así como, de sus solicitudes a futuro (expectativas de tránsito).

La importancia en estos modelos de gestión, radica, en que son una herramienta poderosa para la toma de decisiones a las posibles alternativas de inversión sobre los proyectos de carreteras gestionados, dando variables justificables como un análisis económico incluyendo factores de Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VAN) y el Valor Presente Neto (VPN).

Este estudio muestra como el software Modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras (HDM, siglas en inglés), se relaciona de manera directa con la aplicación y manejo de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP).

Mucha de la información fue extraída de estudios realizados en México, Perú, Chile y Colombia, además de manuales propios del HDM, los cuales en conjunto expresan la operación de un sistema de gestión de pavimentos y como el HDM es utilizado para facilitar el manejo de datos, para proporcionar estrategias de conservación y mejoramiento de un tramo o una red de carreteras, a partir de una evaluación económica.

El objetivo principal es dar a conocer el HDM, para empezar a crear una base de información respecto al tema, debido a que en Guatemala se conoce muy poco sobre gestión de pavimentos, por lo que se muestra cómo se aplica a un proyecto de carreteras para determinar la viabilidad de la inversión.

Durante el desarrollo de los capítulos, el estudio presenta los principios básicos de la administración de pavimentos, de cómo nace el HDM a partir de modelos de deterioro de pavimento existentes, además de una visión general del HDM para su aplicación a un proyecto de carreteras. Por último, la evaluación técnica y económica que ayuda en la toma de decisiones de una institución gestora de pavimentos.

OBJETIVOS

General

El objetivo principal es dar a conocer el HDM, para empezar a crear una base de información respecto al tema, debido a que en Guatemala se conoce muy poco sobre gestión de pavimentos; por lo que se muestra cómo se aplica a un proyecto de carreteras para determinar la viabilidad de la inversión.

Estableciendo mediante el estudio un modelo único de gestión de pavimentos, utilizando esta herramienta para justificar cada vez mayores presupuestos de conservación y mejoramiento de carreteras.

Derivado de esto, optimizar los beneficios económicos de usuarios de carreteras pavimentadas bajo diferentes niveles de gasto. Para predecir las necesidades a medio y largo plazo de un proyecto de carreteras pavimentadas.

Específicos

1. Analizar cómo se relacionan los sistemas de gestión de pavimentos con el modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras HDM.
2. Analizar los modelos de deterioro de pavimento con el desarrollo del HDM, presentando un enfoque básico del HDM, de dónde nace, cómo se desarrolla y las aplicaciones a redes de carreteras.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social de un país; constituyen la principal forma de comunicación; propician la creación de cadenas productivas generadas por el tráfico de mercancías e impulsan el comercio y la producción industrial.

En Guatemala se han venido realizando importantes esfuerzos destinados al mejoramiento de la red vial rural. La importancia de estas iniciativas radica en la mitigación de los efectos negativos que el mal estado de la infraestructura vial ocasiona en la prestación de los servicios de transporte, sobretodo en pérdidas en la producción agrícola local y en el acceso a los servicios básicos de salud y educación.

Cabe mencionar que Guatemala cuenta con una gran población rural (aproximadamente 50%) y que en las zonas que son atendidas por esta red vial rural, habita la mayor parte de la población que se ubica bajo la línea de pobreza y pobreza extrema.

Esta población, se enfrenta constantemente a obstáculos para el desarrollo expresados por bajos ingresos, la dificultad de movilizarse, la falta de acceso a servicios educativos, de salud, de abasto de alimentos, agua, energía e insumos agrícolas y artesanales, así como, la ausencia de comercialización de excedentes de la producción local.

Las carreteras rurales, en general son mantenidas por las comunidades, las cuales cuentan con fondos insuficientes para darles el adecuado tratamiento, obligando a actuaciones de emergencia que solucionan los problemas en el plazo inmediato pero no atienden las necesidades del mediano y largo plazo. Algunas, son mantenidas por COVIAL a través de programas de reballastado, dependiendo el éxito de los mismos al grado de precipitación pluvial que suceda el año del mantenimiento. Sin embargo, esta última opción no es siempre sostenible en todos los tramos, ni cuenta a veces con los recursos suficientes para el mantenimiento del tramo a lo largo del año (las lluvias ocurren en la segunda mitad del año por lo que en general los recursos se agotan en la primera mitad).

Es por ello, que todo análisis de inversión debe conjugar varios parámetros dentro de un marco que contemple aspectos técnicos (que incluyan experiencias pagadas, económicas, sociales y políticas para configurar proyectos considerando alternativas de construcción y mejoramiento que sean realistas con su entorno.

Los SGP constituyen una de las funciones más importantes para las organizaciones que tienen a su cargo el desarrollo y la preservación de infraestructura vial.

En el presente trabajo de graduación, se muestra cómo el software modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras (HDM, siglas en inglés), se relaciona de manera directa con la aplicación y manejo de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP).

1. GESTIÓN DE LOS PAVIMENTOS

1.1. Generalidades

Al hablar de gestión de la conservación de pavimentos, se hace referencia a la administración eficiente de los recursos necesarios para mantener los pavimentos en buen estado; es una verdadera disciplina que se ha venido perfeccionando con el paso de los años.

“Los sistemas de gestión de pavimentos, de aquí en adelante (SGP) involucran distintas actividades que ayudan a la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de carreteras”.¹

“En términos generales, los sistemas de gestión de pavimentos son conjuntos de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones operadoras de carreteras en la aplicación sistemática de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas técnica y económicamente óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazos, así como, la formulación de programas de mantenimiento anuales y/o multianuales”.²

¹ AASHTO AASHTO Guidelines for Pavement Management System, American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington D.C. 2000. p. 28.

² HDM - 4 Highway Development and Management, Versión 1. World Road Association, 2000. p. 33.

El término gestión de pavimentos se usa para describir la administración de redes de carreteras, con superficies pavimentadas y no pavimentadas.

“Desde un punto de vista amplio, la administración de pavimentos cubre todas las fases de la planeación, programación, análisis, diseño, construcción e investigación de los pavimentos. Puede llegar a considerar tanto las necesidades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción de pavimentos existentes, como las necesidades de áreas adicionales de pavimento para aumentar la capacidad vial.

Estos sistemas generalmente no incluyen el mantenimiento rutinario (limpieza y reparación de taludes, señales, etcétera), el cual suele enfrentarse a través de un presupuesto anual fijo reducido, que no requiere de un sistema o estrategia de gestión.

Por medio de la Norma ASTM E1166 – 00, el manejo de un sistema de gestión de pavimentos integra los siguientes componentes:

- Ubicación geográfica: se refiere a un método único y estable para la identificación y referencia espacial de los tramos que constituyen la red de carreteras, así como, de la información sobre las características y el estado físico de los mismos.

Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamiento y las coordenadas geográficas, este último utilizado en Guatemala por medio de GPS.

- Datos de campo utilizables por el sistema:
 - Inventario vial: comprende la clasificación funcional, longitud, número de carriles, ancho de carril y acotamientos, pendiente y curvatura de cada uno de los tramos, diseño estructural de la sección, incluyendo espesores y propiedades de los materiales de las capas constitutivas (subrasante, subbase y base), así como, características del drenaje e historial de reparaciones.
 - Estado del pavimento: las condiciones de la superficie son generalmente evaluadas mediante inspección de campo; expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodamiento (IRI), presencia y magnitud de deterioros, deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento, espesores y propiedades reales de las capas de rodadura; resistencia al deslizamiento, textura y estado del drenaje.
 - Características del tránsito: volumen, composición vehicular y cargas por tipo de vehículo.
 - Datos climatológicos: entre los cuales pueden mencionarse precipitación, humedad, promedios de temperatura y rangos de variación de la misma.

- Costos: incluyendo, por una parte, los costos de construcción, mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos y por otra, los costos relacionados con el uso de la infraestructura por parte de los usuarios, es decir, costos de operación vehicular COV, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros, la demora de mercancías y costos de accidentes.

- Manejador de bases de datos: dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los SGP puede llegar a tener una magnitud considerable, por lo que en la mayoría de los casos, implica el uso de un manejador de bases de datos y de procedimientos computarizados para el almacenamiento, consulta y análisis de la información (HDM u otros sistemas).

- Herramientas de análisis: se refieren a un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan como apoyo para las siguientes tareas:
 - Predicción del deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil y estimación de los efectos de las acciones de conservación.

 - Evaluación económica de proyectos de conservación y mejoramiento para tramos específicos, así como, de políticas aplicables a toda la red o a partes de ella. Para este propósito se utilizan métodos como el análisis beneficio/costos, Tasa Interna de Retorno y Valor Actual Neto.

- Definición de prioridades con respecto a los requerimientos de conservación y mejoramiento de la red, a través del análisis de proyectos candidatos y la programación de los trabajos.”³

De acuerdo con la Norma ASTM E 1166 – 00, se requiere un estudio previo para la puesta en operación de un sistema de gestión de pavimentos, en el que se evalúe su compatibilidad con otros procesos institucionales existentes; su utilidad real en la planeación y programación de los trabajos de conservación y desarrollo de la red; y su aceptación por parte de los responsables de la gestión de los pavimentos al interior de la organización operadora.

En consecuencia, se requiere de un plan organizado en el que se definan el equipo y programas de cómputo; equipo de medición; personal y estructura organizacional necesarios para la operación del sistema, así como, un programa para su implantación por etapas.

El plan debe incluir también, procedimientos para la recopilación, ingreso, validación y actualización de información, generación de informes y la revisión, calibración y mejoramiento de los modelos del sistema.

Como resultado de la recopilación de datos, el manejo y análisis de los mismos depende de la habilidad suficiente para aprovechar tan importante información, por lo que se crean los SGP.

³ ASTM American Society for Testing and Materials, Standard Guide for Network Level Pavement Management (Norma ASTM E 1166 – 00). En Annual Book of ASTM Standards 2003. Sección 4. p.43.

El modelo tradicional para la gestión de pavimentos, hoy se reestructura por medio de iniciativas nuevas que han desembocado en programas sistemáticos. Dichos programas están bajo revisión constantemente y se actualizan vía la adquisición de experiencia e información cuantitativa del desempeño de los pavimentos. Actualmente, se utiliza y se impulsa en Guatemala por medio de la Dirección General de Caminos y COVIAL el HDM, al que se hace referencia en el presente trabajo.

“El modelo HDM es una herramienta de apoyo a la gestión de carreteras y caminos que permite a través de un software la evaluación de alternativas relacionadas con la inversión en proyectos de carreteras y caminos; evaluación que puede ser técnica o económica.

El marco analítico de HDM se basa en el concepto del análisis del ciclo de vida de un camino; es decir, HDM simula las condiciones del camino durante el ciclo de vida y los costos asociados a tales condiciones (básicamente costos de construcción, conservación y usuarios) para un período de análisis dentro de un escenario de circunstancias especificado por el usuario del software, este período suele ser de 15 a 30 años”.⁴

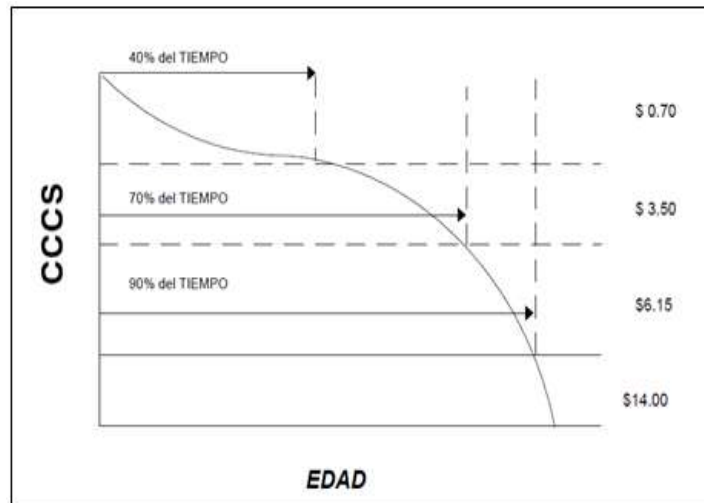
Todas las superficies de los caminos se deterioran con el tiempo debido al tránsito y al ambiente; la figura 1 muestra la tasa promedio de deterioro y el cambio de los costos de reparación a medida que el pavimento se deteriora.

⁴ Análisis de Inversiones en Carreteras Utilizando Software HDM-Revista de la Construcción, vol. 6, núm. 1, p. 45.

Es evidente que el costo total será menor si el pavimento se repara oportunamente. La figura también indica que el costo será menor para la entidad administradora que proporciona el mantenimiento.

El término CCCS (Calificación Compuesta de Condición Superficial) es una medida o índice de la condición de un pavimento (sus valores altos representan una condición mejor que sus valores bajos).

Figura 1. **Efectos del tratamiento oportuno sobre los gastos de recuperación sobre inversiones en redes de carreteras**



Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, Aplicación del HDM-III a la red carretera federal del estado de Puebla. p. 5.

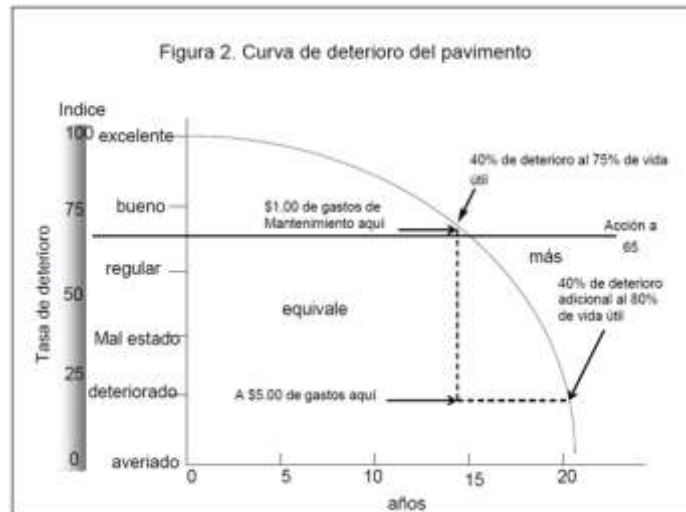
La conservación de pavimentos, son todas las actividades orientadas a brindar y mantener carreteras usando tratamientos, de preferencia de bajo costo, para retardar el deterioro del pavimento. Extiende la vida útil del pavimento mejorando su desempeño y reduciendo las molestias para los usuarios.

Un tratamiento hecho a tiempo es crítico para asegurar un buen desempeño de los pavimentos. La conservación de pavimentos le ofrece a las organizaciones gubernamentales una manera efectiva de extender sus presupuestos y proteger a largo plazo la infraestructura vial.

Actualmente, existe un procedimiento para medir el índice del estado del pavimento (IEP) que se describe en la Norma ASTM D 5340. El IEP es una cuantificación numérica que refleja el estado de los pavimentos. Clasifica el pavimento de acuerdo al grado y la severidad de los tipos de daños presentes. La escala numérica es del 0 al 100, en la cual el 0 equivale a la peor condición y 100 a la mejor condición del pavimento.

La figura 2 representa una curva típica de la tasa de deterioro del pavimento. Se observa que 40% de deterioro ocurre al 75% de vida útil del pavimento. Se sugiere que en este punto se debe tomar la decisión de aplicar la acción preventiva, de no haberse hecho antes. Cada entidad gubernamental debe decidir cuándo activa el dispositivo de mantenimiento preventivo, diferir esta acción dará como resultado la necesidad de rehabilitar o reconstruir el pavimento y esto es mucho más costoso.

Figura 2. Curva de deterioro del pavimento



Fuente: DELMAR, Salomón. Conservación de Pavimentos: Conservando la inversión del patrimonio vial. p. 3.

Los SGP que utilizan el HDM pueden evaluar varias estrategias, usan los efectos esperados de las medidas de mantenimiento y rehabilitación sobre el comportamiento futuro de la superficie de los caminos para identificar aquellas secciones que necesiten un tratamiento, así como, la combinación de medidas preventivas que proporcionen una condición global deseada, considerando las restricciones impuestas, pudiendo ser estas sociales, económicas o políticas.

Herramientas como el HDM se consideran un asistente técnico para la toma de decisiones para los proyectos de carreteras, el financiamiento, las oportunidades de desarrollo y los intereses político-sociales.

Los sistemas como HDM hacen que la persona responsable de las decisiones de la unidad administradora de pavimentos tomen decisiones de relevancia económica en lo que se refiere al mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.

El personal de una organización es el que administra los pavimentos y el que toma las decisiones. Los programas de computadora como el HDM solamente asisten en la administración de la información y apoyan a la toma de decisiones; además proveen los instrumentos para organizar una cantidad enorme de datos que se desarrollan en una red de carretera, lo cual hace fácil el manejo de la información de una manera ordenada y definida por grupos separativos de calidad e importancia de información.

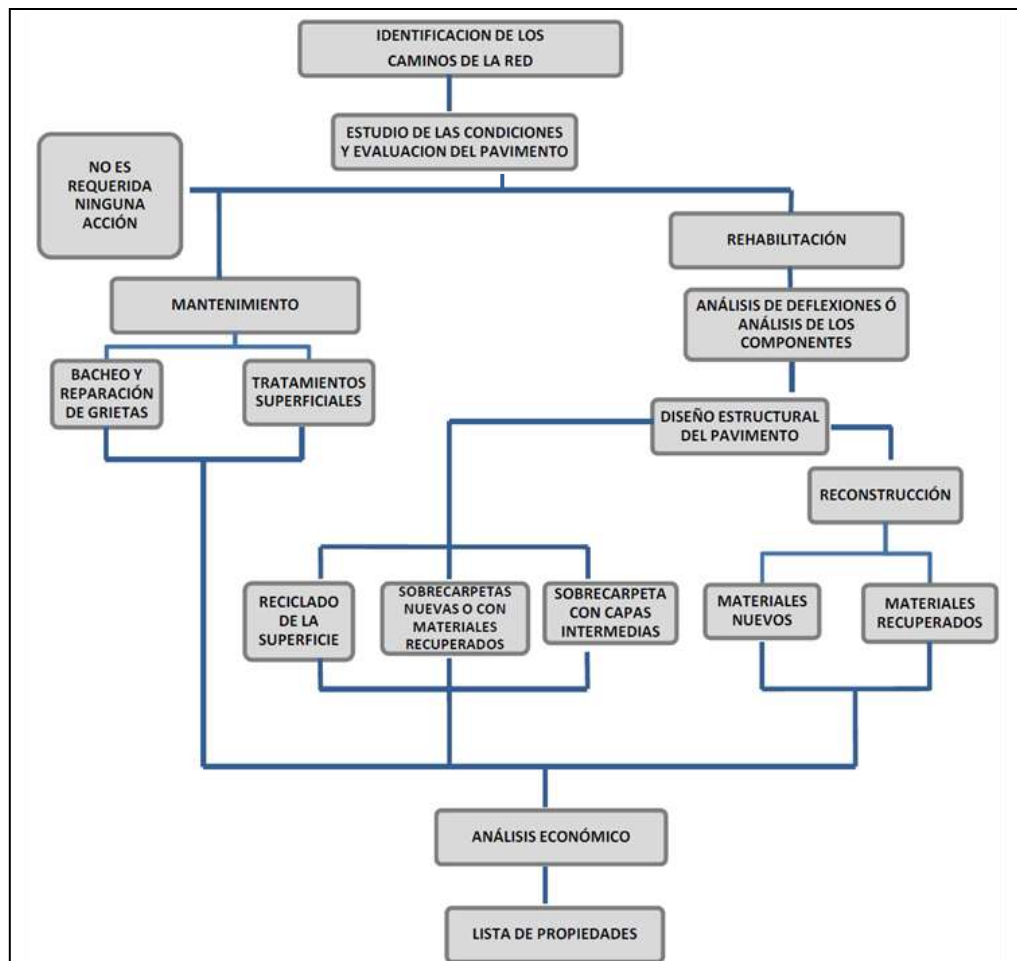
La selección de la técnica o combinación de técnicas de mantenimiento y rehabilitación debe basarse en un análisis de ingeniería y un análisis económico. Con el fin de lograr la optimización de los recursos disponibles deberá hacerse una comparación de alternativas de inversión, con información suficiente para una buena toma de decisiones.

En la figura 3 se muestra una guía sencilla para la toma de decisiones en mantenimiento o rehabilitación de pavimentos; se puede disponer de muchos sistemas de planeación aún más sofisticados, pero este esquema puede resultar práctico para la toma de decisiones de un mantenimiento o rehabilitación.

El entendimiento claro de las limitaciones y la utilización adecuada de las técnicas de mantenimiento hará más efectiva la utilización de los recursos; recordando, que el postergar las acciones de mantenimiento se traducirán en aumento del costo.

La capacidad de predicción de un sistema de administración de pavimentos permite predecir los efectos de un presupuesto reducido y estimar el costo para regresar la red de carretera a su nivel de servicio especificado. Con un sistema de gestión de pavimentos se puede seleccionar un programa, el cual hará que la red se encuentre dentro de los criterios especificados, de tal modo que minimizando los costos se obtengan los máximos beneficios.

Figura 3. **Guía para rehabilitación y mantenimiento**



Fuente: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7301/Capitulo1.pdf>. Administración de los pavimentos. Consulta: abril de 2012.

1.2. Niveles de gestión de pavimentos

La gestión de pavimentos generalmente se desarrolla a dos niveles, a nivel de red y a nivel de proyecto.

El nivel de red es una visión global de la infraestructura de pavimentos y se encamina fundamentalmente hacia asuntos relacionados con la planeación y presupuesto. Sus resultados brindan soporte a decisiones de tipo técnico, administrativo y legislativo (aprobación de préstamos, aprobación del presupuesto de la nación).

Las diferencias entre el nivel de red y el de proyectos se extienden más allá del nivel en el cual se toman las decisiones e incluyen diferencias en la cantidad y el tipo de datos que se requieren.

El propósito de un SGP es establecer los requerimientos de presupuesto, programación y acciones de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción. Para lo cual se requiere:

- Información concerniente a la actual condición de la red
- Políticas de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción establecidas
- Estimación del presupuesto disponible
- Prioridades de la red (criterios económicos y sociales que deben privar)
- Producto del análisis a nivel de red
- Necesidades de fondos
- Pronóstico de futuras condiciones

La recolección de datos es costosa y a menudo no se sabe con exactitud qué tipo, ni qué cantidad de ellos serán requeridos, hasta que parte de los datos hayan sido recolectados.

Para evitar este problema, a nivel de red normalmente se recolecta una cantidad mínima de datos, se entiende por una red completa de carreteras, la red vial primaria pavimentada de Guatemala en las que se incluyen las rutas Centroamericanas CA, algunas rutas departamentales RD y rutas nacionales RN.

Esto permite que el SGP sea implementado con un monto de inversión inicial, bajo la recopilación de datos; sin embargo, los datos recopilados a nivel de red no son los más adecuados para tomar la mayoría de las decisiones a nivel de proyecto, debido a que consideran una pequeña cantidad de datos de forma generalizada.

Se deben recolectar más datos de las secciones de pavimento individuales identificadas como candidatas prioritarias para construcción, mantenimiento o rehabilitación por el análisis a nivel de red (es decir, a nivel de proyecto se requiere la información de detalle necesaria para el diseño de las medidas más adecuadas, pero sólo para las secciones candidatas prioritarias).

El propósito del proceso de gestión a nivel de red se relaciona con el proceso presupuestario, para identificar las necesidades de trabajo de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, la selección de secciones a repararse o mantener y la determinación de los efectos de las opciones sobre el comportamiento del sistema de todos los pavimentos de la red y sobre el bienestar global de la comunidad.

La parte que trata de la selección de secciones a financiarse en determinados períodos se denomina como selección y programación de proyectos.

Los resultados principales de los análisis a nivel de red incluyen las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, las necesidades de financiamiento y un listado priorizado de las secciones o tramos candidatos que necesitan reparación con un pronóstico de las condiciones futuras de la red para varias opciones de financiamiento; mientras que a nivel de proyecto, el propósito es determinar la estrategia más económica de diseño inicial, así como, de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción durante el período de vida de una sección de pavimento seleccionada, dado el financiamiento disponible.

Los resultados principales de la gestión de pavimentos a nivel de proyecto incluyen una evaluación de las causas del deterioro, identificación de las estrategias posibles de diseño, mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción y la selección de la estrategia más económica a seguir durante el período de vida de la sección, dadas las restricciones impuestas.

A nivel de proyecto se consideran sólo los tramos carreteros con mayor urgencia de actuación determinándose para ellos las medidas definitivas a aplicar.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto básicamente consiste en los análisis y diseños de ingeniería que se requieren para desarrollar la estrategia más efectiva (de mayor factibilidad económica) de diseño, mantenimiento o rehabilitación para una sección específica de pavimento.

El tamaño del proyecto y la importancia de la vía para la agencia de carreteras determinan la cantidad de tiempo y fondos a gastarse en la evaluación a nivel de proyecto.

Los pavimentos sobre vías principales con alto tránsito deben sujetarse a una mejor evaluación que aquéllos sobre caminos o vías de bajo tránsito.

Todos los conceptos y los procedimientos de evaluación descritos son válidos para cualquier calle o carretera, independientemente del volumen de tránsito. Lo único que varía es la cantidad de pruebas a realizar y el tiempo que se dedique para arribar a conclusiones.

1.2.1. Descripción de los elementos a nivel de red

Esta sección trata principalmente de los elementos a nivel de red; en ella se proporciona una descripción breve de un SGP a nivel de red. Como se explicó al principio del capítulo los elementos básicos de un SGP a nivel de red son:

- Inventario vial
- Evaluación del estado de rodadura
- Determinación de las necesidades de financiamiento
- Identificación de proyectos candidatos a financiar

- Método para determinar el impacto o los efectos de las decisiones de financiamiento sobre las condiciones futuras y el financiamiento futuro
- Proceso de retroalimentación

1.2.1.1. Inventario vial

El inventario vial es un proceso que permite conocer los caminos que componen la red vial de una determinada área, asimismo, los componentes y el estado de conservación de los mismos.

El inventario proporciona información básica sobre la ubicación y la conectividad de cada sección de gestión dentro de la red.

Se usan dos conceptos generales para dividir la red en secciones de gestión. En el primero, la red se divide en tramos de un largo uniforme, en el segundo concepto, se definen secciones de gestión que serán tratadas por el administrador como unidades completas y a las cuales normalmente se les aplicará el mismo tratamiento de mantenimiento, un bacheo rutinario, sello de grietas, etcétera.

Cualquiera de los dos conceptos puede ser utilizado y ambos tienen ventajas y desventajas. Cada tipo de datos requiere de tiempo, esfuerzo y dinero para recolectarse, guardarse, extraerse y usarse.

Los elementos que generalmente se requieren para cada sección de administración incluyen: identificación, ubicación, número de carriles de tránsito, clasificación funcional, área, tipo de superficie, niveles de tránsito y fecha en la cual la superficie existente fue construida.

Otros datos que pudieran ser útiles son: información sobre el drenaje, información de los carriles de estacionamiento e información sobre la geografía y el ambiente.

En Guatemala la Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL), a través de las supervisoras hace un inventario vial, como parte del desarrollo de su SGP, año con año requiere de la información de campo para construir el inventario físico vial.

Tabla I. **Componentes del inventario físico vial**

No.	DESCRIPCIÓN
1	Ubicación de basureros clandestinos
2	Ubicación de bancos de préstamo
3	Bordillos longitudinales
4	Bóvedas y alcantarillas
5	Defensas metálicas
6	Drenaje longitudinal (cunetas)
7	Drenaje transversal (tuberías)
8	Longitud de tramos
9	Muros de protección lateral
10	Poblaciones que pasan
11	Puentes de concreto
12	Puentes de metal
13	Puentes de madera
14	Tipo de rodadura
15	Señalización horizontal
16	Señalización vertical
17	Geometría de la sección transversal
18	Taludes inestables
19	Túmulos
20	Planimetría y altimetría de los tramos (GPS)

Fuente: Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL), Especificaciones especiales, inciso e. p. 164.

1.2.1.2. Evaluación del estado de rodadura

El estado que presenta el pavimento, tanto desde el punto de vista del nivel de servicio que otorga al usuario (condición funcional), como de la capacidad de resistir las solicitaciones de cargas durante su período de vida útil (condición estructural), es el primer parámetro a evaluar para asignar las acciones de conservación más adecuadas.

La evaluación de la condición de un pavimento empieza con la recolección de datos para determinar el tipo, la cantidad, la severidad de los deterioros superficiales, la integridad estructural, la calidad de circulación y la resistencia al deslizamiento del pavimento.

El deterioro funcional del pavimento se relaciona principalmente con la calidad de la superficie de este y afecta negativamente la serviciabilidad (*comfort* y costo de operación del usuario) y la seguridad de circulación. Entre este tipo de deficiencias se encuentran la rugosidad, fallas superficiales y pérdida de fricción.

El deterioro estructural del pavimento se origina por la pérdida de la capacidad estructural de una o más de sus capas componentes o la pérdida de capacidad estructural del suelo de fundación. Este deterioro se puede manifestar en forma de deformaciones o agrietamiento.

Los índices de evaluación, pueden contener parámetros únicamente estructurales, así como, funcionales, dependiendo de las necesidades de información, propias para cada SGP. Hay dos tipos:

- Índices individuales para evaluar los pavimentos en sus características críticas. Se utilizan cuando los modos de falla son evaluados individualmente y son determinantes de una acción correctiva o reparación.
- Índices combinados para evaluar el pavimento en su totalidad.

Los datos sobre la condición de los pavimentos son necesarios para la evaluación y determinación de las necesidades de trabajos de mantenimiento y rehabilitación; también se usan para pronosticar el comportamiento del pavimento, establecer las estrategias de mantenimiento y rehabilitación y para ayudar a optimizar el financiamiento disponible para esos trabajos.

La condición de los pavimentos normalmente se mide utilizando los factores siguientes:

- Deterioro superficial: se refiere al daño o deterioro en la superficie del pavimento. Normalmente se realizan estudios para determinar el tipo, la severidad y la cantidad de los defectos superficiales. Esta información se usa con frecuencia para determinar un índice o Calificación Compuesta de Condición Superficial (CCCS), el cual sirve para calcular la tasa de deterioro y pronosticar la condición futura.

“El deterioro superficial y los valores de CCCS actuales o futuros se utilizan para identificar el momento oportuno para realizar los trabajos de mantenimiento y rehabilitación, así como, las necesidades monetarias requeridas en el proceso de la gestión de pavimentos. El nivel de defectos superficiales es la medida más común utilizada por el personal de mantenimiento para determinar el tipo y momento oportuno del mantenimiento requerido.

- Capacidad estructural: se refiere a la máxima carga y el máximo número de repeticiones que un pavimento puede soportar. Normalmente, se realiza un análisis estructural para determinar la capacidad de carga actual y la capacidad necesaria para soportar el tránsito proyectado. Los ensayos de deflexión no-destructivos como Viga Venkelman, del pavimento son un método simple y confiable para realizar esta evaluación; sin embargo, también pueden utilizarse técnicas de muestreo mediante cilindros y taladros tubulares. La evaluación estructural del pavimento es importante en la selección de los tratamientos a nivel de proyecto.

- **Rugosidad:** es una medida de la distorsión de la superficie del pavimento o un estimado de la habilidad de este para proporcionar un viaje confortable a los usuarios. Se evalúa mediante una calificación que trata de representar la opinión de los usuarios sobre la calidad de circulación actual que el pavimento les proporciona (calificación de servicio actual, CSA) o mediante algún índice correlacionado con esa opinión, como es el Índice Internacional de Rugosidad (IRI). La rugosidad del pavimento es considerada por el público como la medida más importante, especialmente en aquellos pavimentos con elevados límites de velocidades (por arriba de los 70 kilómetros por hora).
- **Resistencia al derrapamiento:** se refiere a la habilidad del pavimento de proporcionar la fricción suficiente para evitar los problemas de seguridad asociados con los derrapamientos o deslizamientos. La resistencia al deslizamiento es más importante para los pavimentos de las vías rápidas y generalmente se le considera como una medida separada de la condición; a menudo puede utilizarse por sí misma para determinar la necesidad de realizar algún tipo de trabajo correctivo.

Los cuatro factores anteriores de condición pueden ser utilizados para determinar la condición global del pavimento e identificar el tratamiento de mantenimiento y rehabilitación económicamente más efectivo”.⁵

⁵ MENDOZA DÍAS, Alberto y otros. Aplicación del HDM-III A la red Carretera Federal Del Estado de Puebla. p. 48.

El grado de importancia de estos factores en términos del comportamiento del pavimento y de las necesidades de mantenimiento y rehabilitación varía; es obvio que cualquier tratamiento recomendado para corregir un problema de capacidad estructural puede remediar todas las deficiencias que pudieran estar presentes, incluyendo la rugosidad.

Al mismo tiempo, cualquier tratamiento seleccionado para corregir la rugosidad puede ser usado para mejorar la resistencia al deslizamiento y corregir cualquier deterioro superficial.

Hay muchos métodos que pueden usarse para recolectar cualquiera de las cuatro medidas anteriores. Cada método tiene ventajas y desventajas, pero en general, aquellos procedimientos que requieren menos esfuerzos y costos son los menos exactos. Aquellos que son más exactos son los más costosos y los que toman más tiempo.

La agencia de transporte debe considerar cuidadosamente el tipo y el nivel de decisiones que se tomarán a partir de las medidas obtenidas, junto con los recursos disponibles, para determinar el método que deba usar. En la mayoría de las instituciones estatales de transporte, las medidas del deterioro y rugosidad se recolectan a nivel de red.

En las instituciones locales, las medidas del deterioro superficial son las que se usan con más frecuencia. Por lo general, la mayoría utilizan métodos menos exactos para los análisis a nivel de red y utilizan medidas más detalladas para los análisis a nivel de proyecto. Los datos son normalmente recolectados para definir la condición de cada sección individual de gestión identificada en el inventario.

1.2.1.3. Determinación de las necesidades de financiamiento

Una vez que la red de pavimentos ha sido definida y que los datos de las condiciones han sido recolectados, la condición de las secciones individuales de gestión y la condición global de la red, sin ningún mantenimiento o rehabilitación, pueden ser determinados proyectando los deterioros individuales, la CCCS o alguna combinación de índices, a un tiempo futuro.

Las secciones pavimentadas se seleccionan para mantenimiento y rehabilitación durante un período de análisis, si se cumple con un criterio de decisión establecido, el cual está normalmente basado en la condición, el tipo de superficie, la clasificación funcional y el tránsito, para posteriormente aplicar la evaluación económica.

El propósito de la planeación presupuestaria a nivel de red es asignar un costo de reparación a cada sección de pavimento que ha alcanzado los valores mínimos de condición seleccionados; es generalmente una categoría de costo en vez de un costo específico real.

El análisis a nivel de proyecto se usa para ajustar los tratamientos, porque requiere de una observación más detallada de las secciones para determinar la medida económicamente más eficiente para la sección específica de pavimento.

Los procedimientos de asignación que relacionan la condición del pavimento con la categoría de costos, generalmente usan una categoría de costo para cada nivel de condición.

Los programas de SGP utilizan técnicas completas de optimización y pueden considerar muchos tratamientos específicos para cada nivel de condición; sin embargo, estos tratamientos generalmente no deben ser aplicados o usados para determinar el presupuesto para una sección de gestión hasta que un análisis más completo sea desarrollado a nivel de proyecto, a no ser que existan datos completos a nivel de red para asignar los tratamientos.

1.2.1.4. Priorización de secciones candidatas

Una vez que la institución de carreteras identifica las secciones de la red que necesitan de acciones de mantenimiento o rehabilitación y determina los fondos necesarios para la red en la condición deseada, dicha institución deberá priorizar y asignar los fondos monetarios correspondientes.

En la mayoría de los casos, la cantidad de fondos disponibles es menor que la que necesita para completar todas las reparaciones identificadas. Generalmente, el objetivo de priorizar es obtener la mejor condición posible en la red de pavimentos dados los fondos a gastar.

Existe un número de herramientas de optimización que están disponibles para determinar la asignación óptima de los fondos monetarios. Entre estas se incluyen la programación lineal, la programación de números enteros, el análisis de decisión de Markov y la programación dinámica.

Hay muchos factores que han impedido el uso verdadero de las herramientas de optimización en la administración de pavimentos. Primero, muchos de los empleados de las instituciones de carreteras, se oponen al uso de estas porque las técnicas que usan son complejas y dan respuestas que ellos no puedan entender rápidamente o explicar.

Se requiere un análisis a nivel de proyecto para seleccionar el mejor trabajo a realizar para una sección específica de pavimento. Secciones adicionales de pavimento se añaden a la lista de secciones candidatas o se mueven a lo largo de los años debido a la proximidad geográfica y a la similitud de los tratamientos, para aumentar las economías de escala durante la construcción.

- Tipos de priorización:
- Priorización por deterioro o desempeño: se utilizan las determinaciones individuales de deterioro o desempeño para clasificar los proyectos. Se puede establecer un nivel crítico o límite de desempeño.
- Priorización por indicadores combinados: los diferentes indicadores individuales de deterioro o desempeño se combinan de acuerdo con un sistema de ponderación, para obtener un índice combinado (por ejemplo, 15% para rugosidad, 65% para deterioro superficial, 10% para resistencia al deslizamiento y 10% para tránsito). La priorización se inicia con los proyectos más cercanos a un valor inaceptable para el indicador individual.
- Priorización por un criterio compuesto: corresponden a combinaciones de los métodos anteriores. Es el caso de que se considere un tipo de deterioro o desempeño como crítico, para establecer una primera selección de proyectos. Posteriormente los proyectos seleccionados se clasifican a partir del indicador de combinado de desempeño u otro criterio de falla o deterioro individual.

- Priorización por menor costo inicial: los proyectos se clasifican por medio del costo inicial (construcción). De esta forma, los proyectos de menos costo se ejecutan de primero.
-
- Priorización por menor costo presente neto: se realizan análisis de ciclos de costo de vida para cada proyecto y se clasifican los proyectos de acuerdo con su costo presente neto. Se realizan los proyectos con menor costo presente neto de primero.
-
- Priorización por razón beneficios/costos: en caso de que sean cuantificables los beneficios relacionados con el pavimento (crecimiento económico, producción, peajes, ahorro en costos de operación, etcétera), se calcula el Valor Presente Neto de todos los beneficios (entradas de dinero) y se calcula la razón beneficios / costos.

$$B / C = VPN (\text{beneficios}) / VPN (\text{costos})$$

- Procedimiento de priorización multianual: se debe utilizar el método de análisis de costos por ciclos de vida, definiendo las opciones de rehabilitación más económicas para cada sección de pavimento. Para cada proyecto de mantenimiento reconstrucción y rehabilitación, se evalúa su beneficio, analizando el área entre las curvas de desempeño de aplicar la medida de MR&R y no hacer nada. Dicha área puede ser afectada por el volumen de tránsito y la longitud de la sección, de la siguiente forma:

$$B \text{ ajustado} = B * TPD * \text{longitud} * FC$$

- Donde:
- B ajustado: beneficio relativo del proyecto (valor presente).
- B: beneficio del proyecto, a partir de la diferencia entre las curvas de desempeño de la intervención y la de no hacer nada.
- TPD: tránsito promedio diario.
- Longitud: extensión del pavimento (km).
- FC: factor de cuantificación del ahorro en los costos del usuario; depende del tipo de pavimento, del tipo de proyecto y del tipo de usuario.

El proceso al final implica, para cada proyecto determinar el costo presente neto (C). Se calcula la razón beneficio-costos ($B \text{ ajustado} / C$) para cada proyecto. Se priorizan los proyectos, seleccionándose primero los que presentan una razón beneficio-costos mayor. Para culminar con la selección de los proyectos con mayor razón beneficio-costos, hasta que se agota el presupuesto del período multianual.

1.2.1.5. Determinación de los efectos o impactos de las decisiones presupuestarias

El objetivo de las instituciones de carreteras gubernamentales es proporcionar el máximo beneficio social, utilizando los fondos públicos. Sin embargo, el presupuesto es generalmente asignado por funcionarios que han sido elegidos y quienes se someten a reelecciones en plazos relativamente cortos.

Estos funcionarios frecuentemente están más interesados en financiar soluciones a corto plazo, de un costo inicial menor, que soluciones a largo plazo y con costo inicial mayor, a pesar que se les muestre que las soluciones a largo plazo son más eficientes económicamente.

Generalmente se requiere una cantidad considerable de justificaciones para lograr que se acepten soluciones a largo plazo. Una de las mejores maneras para justificar las peticiones de presupuestos es enseñar el impacto de distintas alternativas de financiamiento, en la salud de la red vial, en la acumulación de necesidades y en las necesidades futuras de financiamiento.

Muchas veces es mejor describir la calidad del servicio actual que se está proporcionando y discutir cómo el nivel de financiamiento aumentará o disminuirá; por ejemplo, se podría explicar como el porcentaje de materiales en condición pobre cambiará de un 5% a un 10% en los siguientes cinco años con el nivel de financiamiento actual, pero pudiera mantenerse constante a lo largo del mismo período con un aumento de un 7% en el presupuesto.

1.2.1.6. Análisis económico

El análisis económico se hace con el objetivo de seleccionar la opción de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de menor costo global. El concepto de menor costo global depende de quién realiza el análisis:

Si es un concesionario —→ menor costo de construcción en el plazo de análisis.

Si es el Gobierno —→ menor costo para la economía (incluyendo costos de operación).

Se deben considerar dos diferentes períodos:

- Vida útil: período de tiempo que cada tipo de intervención va a durar, hasta alcanzar parámetros de condición inaceptables.
- Período de análisis: período de tiempo para el cual la agencia quisiera realizar su programación.

1.2.2. Descripción de los elementos a nivel de proyectos

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto es el proceso de análisis y diseño para determinar los tipos y espesores de las capas de materiales; determinando la alternativa de diseño o tratamiento económicamente más eficiente, para una sección de pavimento que ha sido seleccionada para ser mejorada.

A pesar de que se pueden usar programas de computadora para diseñar el espesor de las capas de los materiales específicos y para realizar análisis económicos, la mayoría de los procesos deben ser completados fuera de los programas, como parte del proceso de Ingeniería de Detalle, en el que actúan diferentes departamentos de la organización administradora, ejemplo de ello se encuentran los departamentos siguientes, diseño geométrico, transporte, topografía, pavimentos, puentes, etcétera.

Un proceso completo requiere una cantidad considerable de muestreo y pruebas de materiales que tienen lugar tanto en el sitio como en laboratorios.

La gestión de pavimentos a nivel de proyecto generalmente considera diseños de pavimentos nuevos, así como, trabajos programados de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción que requieren algún nivel de diseño.

Las necesidades de diseños nuevos pueden ser generadas por un proceso de gestión de tránsito o por otros procesos.

Las necesidades de rehabilitación, reconstrucción y mantenimiento pueden ser generadas desde un SGP.

1.3. Diseños nuevos

El propósito de un pavimento es proporcionar al público una superficie de rodaje que sea económica, segura y confortable. A pesar que los pavimentos son generalmente considerados como uno de los tipos más simples de estructuras diseñadas por ingenieros, su diseño es bastante complejo.

En pavimentos asfálticos e hidráulicos, los métodos o técnicas más utilizados en Guatemala, se refieren casi siempre a la guía de diseño de las Normas AASHTO; en algunos otros casos utilizan ASTM. En las especificaciones se SIECA, éstas hacen mención a las Normas AASHTO para ciertos controles.

Dentro de las consideraciones a tomar en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento, es necesario analizar fundamentalmente la problemática que representa el comportamiento de los pavimentos debido al tránsito, ya que este se incrementa conforme el desarrollo tecnológico y crecimiento demográfico, lo que trae a su vez mayor cantidad de repetición de ejes y cargas.

Por ello, es necesario la selección de apropiados factores para el diseño estructural de los diferentes tipos de pavimentos, por lo que se debe tomar en cuenta la clasificación de la carretera dentro de la red vial, la selección de los diferentes tipos de materiales a utilizarse, el tránsito y los procesos de construcción.

En los procedimientos de diseño, la estructura de un pavimento es considerada como un sistema de capas múltiples y los materiales de cada una de las capas se caracterizan por su propio módulo de elasticidad.

La mayoría de los pavimentos flexibles están hechos con capas de materiales, subbase, base y superficie de rodadura; eventualmente todas las cargas son transmitidas al suelo o terreno natural. Los materiales con más resistencia estructural están generalmente ubicados cerca de la superficie para resistir las cargas de tránsito, estática y dinámicamente.

Cada capa sucesiva distribuye la carga sobre un área más grande. Las capas más fuertes proporcionan una distribución mayor, lo cual hace que las cargas sean distribuidas sobre áreas más grandes que las que se tendrían con el mismo espesor de un material más débil.

Esta distribución reduce las deflexiones unitarias y los esfuerzos de compresión verticales en las capas subsecuentes inducidos por las cargas.

Estos esfuerzos y deflexiones, si llegan a ser excesivos, pueden causar deflexiones permanentes en la estructura del pavimento causando hundimientos o deformaciones.

Los materiales también deben tener la estabilidad adecuada para resistir las fuerzas cortantes producidas por las cargas de los ejes de los vehículos, sin que exhiban además cualquier otra forma de deformaciones.

Los materiales deben tener la capacidad de resistir las cargas del tránsito sin que desarrollen deflexiones unitarias de tensión excesiva en las capas confinadas, las cuales suelen causar agrietamientos tipo piel de cocodrilo.

Tanto el espesor como la rigidez de las capas afectan la distribución de las cargas y la resistencia a la fatiga de las capas del pavimento. Estas propiedades son generalmente consideradas en el proceso del diseño del pavimento, en la caracterización de los materiales.

La estabilidad de los materiales para resistir las deformaciones generalmente no se considera en forma directa en el diseño del pavimento, porque la mayoría de los procedimientos de diseño asumen que las especificaciones de los materiales controlan adecuadamente este factor.

Algunas instituciones de carreteras tienen catálogos o una lista con dos o tres tipos de diseño, a partir de la cual se selecciona la composición del pavimento y el espesor de las capas. La Dirección General de Caminos utiliza el método ASSHTO, para el diseño de pavimentos flexibles.

Evidentemente estos métodos no consideran todos los factores principales que afectan el comportamiento del pavimento y por lo general, ocasionan la utilización ineficiente de los fondos públicos destinados a construcción, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos.

Un procedimiento racional de diseño obliga al diseñador a considerar cada uno de los factores físicos que afectan el comportamiento. Este proceso conduce a realizar diseños mejores en relación con los diseños uniformes que no consideran la importancia de todas las variables de diseño.

Todos los procedimientos de diseño deben considerar varios factores básicos que se sabe afectan el comportamiento de los pavimentos. Estos incluyen:

- La capacidad soporte por el suelo *in situ* (subrasante).
- Las cargas de tránsito esperadas (primordialmente de camiones y otros vehículos pesados), estas provienen del estudio de tránsito TPDA, proyectados.
- Factores ambientales (principalmente el impacto de los cambios en los niveles de humedad).
- El drenaje.
- Los materiales disponibles.

- La capacitación o habilidades de las fuerzas laborales de construcción.
- Costos.

1.4. Tratamientos de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción

Los trabajos de rehabilitación y reconstrucción son actividades costosas, igual que la construcción inicial de un pavimento.

Se necesita un análisis del pavimento existente para determinar las causas del deterioro y seleccionar el tratamiento económicamente más eficiente, que corrija el problema que creó la necesidad de reparación, en vez de tratar simplemente de remediar los síntomas del problema (en otras palabras, atacar el problema por sus causas y no sólo por sus efectos).

La selección de la mejor alternativa de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción para una sección de pavimento depende de:

- Condición actual del pavimento.
- Adecuación del tratamiento (intervención) para las condiciones actuales del pavimento.
- Vida útil del tratamiento.
- Costo de aplicar y mantener el tratamiento.

Frente al deterioro del pavimento, es posible aplicar una serie de técnicas que permiten reparar o disminuir el deterioro y extender la vida útil del pavimento. Entre los tipos de acciones se encuentran:

- Acciones de reparación o de respuesta: la reparación normalmente se asocia a una acción correctiva y corresponde a la ejecución de trabajos de eliminación de defectos puntuales. Se puede decir que la aplicación de este tipo de técnica no tiene repercusión sobre el deterioro general de un pavimento.
- Conservación: corresponde a un tratamiento generalizado del pavimento (en toda su extensión), que tiene como objetivo disminuir la tasa de deterioro, extendiendo la vida útil del pavimento.
- Rehabilitación: las técnicas de rehabilitación, junto con la acción de extender la vida útil del pavimento, proveen una mejora de la capacidad estructural o de serviciabilidad.

La tabla II muestra el efecto de los tipos de deterioro sobre la capacidad estructural o funcional y el tipo de causa probable, para pavimentos asfálticos.

La tabla III muestra las principales acciones o técnicas usadas en la actualidad para enfrentar los diversos tipos de deterioro.

La tabla IV muestra algunos tipos de deterioro y sus posibles causas, para ir determinando las posibles acciones de corrección a tomar.

Tabla II. **Tipos de deterioros en pavimentos asfálticos**

Tipo de deterioro o defecto	Afecta la capacidad		Causa	
	Estructural	Funcional	Asociadas a cargas	No asociadas a cargas
Agrietamiento	Por fatiga	x		x
	En bloque	x		x
	Juntas y bordes	x		x
	Deslizamiento	x		x
	Reflexión	x		x
	Transversales	x		x
Deformaciones	Ahuellamiento		x	
	Corrugaciones		x	x
Desintegración	Baches	x	x	
	Pérdida de agregado		x	x
	Pérdida de ligante		x	x
Pérdida de Fricción	Pulimiento del agregado		x	
	Exudación		x	x

Fuente: LEIVA, Fabricio. Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras. p. 7.

Tabla III. **Tipos de técnicas de mantenimiento, reconstrucción y rehabilitación en pavimentos asfálticos**

Tipo de técnica	Actividad
Respuesta	Bacheo
	Sello de grietas
	Reemplazos puntuales
Conservación	Sello Neblida (fog seal)
	Sello de agregados (TSB)
	Lechada Asfáltica
	Micropavimento
Rehabilitación	Funcional
	Fresado
	Recarpeteo
	Estructural
	Recarpeteo
	Fresado y recarpeteo
	Reciclado

Fuente: LEIVA, Fabricio. Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras. p. 8.

Tabla IV. Tipos de deterioros y sus causas probables

Tipo de deterioro o defecto		Descripción	Causa probable
Agrietamiento	Por fatiga	Grietas interconectadas formando polígonos pequeños.	Excesiva deflexión del pavimento
	En bloque	Grietas que forman bloques de 1 a 3 metros.	Esfuerzos producidos por cambios térmicos
	Juntas y bordes	Grietas lineales ubicadas cerca de los bordes o juntas del pavimento	Mezcla asfáltica subcompactada o base deficiente
	Deslizamiento	Grietas curvas, normalmente en grupos	Esfuerzos horizontales en zonas de frenada o partida de vehículos
	Reflexión	Se producen en recapeados, reflejando grietas existentes en el pavimento subyacente.	Movimientos diferenciales en la junta subyacente (por esfuerzos o diferenciales térmicos).
Deformaciones	Ahuellamiento	Deformación canalizada en la huella de circulación de los neumáticos.	Deformación plástica de la mezcla o deformación de la base
	Corrugaciones	Abultamiento u ondulación de la mezcla	Desplazamiento de la mezcla producto de esfuerzos horizontales
Desintegración	Baches	Desprendimiento de la mezcla formando hoyo redondeados.	Excesiva deflexión del pavimento, etapa posterior al agrietamiento por fatiga.
	Pérdida de agregado	Expulsión de agregados de la carpeta asfáltica	Defecto en la unión agregadoligante
Pérdida de Fricción	Pulimiento del agregado	Desgaste de las partículas en contacto con los neumáticos	Agregado de mala calidad
	Exudación	Migración del asfalto de la mezcla a la superficie.	Mezcla mal diseñada (exceso de ligante o ligante blando).

Fuente: LEIVA, Fabricio. Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras. p. 8.

Para determinar las causas del deterioro e identificar las restricciones relevantes; las respuestas a un conjunto de preguntas pueden utilizarse para identificar los tratamientos factibles. Una evaluación a base de preguntas y respuestas a nivel de proyecto, debe incluir las siguientes preguntas:

- ¿Es el pavimento estructuralmente adecuado para el tránsito futuro?
- ¿Es el pavimento funcionalmente adecuado?
- ¿Es la tasa de deterioro anormal?
- ¿Son los materiales del pavimento durables?

- ¿Es el drenaje adecuado?
- ¿Fueron inadecuados los trabajos previos de mantenimiento?
- ¿Varía la condición sustancialmente a lo largo del tramo (sección) o entre los carriles?
- ¿Requiere el ambiente de una consideración especial?
- ¿Cuáles son las opciones disponibles para el control del tránsito?
- ¿Cuáles son los factores geométricos que afectarán al diseño?
- ¿Cuál es la condición de los acotamientos?

Las preguntas uno a la seis esencialmente tratan la causa del deterioro.

Muchas veces la respuesta a la pregunta uno puede ser contestada realizando un diseño de recapeo; si el análisis indica que no se necesita el recapeo, el pavimento puede ser considerado estructuralmente adecuado. La pregunta siete ayuda a determinar si se debe realizar un cambio en el tratamiento a lo largo de la sección analizada. Las preguntas ocho a once identifican las restricciones especiales que deben ser consideradas.

Una de las dificultades asociadas con este proceso es decidir cuáles y cuántos datos deben ser recolectados. Es difícil saber cuántos datos son necesarios hasta que algún otro tipo de información esté disponible.

Se recomienda una serie de pasos para la recolección de datos a nivel de proyecto, incluyendo:

- Recolección de datos de oficina
- Primer estudio de campo
- Primera evaluación de datos y determinación de datos adicionales
- Segundo estudio de campo
- Realización de pruebas de laboratorio
- Segunda evaluación de datos
- Compilación final de datos de campo y de oficina

Cada uno de estos pasos lleva a la determinación de los datos adicionales necesarios para el análisis. Si las necesidades de reparación fueron definidas desde un sistema de gestión a nivel de red, los datos de ese sistema deben servir como un punto de partida. El tamaño del tramo y su importancia para la agencia determina la cantidad de tiempo y los fondos que serán gastados en la evaluación a nivel de proyecto.

Los pavimentos de las carreteras principales con altos tránsitos como la red vial primaria de Guatemala, deben ser sujetos a una evaluación más completa y a un mayor número de pruebas que aquéllos que se encuentren en las vías de bajo tránsito.

Los conceptos y las preguntas indicadas anteriormente son válidos para cualquier carretera con cualquier volumen de tránsito; sólo la cantidad de las pruebas a realizar y el tiempo dedicado a obtener una conclusión, deben variar.

Existe un gran número de alternativas de trabajos de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción para ambos tipos de pavimentos, rígidos y flexibles; el reciclaje ha aumentado el número de opciones.

Los trabajos de sellado de superficie, como sellos con grava o con ligantes, en combinación con preparaciones localizadas, son a menudo utilizadas como tratamientos de mantenimiento preventivo para pavimentos flexibles; también son utilizados como tratamiento de rehabilitación de pavimentos flexibles con volúmenes bajos de tránsito, cuando se requieren mejoras estructurales.

El recapeo con concreto asfáltico es el tipo más común de rehabilitación estructural que se aplica a ambos pavimentos. Sin embargo, muchos de los recapeos actualmente en sitio, nunca fueron diseñados.

Algunas instituciones usan un espesor uniforme sin considerar la suficiencia estructural del pavimento. Los recapeos han llegado a ser más versátiles cuando se combinan con geotextiles y con reciclajes. Otros tipos de trabajos de rehabilitación y reconstrucción para pavimentos flexibles incluyen:

- Reciclaje en frío en sitio, seguido por la colocación de una nueva superficie.
- Reciclaje en caliente en sitio, seguido por un recapeo.

- Reconstrucción y estabilización de los materiales del cimiento.
- Extracción y reemplazamiento del pavimento.
- Reciclaje del pavimento en toda su profundidad.
- Recapeo de concreto de cemento Portland.

Los procedimientos para diseños nuevos son generalmente usados en el diseño de los trabajos de rehabilitación. Cuando las capas confinadas existentes de un pavimento se quitan y reemplazan o se trabajan completamente (como lo que se hace en el reciclado en frío en el lugar), los procedimientos para diseños nuevos pueden usarse, aplicando las propiedades adecuadas de los materiales, del material existente y del material a trabajar.

Cuando una parte de las capas confinadas existentes se deja en el lugar, un procedimiento de diseño de recapeo debe usarse para considerar el daño o deterioro que se ha desarrollado en el material confinado existente durante el tiempo que ha estado en servicio.

1.4.1. Elementos de costos a considerar en las opciones de mantenimiento, reconstrucción y rehabilitación

- Costo inicial de construcción (año 0).
- Se requiere conocer los costos unitarios por tipo de material y actividad constructiva.

- Se requiere conocer las cantidades de cada tipo de material y actividad constructiva.
- Costo del mantenimiento rutinario (durante el período de análisis).
- Debe considerarse los costos anuales de todas las actividades que afecten directamente el desempeño del pavimento.
- Valor de rescate (en el último año del período de análisis).
- Puede determinarse a partir de un porcentaje definido del costo inicial de la construcción.
- Alternativamente, puede ser una función de la condición del pavimento al final del período de análisis (más realista).
- Costos de operación: tiempo de viaje, demoras, operación de los vehículos, accidentes, etcétera (durante el período de análisis).

1.4.2. Selección de la mejor estrategia

La toma de decisiones en la administración de proyectos carreteros es un paso que necesita estar fundamentado en un cauteloso análisis de las variantes económicas correspondientes.

Es muy raro que exista una sola alternativa o un conjunto de materiales y espesores de las capas que sean inmediatamente obvios para representar la mejor solución. La durabilidad de los materiales y la efectividad económica de cada combinación se debe considerar.

El proceso a utilizar en la selección de la combinación de tratamientos, los materiales, los espesores para un nuevo diseño, el mantenimiento, la rehabilitación o la reconstrucción, es un paso integral del diseño del proyecto.

El proceso debe incluir la realización de un diseño preliminar de espesores utilizando todos los materiales disponibles y tratamientos que son considerados factibles, dadas las circunstancias.

Los pavimentos rígidos que fueron diseñados y construidos en forma apropiada, generalmente duran más hasta el momento de la primera rehabilitación que los pavimentos flexibles que fueron adecuadamente diseñados y construidos.

Los pavimentos de concreto de cemento Portland tienen generalmente un costo inicial muy alto, pero los pavimentos de concreto asfáltico necesitan rehabilitaciones más frecuentes. En muchos casos, la diferencia de costos entre estas alternativas, cuando se considera un período de análisis a largo plazo, será pequeña.

Los pavimentos se pueden mantener en servicio más allá de la vida útil original de diseño cuando se aplican tratamientos de mantenimiento y deben ser considerados en el diseño de un nuevo pavimento y de una rehabilitación.

Para el diseño de una nueva construcción o rehabilitación, deben analizarse estrategias en vez de considerar tratamientos individuales. Los conceptos referentes a determinar el costo total actualizado de los pavimentos durante su vida útil deben utilizarse para determinar la diferencia de costo de las distintas estrategias.

El modelo HDM fue diseñado específicamente para la evaluación de proyectos de conservación de carreteras. Este modelo es capaz de prever los flujos de costos en un período definido de tiempo para cada tarea de conservación con que se trabaje.

Para el análisis económico se deben contemplar los beneficios para la sociedad en su conjunto. Esto dificulta la evaluación de las alternativas, ya que muchas veces no se pueden evaluar todas las variables que, necesariamente intervienen en un análisis de este tipo. Sin embargo, se pueden tratar de contemplar la mayor cantidad de factores que estén involucrados.

Básicamente, el problema del análisis económico es saber la cantidad de capital que es necesario invertir en el presente y la que se necesita invertir en el futuro.

1.5. Relación entre los elementos a nivel de red y nivel de proyecto

Los elementos a nivel de red en un sistema de gestión deben identificar y priorizar las secciones que necesitan trabajo en cada uno de los años del período de análisis, deben identificar las necesidades financieras y mostrar el impacto de las diferentes estrategias de financiamiento.

Las agencias o instituciones de transporte deben evitar durante el análisis a nivel de red, así como, dar a conocer la relación existente entre el financiamiento y las secciones específicas de pavimento en que se actuará, para así evitar restricciones de financiamiento innecesarias en la parte temprana del análisis a nivel de proyecto. La lista priorizada de secciones en que debe actuarse cada año es el punto de partida del análisis a nivel de proyecto.

Para las secciones en que deba actuarse en un año determinado, a nivel de proyecto deben recolectarse datos adicionales, determinarse la causa de los deterioros e identificarse los tratamientos factibles.

El análisis a este nivel debe determinar estimados de costos más exactos para cada alternativa y seleccionar la solución más eficiente económicamente dadas las restricciones impuestas. En este momento, se debe determinar el costo de reparar cada sección.

1.6. Importancia de los sistemas de gestión de pavimentos

Los trabajos de mantenimiento y rehabilitación generalmente son administrados con métodos menos precisos o inexactos; para el mantenimiento del año posterior se consideran las cantidades de trabajo propuestas por el encargado del mantenimiento del proyecto en ese período, como es el caso de COVIAL en estos tiempos.

En muchos casos; el criterio de administración es de atender las secciones carreteras más deterioradas, generalmente con recursos insuficientes para la adecuada reparación de todas ellas; a este sistema generalmente se le ha conocido como de emergencia o de reacción ante situaciones de crisis.

En los últimos 20 a 30 años, los SGP han sido desarrollados en el mundo para ayudar en la planeación del mantenimiento y rehabilitación. Los SGP son necesarios para evitar respuestas de crisis en los departamentos de obras públicas.

Estas metodologías se basan en la aplicación de la teoría de sistemas y de conceptos básicos de administración para la gestión de la infraestructura; proporcionan una manera estructurada y documentada para obtener el máximo rendimiento del dinero disponible para mejorar la infraestructura.

1.7. Beneficios de la administración de pavimentos

Existen diversos beneficios derivados de tener un proceso estructurado de administración de los pavimentos, los cuales son muy obvios; sin embargo, pocos beneficios monetarios han sido documentados. Los beneficios que han sido identificados incluyen:

- Uso más eficiente de los recursos disponibles.
- Una mayor habilidad para justificar y asegurar un mayor financiamiento para las actividades de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos.
- Información más exacta y accesible sobre el estado de un sistema de vialidades.
- Habilidad de evaluar el comportamiento de los tratamientos seleccionados.
- Determinación de necesidades que pueden ser apoyadas.
- Habilidad de mostrar el impacto de distintas estrategias de financiamiento.
- Selección de estrategias más efectivas de mantenimiento y rehabilitación.

- Mejoras de comunicación entre los distintos grupos que trabajan con los pavimentos dentro de la organización y con el público.
- Habilidad de responder preguntas sobre los pavimentos hechas por administradores, políticos y por el público.
- Mejor coordinación de los trabajos con las instituciones de servicio público.
- Mayor credibilidad con los políticos y el público, en lo relacionado con la administración.
- El desarrollo de un sentimiento de satisfacción a partir del convencimiento que la agencia está realizando el mejor trabajo con el financiamiento disponible.

2. MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS

2.1. Gestión del mantenimiento de los pavimentos

Los pavimentos son diseñados para un tiempo de vida determinado, para que el pavimento entregue el servicio esperado deben realizarse actividades de conservación adecuadas, esta situación incentiva la creación de los sistemas de gestión de pavimentos SGP.

Un SGP se define como el conjunto de operaciones que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en cuestión. Todo lo anterior minimizando los costos monetarios, sociales y ecológicos.

2.2. Modelos de deterioro de los pavimentos

Los modelos de deterioro son por lo general, expresiones matemáticas que representan la evolución del estado del pavimento en el tiempo, con base al conocimiento de sus condiciones en el momento de la puesta en servicio y de realización del análisis.

Los modelos de deterioro pronostican el efecto de las actividades de mantenimiento en función del tiempo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y su progresión en el tiempo.

Los modelos de deterioro de pavimentos aplican a diversos aspectos de la gestión de pavimentos como:

- En la creación de un SGP que se sirva de los modelos para: predecir el deterioro del pavimento en el tiempo, evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento, hacer el plan de conservación del pavimento y optimizar los resultados del nivel de servicio del pavimento como de los costos asociados para lograrlo.
- En la generación de estándares y políticas de mantenimiento del nivel de servicio requerido del pavimento.
- En la evaluación del efecto relativo de algunas características de diseño.
- En el país existe la necesidad de crear sistemas formales de gestión de pavimentos aplicables a las redes viales, esto crea a su vez la necesidad de contar con modelos de deterioros confiables, bien cuantificados y adecuadamente validados.

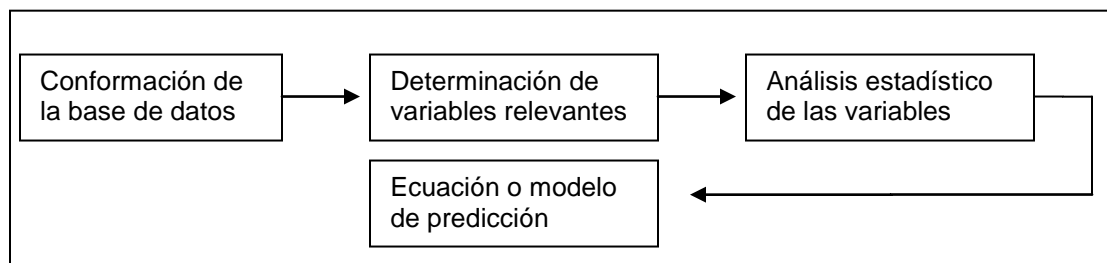
Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos o mecanicistas, la diferencia entre estos es el tipo de datos a utilizar.

Para los desarrollos empíricos se requieren datos reales de los pavimentos existentes referidos a diversos aspectos del pavimento como: datos de diseño, datos del drenaje, datos de tránsito, datos del ambiente y deterioros sufridos a lo largo de su vida útil, mientras que para los desarrollos mecanicistas, además de los datos del pavimento, las características del comportamiento de las capas que conforman la estructura del pavimento, específicamente sus propiedades físicas y mecánicas.

Después de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se lleva a cabo con ellas un análisis estadístico que dará origen al modelo de predicción del comportamiento futuro del pavimento con base a una ecuación que relaciona las variables seleccionadas.

En la figura 4 se observa un diagrama de flujo que indica el desarrollo de los modelos de deterioro.

Figura 4. **Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro**



Fuente: BENGUA PÉREZ, Elva. Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los programas HDM-III y HDM-4. p.10.

2.3. Técnicas para el desarrollo de los modelos

Existen muchas técnicas para el desarrollo de modelos de deterioro, las más utilizadas son:

- Extrapolación lineal
- Regresión
- Distribución de probabilidad

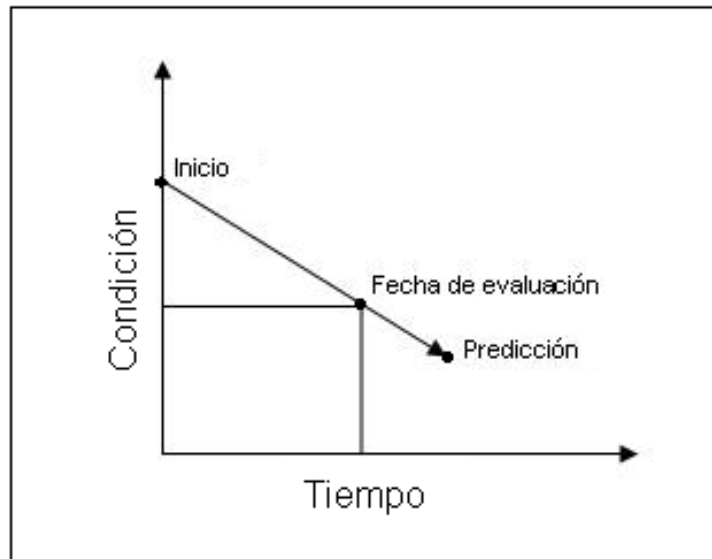
La precisión de los modelos es un punto de gran importancia que dependerá del uso que se desee dar a los resultados.

2.3.1. Extrapolación lineal

Este método se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos de la condición del pavimento, sus principales características son:

- Es aplicable sólo a secciones individuales de pavimentos y no puede usarse en otras secciones.
- Se requiere al menos una medición de la condición del pavimento además de la realizada al final de la etapa de construcción (figura 5).
- Asume que las cargas de tránsito, los niveles de mantenimientos y tasas de deterioro se mantendrán en el futuro, por lo tanto, no es preciso para períodos largos de tiempo.
- En el caso de aplicar este tipo de modelos en el país, es este punto especialmente importante dada la variabilidad principalmente de las cargas y actividades de mantenimiento.
- No es aplicable predecir tasas de deterioros de pavimentos recién construidos que hayan sufrido recientemente una rehabilitación mayor.
- Para una sección de pavimento específica, los factores de suelo de cimentación, clima, estructura de pavimentos y tránsito pasado se consideran explícitamente en el análisis.

Figura 5. **Extrapolación lineal**



Fuente: BENGOA Pérez, Elva. Descripción de Sistemas de Gestión de Pavimentos y uso de los programas HDM-III y HDM-4. p.11.

2.3.2. **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. Los distintos tipos de variación se describen a continuación:

Regresión lineal entre dos variables, se describe con el modelo siguiente:

$$- y_i = a + b x_i + \text{error}$$

Regresión lineal múltiple, en este caso se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes y se describe:

$$- y = a + b_1.x_1 + b_2.x_2 + \dots + \text{error}$$

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.

2.3.3. Distribución de probabilidad

La condición de un pavimento, como el 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.

2.3.4. Modelo de deterioro de pavimentos asfálticos (HDM)

El modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras (Highway Design and Maintenance Standards) desarrollado por el Banco Mundial, se viene usando desde los 90 para combinar la evaluación técnica y económica de los proyectos, para armonizar los sistemas de gestión de carreteras, con herramientas de software adaptables y fáciles de utilizar.

Generalizando, el modelo del HDM es un modelo de simulación del comportamiento de vida de las carreteras considerando todas las relaciones entre esta, el ambiente y el tráfico dentro de una economía nacional o regional que determina la composición y la estructura de costos de las variables. El modelo realiza un análisis detallado con base en los datos suministrados por el usuario.

No es un modelo de optimización en el sentido de que no es capaz de encontrar la solución óptima absoluta del problema sino que realiza los cálculos correspondientes a cada alternativa y suministra los indicadores para que el usuario ordene las alternativas y posteriormente seleccione la que de acuerdo con su objetivo considere óptima.

El modelo fue concebido como una herramienta para el análisis de alternativas de mejoramiento vial. El problema se reduce en comparar los incrementos en la inversión con los beneficios adicionales que dicho incremento conlleva.

El HDM tiene tres modalidades principales: análisis de estrategias, análisis del programa y análisis del proyecto, cada una de las cuales pueden ser adaptadas para las diferentes funciones de la gestión de carretera.

Para el desarrollo de los modelos de HDM se adoptó un sistema que combina métodos empíricos avanzados. La metodología utilizada fue fundamentalmente empírica, de manera que se desarrollaron modelos para métricos utilizando técnicas de regresión estadística de la información proveniente de series de tiempo: información que había sido coleccionada 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 basaron en teorías mecanicistas y en el conocimiento experimental del comportamiento estructural de los pavimentos y de los materiales que lo conforman.

La forma del modelo HDM es incremental, es decir, que predice el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento de tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las solicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas).

2.4. Calibración de los modelos de deterioro

Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numéricos, que modifican 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 la diferencia entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno.

El objetivo de la calibración es obtener modelos de predicción ajustados, que ofrezcan estimaciones más realistas y confiables de los deterioros y que permitan establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación del camino (costo total = costo de operación vehicular + costo de conservación + costo exógeno).

La calibración de los modelos de deterioro puede realizarse a dos niveles: es decir, calibración a nivel de proyecto y calibración a nivel de red respectivamente.

Ya que los modelos de deterioro son desarrollados con una base empírica determinada y bajo condiciones específicas de clima, tipo y forma, materiales, etcétera, al ser estos utilizados bajo condiciones distintas, pueden presentarse diferencias considerables entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad, para reducir estos errores o para verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades y limitaciones, los procedimientos de calibración o ajuste resultan muy útiles. Las causas de las diferencias son las siguientes:

- Errores en los datos observados: debido a inadecuadas técnicas de medición, mal registro de los datos o toma de datos que no correspondan.
- 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.
- Condiciones diferentes a las originales del modelo: si el modelo se aplica fuera de su espacio de inferencia original.
- Modelo inadecuado: 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, esto puede ocasionar una mala predicción.

Aleatoriedad del comportamiento de los materiales y las estructuras: siempre existe un cierto margen de error introducido por un comportamiento aleatorio o estocástico de los materiales que componen las estructuras en el mundo real que genera dispersión en los resultados.

3. VISIÓN GENERAL DEL HDM

3.1. Antecedentes de HDM

En 1968 el Banco Mundial originó un Estudio de Diseño de Carreteras en conjunto con el Laboratorio de Transporte e Investigación de Carreteras de Gran Bretaña (Transport and Road Research Laboratory) TRRL y el Laboratorio Central Francés de Puentes y Carreteras (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) LCPC.

Posteriormente, el Instituto Tecnológico de Massachussets (Massachusetts Institute of Technology) MIT desarrolló, por encargo del Banco Mundial, la construcción de un modelo conceptual denominado Modelo de Costos de Carreteras (Highway CostModel) HCM, este se considera como la primera versión de HDM.

En particular el Modelo de Estándares de Conservación y Diseño de Carreteras (Highway Design and Maintenance Standards Model) HDM-III, desarrollado por el Banco Mundial, se viene usando desde hace más de dos décadas para combinar la evaluación técnica y económica de proyectos, preparar programas de inversión y analizar estrategias de redes de carreteras.

El Estudio Internacional del Desarrollo y Gestión de Carreteras (International Study of Highway Development and Management) ISOHDM fue realizado para ampliar el ámbito del modelo HDM-III y para armonizar los sistemas de gestión de carreteras con herramientas de software adaptables que se acercarán a las necesidades de las agencias o instituciones viales.

El estudio ISOHDM se desarrolló bajo los auspicios de importantes instituciones internacionales además de contar con el apoyo de gobiernos nacionales y de otras organizaciones pudiéndose mencionar el Departamento para el Desarrollo Internacional del Reino Unido, el Banco Mundial, el Banco Asiático de Desarrollo y la Administración Nacional de Caminos de Suecia. Contribuyeron la Administración Nacional de Caminos de Finlandia, los gobiernos de Malasia, Francia, Sudáfrica y Japón y la Federación Interamericana de Productores de Cemento. El estudio estuvo coordinado por la Asociación Mundial de Carreteras y la Universidad de Birmingham.

Esto dio como principal resultado la Herramienta de Desarrollo y Gestión de Carreteras (Highway Development and Management Tool) HDM-4. El ámbito de HDM-4 se amplió considerablemente, superando las evaluaciones tradicionales de los proyectos, para proporcionar un potente sistema para el análisis de la gestión de carreteras y de las alternativas de inversión.

El énfasis se situó en clasificar y aplicar los conocimientos existentes, más que en emprender nuevos y largos estudios empíricos, aun cuando se recogieron datos de forma limitada.

La implementación del HDM-04 se da principalmente por la aparición de nuevas condiciones tanto en materia económica como técnica y la necesidad de incluir más factores que antes no se tomaban en cuenta (factores climáticos, ambientales, seguridad vial, efectos de la congestión de tráfico, etcétera); así como, la necesidad de jerarquizar las inversiones en proyectos carreteros, realizando una optimización de los recursos disponibles y previendo la influencia de condiciones futuras en su estado; desarrollando una visión más amplia de la Gestión de carreteras considerando funciones como planificación, programación, preparación y operaciones.

Cómo se puede ver, el ámbito de HDM se ha ampliado considerablemente, superando las evaluaciones tradicionales de los proyectos, para proporcionar un potente sistema para el análisis de la gestión de carreteras y de las alternativas de inversión.

Este capítulo de visión general contiene un resumen de la descripción del sistema HDM. Todos los lectores nuevos de HDM, en particular los profesionales dedicados al desarrollo de la ingeniería de tránsito, directivos de alto nivel de una organización de carreteras y personas interesadas en el tema, encontrarán en este informe una introducción general al modelo de evaluación y sus posibles aplicaciones en la planificación de proyectos.

3.2. Objetivos del desarrollo de HDM

El modelo del HDM tiene por objetivos, el incorporar el conocimiento presente hasta su tiempo de todos los estudios hechos acerca de conservación de carreteras con los programas anteriores, incorporar nuevos conocimientos derivados de investigaciones alrededor del mundo e incorporar nuevas tecnologías computacionales.

Se han utilizado ampliamente distintas versiones de los modelos en diversos países que han sido usados fundamentales para justificar los cada vez mayores presupuestos de conservación y rehabilitación de carreteras.

Los modelos se utilizaron para investigar la viabilidad económica de proyectos en más de 100 países y para optimizar los beneficios económicos de usuarios de carreteras bajo diferentes niveles de gastos. Como tal, proporcionan avanzadas herramientas de análisis de inversiones en carreteras, con unas posibilidades de aplicación muy amplias en diversos climas y condiciones.

Aunque muchas aplicaciones de los distintos modelos se habían utilizado en países en desarrollo, en los últimos años muchos países industrializados comenzaron a utilizar el modelo HDM.

Básicamente se pueden definir cuatro áreas de alcance del programa:

- Presupuestación de los proyectos: obtención de presupuestos para la conservación, rehabilitación, mejora y nueva construcción, a través del análisis del ciclo de vida de una propuesta de inversión en carreteras.
- Programación de trabajos: preparación de programas de conservación y desarrollo de red de carreteras para varios años, que faciliten la preparación de presupuestos a mediano plazo.
- Planeación estratégica: desarrollo de políticas, planes de distribución de recursos a largo plazo y planificación de redes de carreteras.
- Software: un sistema fácil para el usuario, construido a partir de un conjunto de módulos con la capacidad de cubrir un amplio espectro de datos y niveles de destreza.

La utilización del HDM, se orienta básicamente al análisis de costos de los proyectos y en particular a la obtención de los costos que genera la carretera a lo largo de su ciclo de vida y concluye con la posible toma de decisiones.

3.3. Marco analítico del HDM-4

El marco analítico del HDM-4 se basa en el ciclo de vida de la capa de rodadura, (losas de concreto o carpetas asfálticas) y se aplica para predecir lo siguiente en el funcionamiento del mismo:

- Deterioro del pavimento
- Efectos de las obras de reparación
- Efectos para los usuarios de la carretera
- Efectos socioeconómicos y ambientales
- Una vez construidos los pavimentos, las carreteras se deterioran generalmente por los siguientes factores:
 - Cargas de tránsito
 - Factores ambientales
 - Efectos del sistema de drenaje inadecuados

La tasa de deterioro del pavimento está directamente afectada por los estándares de conservación aplicados para reparar defectos en la superficie de rodamiento, como grietas, desprendimiento de agregados, baches, etcétera, o para conservar la integridad estructural del pavimento (tratamientos superficiales, refuerzos, etcétera), permitiendo así, que la carretera soporte el tráfico para el que ha sido diseñada. Las condiciones generales a largo plazo dependen de los estándares de conservación o mejora aplicados a la carretera.

El IRI es un índice de desgaste de la carretera que presenta irregularidad promedio producida ya sea por desprendimientos, roderas, baches, agrietamiento, etcétera y el HDM-4 lo puede predecir, de acuerdo con los datos de las características anteriores o también el usuario puede estimar un IRI de acuerdo con su experiencia. Cuando se define un estándar de conservación, se impone un límite al nivel de deterioro al que se permite llegar al pavimento.

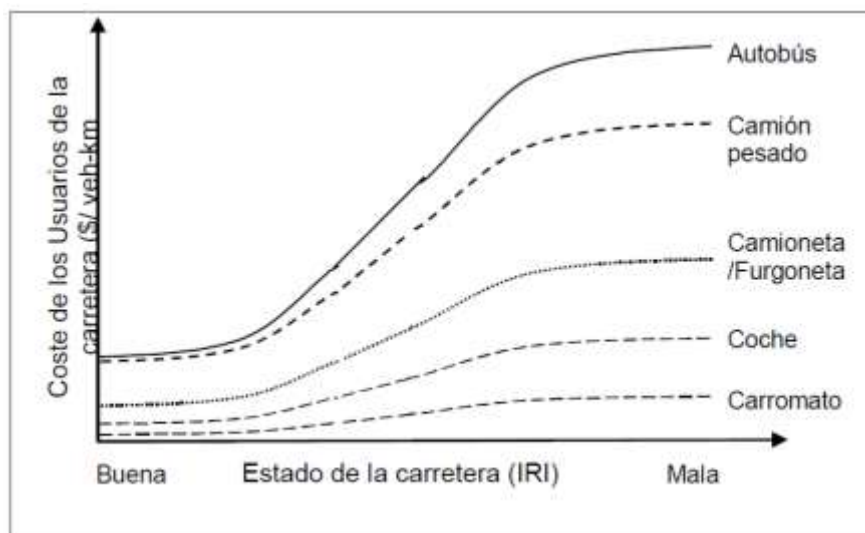
Como consecuencia, además de los costos de capital de la construcción de carreteras, los costos totales en que incurren los organismos implicados dependerán de los estándares de conservación aplicados a las redes de carreteras.

3.3.1. Concepto del análisis del ciclo de vida

Como se comentó en el capítulo anterior, los costos de usuario son básicamente 3 tipos: costos de operación del vehículo, costos del tiempo de viaje y costos por accidentes, en la siguiente figura se pueden observar claramente los efectos del estado de la carretera sobre los costos del usuario.

El cálculo de los beneficios se logra comparando los flujos de costos de las alternativas a evaluar contra los costos de la alternativa base, que consiste en una propuesta de conservación con acciones mínimas.

Figura 6. **Efecto del estado de la carretera en los costos de operación del vehículo**



Fuente: KERALI, Henry G. R. Visión general del HDM-4, volumen 1. p.12 .

El HDM está diseñado para realizar estimaciones de costos, comparativas y análisis económicos de diferentes opciones de inversión. Estima los costos de un gran número de alternativas año con año, para un período de análisis definido por el el usuario.

3.4. El papel del HDM en la gestión de carreteras

El modelo de estándares de conservación y diseño de carreteras (HDM), se utiliza para combinar la evaluación técnica y económica de los proyectos viales, preparar programas de inversión y analizar estrategias en redes de carreteras. El nivel de detalle empleado por el HDM permite modelar la mayoría de los factores que intervienen en la evaluación de los proyectos viales; por ejemplo, en lo que se refiere al deterioro de pavimentos, el sistema analiza prácticamente todos los indicadores que se emplean para caracterizar este fenómeno: irregularidad, deterioros superficiales, resistencia al deslizamiento, capacidad estructural, etcétera.

3.4.1. Gestión de carreteras

Al considerar las aplicaciones de HDM es necesario contemplar y entender el proceso de gestión de carreteras, en cuanto a las siguientes funciones: planificación, programación, preparación y operaciones.

3.4.1.1. Planificación

La planeación comprende el análisis del sistema de carreteras en su conjunto y requiere de la preparación de presupuestos a mediano y largo plazo o estratégicos con estimaciones de gastos, desarrollo y conservación de carreteras; bajo diferentes presupuestos económicos.

Se pueden establecer diferentes niveles de financiamiento junto con previsiones de los gastos necesarios, bajo partidas presupuestarias definidas.

Durante la etapa de planeación, el sistema carretero se caracteriza por: características de la red, longitud de la carretera y características del tránsito. Los resultados de la planeación son importantes a la hora de la implementación de políticas en la organización.

En la etapa de planificación, el sistema físico de carreteras normalmente incluye la siguiente información, agrupadas en varias categorías y definidas por parámetros como:

- Clase o jerarquía de la carretera
- Flujo/cargas/congestión de tráfico
- Tipos de pavimentos
- Estado del pavimento
- Longitud de la carretera en cada categoría
- Características del parque de vehículos que utiliza la red

La planeación se da generalmente a nivel gerencial y requiere una visión completa de todos los factores económicos, financieros e incluso políticos que pueden afectar el desarrollo de los proyectos.

Los resultados del ejercicio de planificación son del máximo interés para quienes definen las políticas del sector, tanto en el ámbito político como en el profesional.

3.4.1.2. Programación

La programación consiste en el análisis presupuestal de las acciones de conservación en subtramos de la red de carreteras para uno o varios años. Es una especie de planeación táctica. Los subtramos pueden ser escogidos de acuerdo a características físicas.

La programación comprende la preparación bajo restricciones presupuestarias, programas de gastos y de obras para varios años, en los que se seleccionan y analizan tramos de la red que necesitarán conservación, mejora o nueva construcción.

La programación es un ejercicio de planificación táctica. Idealmente, debería realizarse un análisis de costos-beneficios, para determinar la viabilidad económica de cada conjunto de las obras. En la fase de programación, la red de carreteras físicas se consideran itinerario a itinerario, con cada uno de ellos caracterizado por tramos homogéneos definidos en términos de atributos físicos.

La aplicación más típica es la preparación de un presupuesto para un programa de obras anual o plurianual en una red o subred de carreteras.

Los profesionales de nivel directivo de una organización de carreteras son los que normalmente suelen realizar las actividades de programación, quizás con un Departamento de Planificación.

3.4.1.3. Preparación

Esta es la fase de planificación a corto plazo, donde los planes de carreteras aprobados se agrupan para realizarlos. En esta fase, se refinan los diseños y se preparan con más detalle; se hacen listas de cantidades de trabajo y costes detallados, junto con instrucciones para las obras y contratos.

Es probable que se realicen las especificaciones, costos unitarios y también se puede realizar el análisis detallado de costes-beneficios para confirmar la viabilidad del esquema final. Las obras sobre tramos de carreteras adyacentes se pueden combinar en paquetes de un tamaño que sea rentable para ejecución la cual dependerá de la importancia, tamaño y especificaciones del proyecto.

Por ejemplo, construcción de un nuevo trazado o cambio de línea, ampliación de la sección transversal de la carretera, reconstrucción del pavimento, etcétera. Para estas actividades normalmente ya estarán aprobados los presupuestos.

Las actividades de preparación las suelen realizar profesionales y técnicos de nivel medio de un Departamento de Diseño o implantación de una organización de carreteras y por el personal de contratación y compras.

3.4.1.4. Operación

Estas actividades cubren la operación diaria de una organización. Las decisiones sobre la gestión de operaciones se suelen tomar de forma diaria o semanal, incluyendo la programación de las obras a realizar, la supervisión en términos de mano de obra, equipos y materiales, el registro de las obras finalizadas y el uso de esta información para supervisión y control.

Las actividades se centran normalmente en tramos o subtramos individuales de una carretera, haciéndose frecuentemente las mediciones con un nivel bastante detallado.

Las operaciones las suelen dirigir profesionales y subprofesional, como ingenieros supervisores, técnicos, encargados y otros. A medida que el proceso de gestión pasa de la planificación a operaciones, se verá que se producen cambios en los datos necesarios.

3.4.2. El ciclo de gestión

Tradicionalmente, en muchas organizaciones de carreteras, los presupuestos y programas de las obras se han preparado, según una base histórica, donde el presupuesto de cada año se basa en el del año anterior, con un ajuste para la inflación.

Bajo un régimen semejante, no hay forma de saber si los niveles de financiación o la asignación detallada de recursos son adecuados o justos, por lo que existe claramente la necesidad de un enfoque objetivo, basado en las necesidades reales, que use el conocimiento del contenido, estructura y estado de las carreteras que se están gestionando.

Se verá que las funciones de planificación, programación, preparación y operaciones proporcionan un marco adecuado en el que pueda aplicarse un enfoque basado en las necesidades existentes en los tramos carreteros gestionados.

Para llevar a cabo cada una de estas cuatro funciones de gestión, se recomienda un análisis integrado del sistema. Un enfoque adecuado es usar el concepto de ciclo de gestión que se ilustra en la figura 8.

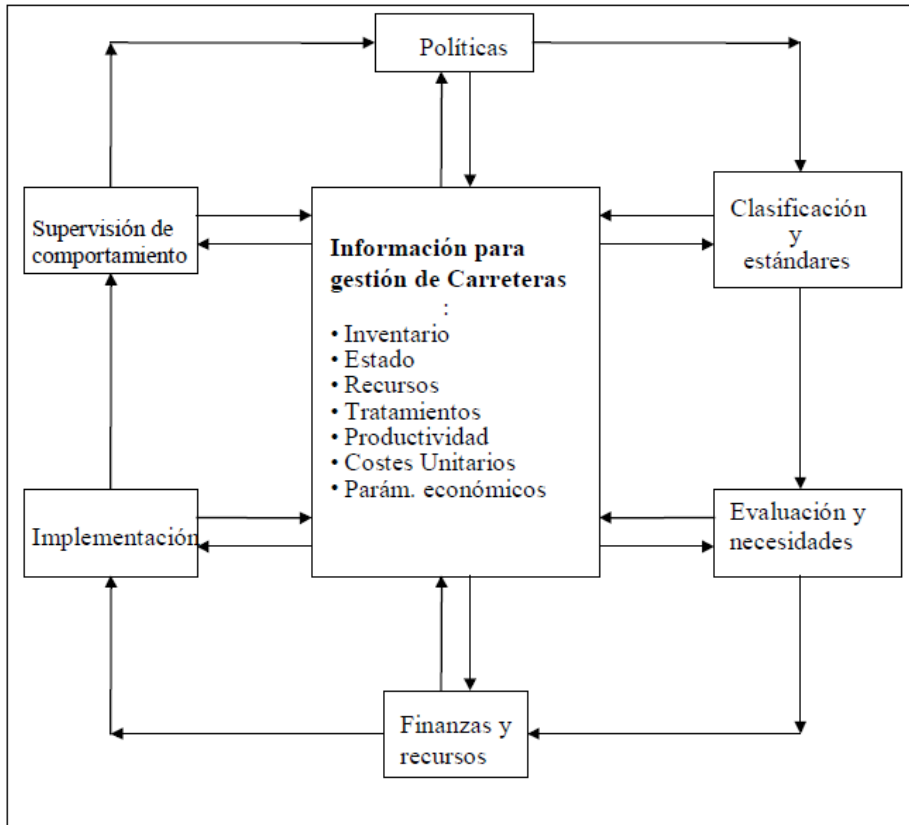
El ciclo proporciona una serie de pasos bien definidos que ayudan a tomar las decisiones del proceso de gestión.

El ciclo de gestión se realiza típicamente una vez al año o en un período presupuestario y que por lo general en Guatemala se preparan cada año.

3.4.3. Funciones de la gestión

El proceso de gestión de carreteras en su conjunto puede, por lo tanto, considerarse como un ciclo de actividades que se realizan dentro de cada una de las funciones de gestión: planificación, programación, preparación y operación. La tabla 5 describe este concepto y proporciona el marco en el que HDM satisface las necesidades de una organización de gestión de carreteras.

Figura 7. **Ciclo de gestión de carreteras**



Fuente: KERALI, Henry G. R. Visión general del HDM - 4. p. 18.

Tabla V. **Funciones de gestión y las aplicaciones HDM-4 correspondientes**

Función de gestión	Descripciones comunes	Aplicaciones HDM-4
Planificación	Sistema de análisis de estrategias	HDM-4: Análisis de estrategias
	Sistema de planificación de la red	
	Sistema de gestión del firme	
Programación	Sistema de análisis del programa	HDM-4: Análisis del programa
	Sistema de gestión del firme	
	Sistema presupuestario	
Preparación	Sistema de análisis del proyecto	HDM: Análisis del proyecto
	Sistema de gestión del firme	
	Sistema de gestión de puentes	
	Sistema de diseño del firme/refuerzo	
	Sistema de contratación	
Operaciones	Sistema de gestión del proyecto	(No cubierto por HDM-4)
	Sistema de gestión de la conservación	
	Sistemas de gestión de equipos	
	Sistemas de gestión financiera/contable	

Fuente: KERALI, Henry G. R. Visión general del HDM-4. p.19.

3.5. Aplicaciones del HDM

El Modelo HDM-4 es una importante herramienta de análisis para la evaluación técnica y económica de inversiones en construcción y conservación de redes de carreteras. Sucesor reciente del HDM-III presenta importantes novedades y mejoras respecto a la versión anterior que le hacen aplicable a redes de carreteras de cualquier nivel de tráfico.

El funcionamiento de la herramienta se basa en un modelo de cálculo de las relaciones físicas y económicas derivadas de un extenso estudio sobre el deterioro de las carreteras, el efecto de la conservación de las mismas y los costes de operación de los vehículos.

Las principales funciones del HDM-4 son el análisis de los deterioros y los efectos de la conservación de carreteras, para una serie de alternativas de conservación especificadas por el usuario de la aplicación.

Una herramienta como el HDM-4 puede usarse para realizar diversos tipos de análisis sobre una red de carreteras:

- En el área de la planificación y conservación de carreteras, el HDM-4 puede servir de ayuda para apoyar analíticamente la justificación de inversiones, pronosticar futuras necesidades financieras y físicas para preservar la infraestructura de carreteras o determinar estrategias de mantenimiento en función de los recursos disponibles.
- Existen una serie de aplicaciones auxiliares como pueden ser la determinación de umbrales económicos para mejoras en carreteras, la comparación de alternativas de diseño y conservación, el cálculo del coste del uso de la vía, la realización de estudios de determinación de impuestos en el sector de transporte, estudios de la determinación del peso por eje de los vehículos, el análisis de los efectos de modernizar el parque de vehículos, que amplían el espectro de posibles usos de un modelo de cálculo como el del HDM-4.

En el caso de la programación y planificación de inversiones en la conservación de redes de carreteras, la herramienta puede ayudar a la toma de decisiones sobre cuál es el programa óptimo de conservación y cuáles son los recursos necesarios para implementar el programa.

3.5.1. Análisis de estrategias

El concepto de la planificación estratégica de gastos en redes de carreteras a mediano y largo plazo exige que la organización de carreteras tenga en cuenta las necesidades de toda su red de carreteras.

De esa forma, el análisis estratégico abarcará redes completas o subredes gestionadas por una única organización. Ejemplos de redes de carreteras pavimentadas en Guatemala son las siguientes:

- Red vial primaria: tiene como propósito el facilitar y fortalecer la comunicación directa a nivel macro regional, entre las regiones, políticas continuas establecidas, según Decreto 70-86 (Ley Preliminar de Regionalización) e internacional al comunicar de y hacia los principales puertos marítimos y puertos fronterizos con los países vecinos, constituyendo la red básica de carreteras troncales o colaterales.

Actualmente, la red vial primaria está conformada por las rutas centroamericanas (CA), tramos específicos de rutas nacionales (RN) y rutas departamentales (RD), así como, la franja transversal del norte (FTN).

- Red vial secundaria: su objetivo es completar la red vial primaria, facilitando la comunicación regional, así como, proveer de una comunicación directa en lo posible entre las cabeceras de departamentos contiguos, orientadas a comunicar hacia y desde los mayores centros de población o producción conformando una red complementaria o alterna a la red vial primaria.

La constituyen la ruta CA-9 sur, en sus tramos: Palín - Escuintla y Escuintla-Puerto San José, rutas nacionales y rutas departamentales.

- Red vial complementaria: su propósito es el completar la red vial primaria y secundaria, proporcionando comunicación en la medida de lo posible entre cabeceras departamentales y sus respectivos municipios y aldeas. La misma está orientada a permitir el ingreso y egreso de insumos y servicios desde y hacia los centros de consumo y producción.

Para predecir las necesidades a medio y largo plazo de toda una red o subred de carreteras, HDM aplica el concepto de una matriz de red de carreteras que comprende las categorías de la red definidas en función de los atributos clave que más influyen en el comportamiento del firme y en los costes de los usuarios.

Aunque es posible crear modelos de tramos parciales de carreteras, en la aplicación del análisis estratégico, teniendo en cuenta que la mayoría de las administraciones suelen ser responsables de varios miles de kilómetros, resulta muy laborioso modelar individualmente cada segmento de carretera.

Los usuarios de HDM pueden definir la matriz de la red de carreteras de forma que represente los factores más importantes que afectan a los costes de transporte en el país. Una matriz típica de red de carreteras se podría clasificar en función de lo siguiente:

- Volumen de tráfico o carga
- Tipos de rodadura
- Estado de la rodadura

- Zonas medioambientales o climáticas
- Clasificación funcional (si es necesaria)

El análisis estratégico se puede usar para analizar una determinada red en su conjunto y preparar estimaciones para planificación de necesidades de gasto para desarrollo y conservación de carreteras a medio y largo plazo, bajo diferentes supuestos presupuestarios.

Aplicaciones típicas del análisis estratégico para las administraciones de carreteras:

- Previsiones a medio y largo plazo de necesidades de financiamiento para cumplir con unos estándares de conservación establecidos en una red de carreteras específicos.
- Previsiones de comportamiento a largo plazo de redes de carreteras con diferentes niveles de financiamiento.
- Asignación óptima de fondos, según partidas presupuestarias definidas; por ejemplo, conservación rutinaria, conservación periódica y presupuestos de desarrollo (capital).
- Asignaciones óptimas de fondos a subredes; por ejemplo, por tipo funcional de carretera (primarias, secundarias y complementarias, etcétera) o por región administrativa o departamental.

- Los estudios de políticas como el impacto de los cambios en el límite de carga por eje, estándares de conservación del pavimento, análisis de equilibrio energético, provisión de instalaciones para el tráfico no motorizado, tamaño sostenible de la red de carreteras, evaluación de estándares de diseño de pavimentos, etcétera.

3.5.2. Análisis del programa

Trata principalmente sobre la asignación de prioridades a una larga lista definida de proyectos de carreteras candidatos para un programa de obras de uno o más años, bajo restricciones presupuestarias definidas.

Es esencial tener en cuenta que aquí se trata con una larga lista de proyectos candidatos, seleccionados como segmentos discretos de una red.

Los criterios de selección dependerán normalmente de los estándares de conservación, mejora o desarrollo que pueda haber definido la agencia de carreteras (por ejemplo, a partir de los resultados de la aplicación del análisis de estrategias). Como ejemplos de criterios de selección que se pueden usar para identificar proyectos candidatos se incluirá:

- Umbrales de conservación periódica (por ejemplo, resellado de la superficie de rodadura o sello de grietas cuando el daño es del 20%).
- Umbrales de mejora (por ejemplo, ampliar el ancho de las carreteras a una relación volumen/capacidad superior al 0,8).

- Estándares de desarrollo (por ejemplo, mejorar las carreteras de grava a un doble tratamiento superficial DTS si la media anual de tráfico diario (TPD) excede de 200 vehículos por día).

Una vez identificados todos los proyectos candidatos, la aplicación de análisis de programa HDM, se puede usar para comparar los costes del ciclo de vida previstos bajo el régimen existente de conservación del pavimento (es decir, el caso sin proyecto) frente a los costes del ciclo de vida previstos para las alternativas de conservación periódica, mejora de carreteras o desarrollo (es decir, caso con proyecto).

Esto proporciona la base para estimar los beneficios económicos que se derivarían de incluir en todos los proyectos candidatos en el marco de tiempo del presupuesto.

Hay que tener en cuenta que la diferencia entre análisis de estrategias y análisis de programa es la forma en que los itinerarios y tramos de carreteras se identifican físicamente.

El análisis del programa trata de itinerarios y tramos individuales que son unidades físicas únicas identificables en la red, de carreteras mediante el análisis.

Tanto para el análisis de estrategias como para el de programa, el problema se puede plantear como la búsqueda de aquella combinación de alternativas de tratamiento en varios tramos de la red, que optimiza una función objetiva bajo una restricción presupuestaria.

La relación Beneficio/Costo satisface el objetivo de maximizar los beneficios económicos para cada unidad de gasto adicional (es decir, maximizar los beneficios netos para cada Q1,00 de presupuesto disponible invertido).

3.5.3. Análisis del proyecto

El análisis de proyecto tiene relación con lo siguiente:

- Evaluación de uno o más proyectos de carreteras u opciones de inversión.
- La aplicación analiza un itinerario o tramo de carretera con los tratamientos seleccionados por el usuario, con los costes y beneficios asociados, proyectados anualmente a lo largo del período del análisis.
- Los indicadores económicos vienen determinados por las diferentes opciones de inversión.

Se puede usar el análisis de proyecto para estimar la viabilidad económica o técnica de los proyectos de inversión en carreteras, considerando los puntos siguientes:

- Comportamiento estructural de la estructura de pavimento.
- Previsiones de ciclo de vida del deterioro de la carretera, efectos y costes de las obras.

- Costes y beneficios de los usuarios y comparaciones económicas de las alternativas al proyecto.

Los proyectos de análisis típicos incluyen la conservación y rehabilitación de carreteras existentes, modelos de ampliación en ancho y mejoras geométricas, mejora de la capacidad estructural del pavimento y nueva construcción.

Las relaciones de costes de usuarios incluyen los impactos sobre la seguridad de las carreteras. En términos de necesidades de datos, la diferencia clave entre los análisis de estrategias y de programa, con los de análisis de proyecto, está en el detalle con que se definen los datos.

3.6. Necesidad de datos

La utilización del sistema como herramienta de ayuda para la definición de estrategias, programas y proyectos de conservación, conlleva una serie de trabajos previos de incorporación de datos al sistema. Fundamentalmente se debe disponer de información sobre:

- Los tramos de carretera que forman la red, será necesario disponer de datos sobre sus características geométricas, su estado de deterioro y su nivel de tráfico y las previsiones de crecimiento del mismo, así como, su distribución horaria.
- La composición del parque de vehículos, definiéndose para los distintos tipos, las características físicas y de utilización, así como, la valoración económica de los componentes del vehículo y el valor del tiempo de los usuarios.

- Los estándares de conservación y mejora de las carreteras, definiéndose cuáles son los efectos sobre el estado de la carretera y una valoración económica de su costo unitario.
- Por último debe disponerse de información sobre las características climáticas de la zona en estudio.

3.6.1. Visión general

Las aplicaciones HDM han sido diseñadas para trabajar con una amplia gama de tipos y calidades de datos. Por ejemplo, los datos del estado del pavimento recogidos en inspecciones visuales según las distintas condiciones (por ejemplo, muy bueno, bueno, regular o malo) se pueden convertir a las necesidades del modelo HDM antes de ejecutar cualquiera de las aplicaciones. De forma similar, HDM puede trabajar con medidas detalladas del estado de la estructura de rodadura, si se dispone de los datos.

Esta flexibilidad en los datos requeridos debe permitir a todos los usuarios potenciales con datos distintos integrar HDM en sus funciones de gestión de carreteras.

3.6.2. Configuración de HDM

Como HDM se utilizará en muy distintos entornos, la configuración de HDM proporciona funciones para personalizar la operación del sistema y para reflejar la normativa habitual en el entorno estudiado.

Los datos por defecto y los coeficientes de calibración se pueden definir de manera flexible para minimizar la cantidad de datos que se deben cambiar para cada aplicación de HDM, sin embargo, este proceso de calibración requiere consistencia en políticas de conservación o construcción de carreteras, debido a que la exactitud y precisión en la calibración del HDM es el éxito en la toma de decisiones sobre los indicadores y resultados que el programa pueda proveer.

Con HDM se suministran valores por defecto, pero todos ellos los puede definir el usuario y se proporcionan funciones para modificarlos. El conjunto de herramientas de HDM se pueden usar como módulos adicionales a los actuales sistemas de gestión de pavimentos.

3.6.3. Redes de carreteras

Redes de carreteras proporcionan las funciones básicas para almacenar las características de uno o más tramos de carretera. Permite a los usuarios definir diferentes redes y subredes y definir tramos, que es la unidad fundamental de análisis. Las entidades de datos permitidas en la red de carreteras son:

- Tramos: tramos de carretera en los que las características físicas son razonablemente constantes.
- Itinerarios: comprenden uno o más tramos en los que el tráfico es razonablemente constante. Esto se ofrece para propósitos de compatibilidad de la red, referenciando el sistema con sistemas existentes de gestión de firmes.

- Nodos: intersecciones que conectan itinerarios u otros puntos en los que hay un cambio significativo en el tráfico, en las características de los vehículos o en los límites administrativos.

Todos los datos de la red se introducen usando la carpeta red de carreteras y también existen funciones para edición, borrado y mantenimiento de estos datos.

3.6.4. Parque de vehículos

Parques de vehículos proporciona funciones para almacenamiento y recuperación de las características de vehículos, necesarias para calcular velocidades, costes de operación, costes de tiempos de viaje y otros efectos.

El método utilizado para representar un parque de vehículos es considerablemente adaptable y no tiene límites al número o tipo de vehículos que se pueden especificar. Se incluyen vehículos a motor y no motorizados.

Se pueden definir diversos juegos de parques de vehículos para usarlos en diferentes análisis, suministrándose una amplia gama de datos por defecto.

3.6.5. Obras

Estándares de obras se refiere a los objetivos o niveles de condiciones y respuesta que se propone conseguir una organización de gestión de carreteras.

Las organizaciones de carreteras suelen definir diferentes estándares que se pueden aplicar en situaciones prácticas para satisfacer objetivos concretos que están relacionados con las características funcionales del sistema de la red de carreteras.

La carpeta obras proporciona funciones, dentro de un marco flexible, para definir una lista de estándares de conservación y mejora que son observados por organizaciones de carreteras en la gestión de su red y en actividades de desarrollo. Los estándares definidos en la carpeta estándares de obras se pueden usar en cualquiera de las tres herramientas de análisis: análisis de proyecto, análisis de programa y análisis de estrategias.

4. APLICACIÓN DEL HDM A UN PROYECTO DE CARRETERAS

4.1. Costo del sistema de transporte por carretera

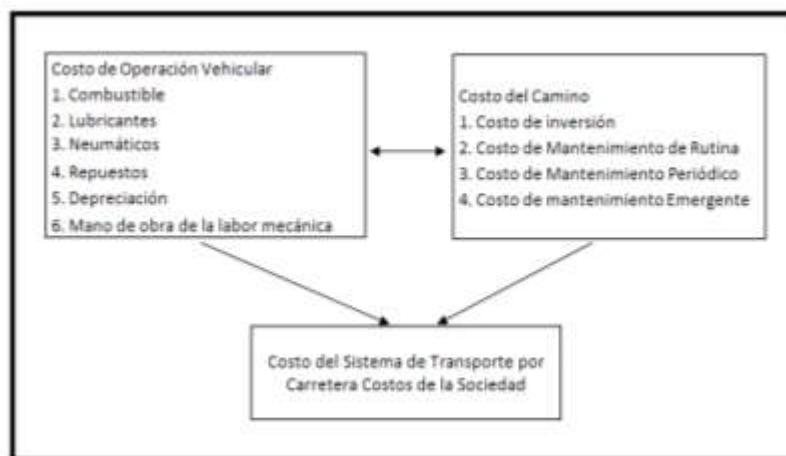
La DGC considera importante los siguientes elementos (figura 9), para involucrar los costos del sistema de transporte en la evaluación económica.

Los costos provenientes del sistema de transporte por carretera se comparan con los beneficios que un buen nivel de servicio que pueda dar la inversión que se estimará. Tales beneficios pueden considerarse los siguientes:

- Disminuir los costos de operación vehicular
- Estimular el desarrollo económico
- Ahorro en el tiempo de viaje de pasajeros y carga
- Disminuye los accidentes
- Mejor comodidad y conveniencia
- Integración nacional más efectiva
- Seguridad nacional
- Mejor distribución de ingresos

- Prestigio del país
- Facilitar la obtención de servicios básicos; como salud, educación y mejor calidad de vida
- Desarrollar el comercio en la zona
- Mejorar el uso de la tierra
- Facilitar la llegada de insumos agrícolas

Figura 8. **Costos del sistema de transporte por carretera**



Fuente: ELÍAS, Ariel. Presentación de evaluación económica, diapositiva No.7.

4.2. Técnicas de conservación y mantenimiento de carreteras

Este apartado tratará de describir algunas de las técnicas más usadas en la conservación de pavimentos, con las cuales se pretende conservar la carretera en condiciones similares a las especificaciones de diseño, tomando en cuenta su estructura, superficie de rodamiento, acotamientos, drenaje, puentes, taludes y cortes, derechos de vía y señalización vertical y horizontal. Es importante saber cuáles son las técnicas más comunes.

En el programa Nacional de Conservación de carreteras se contemplan los siguientes rubros principales:

- Reconstrucción de tramos
- Reconstrucción de puentes
- Conservación periódica
- Conservación primaria

La reconstrucción de tramos es una actividad de costos, debido a que se trata de reconstruir la estructura en forma parcial o total, adicionando productos asfálticos, Cemento Portland, pétreos y aditivos. Esta actividad comprende la recuperación de parte del pavimento existente, tratamiento de la zona descubierta, tendido de la parte recuperada; restitución o reparación de obras menores, instalación de sistema de drenaje, etcétera. Generalmente, se considera vida útil de 15 años a estos trabajos.

La conservación periódica incluye todas las obras de rehabilitación que se necesita implementar para que un camino ofrezca las condiciones adecuadas de servicio, como pueden ser: recuperación de pavimentos, renivelación, tratamientos superficiales, bacheo, reconstrucción de terraplenes, rehabilitación de bases, reconstrucción de carpetas, riegos de sello, restitución de señalamiento horizontal y obras de prevención de derrumbes.

Por su parte la conservación rutinaria incluye aquellas acciones que corrigen las fallas producidas por la repetición continua de cargas y por agentes climáticos que disminuyen en nivel óptimo de operación de la carretera. Los trabajos rutinarios se clasifican de acuerdo a la parte de la carretera donde se efectúan.

Otro rubro es el de los tratamientos superficiales, cuyo objetivo es el de lograr una superficie antiderrapante. Entre ellos se puede mencionar el riego de sello tradicional, el riego de sello premezclado, las carpetas delgadas de graduación abierta y cerrada.

Cada una de las actividades de mantenimiento, en su mayoría, tienen un costo unitario por kilómetro, el cual es introducido por el analista y es el costo usado por el HDM-4 para modelar el flujo de costos de la aplicación de la tarea de conservación. El HDM-4 contiene los llamados estándares de conservación, los cuales son un grupo de tareas de conservación que son las técnicas de mantenimiento; igualmente hay estándares de mejora, que incluyen tareas como reconstrucción total del pavimento y que cambian la estructura de este.

Los riegos de sello son actividades muy comunes en la consevación de carreteras. El HDM-4 contempla dos tipos de aplicaciones de sellos. Estas sirven para reparar los daños superficiales cuando alcanzan proporciones tales que no pueden ser tratados con sellos preventivos, pero tienen un efecto pequeño en cuanto a corrección de irregularidad y aporte estructural. Los sellos contemplados son el tratamiento superficial y la lechada asfáltica o mortero asfáltico.

Adicionalmente, el modelo de una tercera opción para incorporar junto al tratamiento superficial la corrección del perfil longitudinal, con lo que se contempla no sólo la colocación del sello, sino también el relleno de las depresiones y la reparación de las áreas severamente dañadas. En todos los casos el modelo supone que el material aplicado es de tipo asfáltico, con un espesor total menor a 5 centímetros y colocado con un nivel de calidad inferior al que se obtiene con una pavimentadora con control automático de nivel. El efecto principal de la aplicación de los sellos es la eliminación de las áreas de agrietamiento (incluyendo las de grietas anchas) y la eliminación total de las áreas de baches y desprendimientos.

La aplicación de los riegos de sello está subordinada al criterio del analista y generalmente es una opción muy recurrida como tarea rutinaria.

Sobrecarpetas: son una de las actividades que más ayudan para reducir el IRI de un pavimento. De hecho, en las gráficas del estado de la carpeta que arroja el HDM-4, la aplicación de las sobrecarpetas tiene asociada siempre una caída brusca de las gráficas.

En general, las sobrecarpetas modelados con el HDM-4 son de espesores inferiores a 5 pulgadas (125 milímetros), colocadas en una sola capa. La segunda restricción puede ser obviada pues, aunque se coloquen dos capas, estas pueden modelar como una sola. En cuanto al espesor el programa no restringe la entrada de espesores mayores, estos no han sido modelados por lo que su contribución no es proporcional al espesor adicional.

Hay varios tipos de sobrecarpetas que maneja el HDM-4, todos colocados con pavimentadoras mecánicas y son:

- Mezcla asfáltica en frío de graduación abierta colocada con control manual de nivel.
- Mezcla asfáltica en caliente con control manual de nivel.
- Mezcla asfáltica en caliente colocada con control automático de nivel.

Acercas de la capacidad estructural del pavimento, una vez considerado el efecto de agrietamiento, el modelo pasa a actualizar los parámetros de resistencia (número estructural y deflexión), tomando en cuenta la contribución de la nueva capa en términos de su espesor y de su coeficiente estructural. En el caso de la irregularidad, esta se reduce a un valor estimado por el modelo o definido por el usuario.

Reconstrucción: como se mencionó anteriormente, el HDM-4 permite la elaboración de estándares de mejora y una de las tareas principales dentro de estos estándares es la reconstrucción.

La reconstrucción del pavimento se aplica en el modelo HDM a todos aquellos trabajos que requieren una nueva especificación del tipo de base y superficie de rodamiento, así como, de los espesores y parámetros de resistencia de estos.

Entre los trabajos típicos evaluados con esta opción están:

- La reconstrucción normal de un pavimento cuyo estado superficial o capacidad estructural no son adecuados para el nivel de servicio deseado.
- La colocación de múltiples capas de carpetas asfálticas que sumen más de 125 milímetros (5 pulgadas).
- El reciclaje de las capas de rodadura o de las capas de base.
- El uso de geotextiles o membrana con las sobrecarpetas.

El efecto neto de la reconstrucción, es la nueva definición del tipo de superficie y del tipo de base con sus nuevas características estructurales y superficiales. Estas pueden ser idénticas a las características previas a la reconstrucción. Luego de una reconstrucción el modelo coloca en cero las variables correspondientes al agrietamiento, desprendimientos, baches y profundidad de roderas.

4.3. Indicadores del comportamiento estructural del pavimento

El HDM-4 es un programa que correlaciona los costos que se originan al aplicar una acción de conservación, ya sea programada o correctiva. Para su correcta aplicación, es necesario el estudio del comportamiento del pavimento, y tanto se necesitan datos de entrada como se generan datos de salida. A continuación se mencionarán algunos de estos conceptos.

4.3.1. Número estructural, deformación bajo carga

El número estructural es un factor que determina la condición estructural de un pavimento asfáltico, considerando las diferentes capas que contenga y los espesores de estas. La metodología consiste en determinar el coeficiente estructural de cada capa y multiplicarlo por su espesor expresado en pulgadas, posteriormente se suman todas las aportaciones. El ambiente del HDM-4 permite calcular este número estructural o ingresarlo de bases de datos disponibles. Este factor importante, es introducido al analizar cada tramo en particular y los resultados que arroja el programa muestran su comportamiento en los diferentes años del período de análisis.

4.3.2. Irregularidad e índice internacional de irregularidad (IRI)

Este es uno de los índices más importantes que se consideran para evaluar el estado de los pavimentos. Dentro del DHM-4 se obtiene a partir de las mediciones de los diferentes defectos del pavimento, ya sea baches, desprendimientos, agrietamientos, etcétera y muestra en forma general la condición de la carretera. En pocas palabras este índice engloba la condición actual de un pavimento y tiene, naturalmente, ciertos niveles o límites que se consideran permisibles y que están ya incluidos en la base de datos del HDM-4.

Básicamente, la irregularidad es una característica inherente de la superficie de rodamiento determinada por los defectos presentes tanto en forma transversal como longitudinal. Estas irregularidades se manifiestan como desviaciones con respecto a un plano perfecto sobre el cual en teoría podría desplazarse un vehículo. Como aspecto práctico, se hace caso omiso a las irregularidades existentes sobre la calzada pero que no se encuentran en la trayectoria de los vehículos.

En este sentido, las irregularidades de interés para la medición de la rugosidad son las presentes en las roderas del camino. Las irregularidades presentes en el camino a lo largo de la trayectoria de los vehículos pueden ser de muy variada naturaleza.

Las de interés para efectos de medición y evaluación de las carreteras son aquellas asociadas con el deterioro de las mismas (baches, deformaciones, hundimientos, etcétera), ya que estas son las que tendrán un mayor impacto en los costos de conservación de la vía y en los costos de operación de los vehículos.

El desarrollo del IRI a lo largo del período de análisis, es un factor muy importante y generalmente da la pauta para la aplicación de algún tratamiento especial en la carretera como puede ser una sobrecarpeta en el caso de tener un IRI muy alto. El HDM-4 pide un índice actual de la carretera y se le proporciona para los diferentes tramos. Al final del análisis el programa arroja gráficas de la evolución del IRI para cada tramo y para cada año.

Esto se calcula dependiendo los factores de tránsito, clima, número estructural, etcétera, que se ingresaron al definir cada tramo de carretera. Un índice demasiado elevado o que pase de los parámetros establecidos, conducirá a la aplicación de una tarea de conservación o de un estándar complejo, dependiendo de la alternativa.

En conclusión, una correcta determinación y posterior evaluación del IRI a lo largo de la vida del proyecto ayuda a elegir entre alternativas y a entender el comportamiento de otros indicadores, principalmente los económicos y al mismo tiempo, es indispensable para que el programa elija cuándo aplicar las tareas de conservación que se han definido en la alternativa.

4.4. Creación de estándares de conservación

En esta parte se procede a editar estándares existentes o a crear los propios para el proyecto. Un estándar de conservación o de mejora, está constituido por diferentes tareas de conservación que están determinadas en el HDM-4 y el analista debe buscar las correspondientes a las acciones comúnmente aplicadas. Las tareas por incluir en los estándares aparecen en menús del HDM-4, dependiendo del tipo de pavimento que se haya elegido: mezcla asfáltica o concreto hidráulico.

Las tareas que se asignen a cada estándar de conservación, tales como: riego de sello, bacheo, mortero asfáltico, sellado de grietas, etcétera, pueden ser modificadas en sus parámetros de diseño, intervención, costos y efectos, de acuerdo a los objetivos del analista y el tipo de proyecto que se trate en la realidad.

4.5. Elección del módulo HDM-4

En esta parte es donde se elige el módulo de HDM-4 a utilizar: análisis de estrategia, de programa o de proyecto. Para este caso es en el módulo de proyecto donde se va a trabajar, ya que se pretenden evaluar diferentes alternativas de conservación aplicadas a un tramo de carretera. En esta parte, se integra la información definida en los pasos anteriores y se crean con ella las diferentes alternativas.

Se selecciona la opción de nuevo proyecto, en primer lugar, se tiene que elegir la red de carretera a usar y el tránsito que se manejará. Las características iniciales de un proyecto nuevo son: año de inicio, período de análisis, red de carreteras, conteo o parque de vehículos.

Posteriormente, después de definir estas características iniciales, se procede a seleccionar los tramos de la red de carreteras. En este caso se seleccionan todos los subtramos con los que cuenta el tramo definido. De igual manera se seleccionan los tipos de vehículos que se usarán. Por último, se definen los porcentajes de cada tipo de vehículo en el flujo vehicular y la tasa de crecimiento para cada uno de ellos.

4.6. Creación de las alternativas de conservación

La siguiente parte del análisis de proyecto, consiste en crear y editar las alternativas de conservación. Cada alternativa incluye una red de carreteras, que ha sido seleccionada anteriormente con los subtramos correspondientes, de la misma manera que el tránsito y sus características. En esta sección es donde se asignan a cada subtramo los estándares de conservación deseados e incluso hay la posibilidad de seguir editando los estándares junto con sus tareas, sin tener que regresar a secciones anteriores.

Siempre hay que formular una alternativa base, que servirá como referencia para realizar el análisis económico.

A todas las alternativas se les asigna la misma red de carreteras con los subtramos correspondientes, lo que varía son los estándares asociados.

A la alternativa base se le pueden asignar tareas mínimas o ninguna acción de conservación. De igual manera se generan las demás alternativas, asignando los estándares de conservación deseados, combinados de la manera que se desee. Se hace notar que basta con modificar un estándar para que una alternativa sea diferente del resto y que arroje resultados diferentes en términos de eficiencia técnica y factibilidad económica.

4.7. Análisis de proyecto

En esta parte, simplemente se define la alternativa que va a servir como base, se selecciona la opción para realizar el análisis económico, se especifica la moneda y se ejecuta el análisis.

4.8. Generación de informes

Esta opción permite tener acceso a los informes producidos por el análisis. Se incluyen tablas y gráficas del comportamiento futuro de la carretera en el período de tiempo que se seleccionó, las cuales permiten apreciar el impacto de las acciones de conservación sobre el estado del pavimento. Asimismo, se incluyen gráficas de efectos sobre los usuarios y las gráficas del análisis económico. Los informes se encuentran clasificados de la siguiente manera:

Informes de deterioro/trabajos:

- Calendario de actuaciones (por año)
- Calendario de actuaciones (por tramo)
- Estado anual de la carretera (hormigón)
- Estado anual de la carretera (sin pavimentar)
- Estado anual del drenaje
- Gráfico de regularidad media por alternativa de proyecto
- Gráfico de regularidad media por tramo
- Gráfico del estado anual de la carretera (pavimento bituminoso)

Tráfico:

- Gráfico de intensidad media diaria por alternativa de proyecto
- Gráfico de intensidad media diaria por tramos
- Intensidad de tráfico para tráfico no motorizado (TNM)
- Intensidad de media diaria (TNM)
- Relación volumen capacidad por períodos (con gráfico)

- Tránsito motorizado (TM): intensidad de tráfico y carga
- Tráfico horario de TM por período
- Efectos sobre el usuario
- Velocidad de los vehículos
- Intensidad del tráfico
- Consumo vehicular de recursos
- Efectos de tiempos
- Seguridad en la carretera
- Efectos ambientales
- Emisiones de los vehículos
- Cambio neto en las emisiones de los vehículos
- Niveles de ruido del tráfico
- Uso de energía

Flujo de costos:

- Beneficios netos anuales descontados (actualizados)

- Comparación de costos
- Flujos de costos anuales de la administración y del usuario (descontados)
- Flujos anuales de costos de la administración y del usuario (sin descontar)
- Relaciones beneficio costo
- Resumen del análisis económico

4.9. Resultados importantes a considerar

De todos los resultados que se pueden considerar más útiles para la sección de una alternativa generada por un análisis de proyecto son los siguientes:

4.9.1. Del deterioro y efectos de la carretera

Estado anual de la carretera (rodadura bituminosa):

Se presentan tablas del comportamiento de cada subtramo año con año con los efectos de las alternativas de conservación. Los parámetros evaluados son:

- Número estructural medio.
- Regularidad (IRI) (metro/kilómetro).

- Área fisurada (%): total estructural, ancha estructura, transversal térmica y fisuración total.
- Área de desprendimientos en %.
- Baches: número de baches por kilómetro, área (%).
- Área de rotura de borde (metros cuadrados por kilómetro).
- Roderas: profundidad media de roderas (milímetros), desviación estándar de la profundidad de roderas.
- Textura (milímetros).
- Resistencia al deslizamiento.

Cada uno de estos valores se muestra al final de cada año y van variando de acuerdo a la aplicación de los estándares de conservación.

Gráfico de regularidad media por alternativa de proyecto:

Muestra una gráfica con el IRI en las ordenadas y los años en las abscisas de cada alternativa. No se muestra el comportamiento individual de cada tramo, sino que se obtiene una ponderación de los valores de acuerdo a la longitud de los tramos.

Gráfico de regularidad media por tramos:

Se muestran las gráficas del comportamiento físico para los diferentes tramos año con año. En estas gráficas se pueden apreciar claramente los efectos de las acciones de conservación sobre el IRI y se puede comparar qué factor produce una mayor duración de la carretera.

Gráfico del estado anual de las carreteras (pavimentos bituminosos):

Son gráficas muy parecidas a las anteriores pero, en este caso, se incluye a varios de los parámetros que describen la condición del pavimento (agrietamiento, baches, etcétera).

4.9.2. Flujo de costos

- Beneficios netos anuales

Se genera una tabla que muestra los beneficios de los tramos de carretera año con año, así como, los costos de la administración. Al final se obtienen los beneficios netos totales descontando los costos de la administración y sumando el ahorro de costos de los usuarios producidos por la alternativa desarrollada. Los beneficios incluyen: ahorros en costos de operación, reducción de costos por accidentes, beneficios exógenos, etcétera.

- Comparación de costos

Se presenta un resumen de la sección anterior incluyendo cada tramo y cada año mostrando los beneficios netos al final de cada año.

- Flujo de costos anuales de la administración y del usuario

Se genera una tabla que incluye los costos mencionados para cada tramo y cada año, tanto de la alternativa base como de las alternativas evaluadas.

- Relaciones beneficio – costo

Se genera una tabla muy sencilla que resume los costos totales de las alternativas, sus beneficios, el VPN, la razón costo – beneficio y la TIR, no se incluye el análisis tramo por tramo, sino solamente el análisis de la alternativa completa.

Es importante mencionar que puede existir un análisis social o un análisis de razonabilidad, para determinar si es viable el proyecto, pero este no será el caso de estudio, debido a que existen intereses políticos y sociales cuando se quiere implementar una mejora de un camino aunque no exista una inversión real de los recursos, por lo que se utilizará únicamente para considerar un enfoque técnico y económico.

Un concepto generalizado de la evaluación económica en la cual se comparan los costos contra los beneficios durante la vida útil del proyecto y de ahí parte el concepto de viabilidad, es decir, un proyecto empieza a ser viable económicamente cuando los beneficios son mayores que los costos.

El proyecto considerado se analizó como ejemplo de aplicación del HDM-4 y específicamente para definir en qué consiste la evaluación técnica y económica, identificar los elementos necesarios para evaluar un proyecto y explicar la metodología del HDM-4 para obtener resultados.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO COMITANCILLO – SAN LORENZO – SANTA IRENE

5.1. Antecedentes

El propósito fundamental al ejecutar esta carretera es dar conectividad uniendo diversas comunidades del departamento en condiciones satisfactorias de confort, seguridad y sobre todo que las alternativas constructivas dejen una obra con una excelente calidad y durabilidad con visión a largo plazo.

Las carreteras de estas áreas, se localizan en terrenos generalmente ondulados a montañosos, con pendientes empinadas que superan el 6-7%, altas precipitaciones estacionarias, numerosas curvas, que hacen que el mantenimiento de las mismas demande soluciones largoplacistas y que minimicen la inversión recurrente que generalmente se ignora en estos sitios remotos.

Las experiencias en carreteras de este tipo en Guatemala (en áreas similares a las de este proyecto) que han sido mejoradas de rurales-terracería a pavimentadas, demuestran que las soluciones en concreto asfáltico o hidráulico son una única opción en curvas y ascensos/descensos, si se desea postergar el mantenimiento rutinario y minimizar sus costos al mediano y largo plazo.

Este tipo de soluciones deben ir acompañadas de inversiones fuertes en sistemas de drenajes longitudinales revestidos y transversales a lo largo de la carretera pero especialmente en curvas y ascensos.

Las experiencias con tratamientos superficiales en este tipo de condiciones geográficas, no son duraderas debido a que los mismos tienden a pelarse en las subidas y curvas con un tráfico pesado de baja a mediana frecuencia. Este fenómeno se agudiza dado el tipo de suelo de origen volcánico (limos de baja plasticidad) que fomenta una baja adhesión entre la capa de base y la fina capa asfáltica.

La postergación generalizada del mantenimiento, hace que esta última solución no tenga la vida de servicio que en general se estima, siendo esta fuertemente acortada.

Es por ello, que todo análisis de inversión debe conjugar varios parámetros dentro de un marco que contemple aspectos técnicos (que incluyan las experiencias ya pagadas), económicos, sociales y políticos para configurar proyectos considerando alternativas de construcción y mejoramiento que sean realistas con su entorno.

5.2. Descripción del proyecto Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene longitud 26,02 kilómetros

Inicia en la cabecera municipal de Comitancillo pasa por San Lorenzo y termina en Santa Irene donde entronca con la Ruta Nacional 12, con una longitud de 26,0 kilómetros.

El ancho de la capa de rodadura es de 4,5 metros en promedio, es por ello, que la velocidad de operación vehicular varía entre 15 y 20 kilómetros por hora, el tiempo de recorrido de la ruta fue de 60 minutos, para recorrer una distancia de 26,0 kilómetros, lo que supone una velocidad promedio de 26,0 kilómetros por hora, con la ejecución del proyecto se espera ampliar la velocidad a 50 kilómetros por hora aproximándose a la velocidad de una sección típica E, suponiendo un recorrido de 31 minutos ahorrando un total de 29 minutos o sea media hora aproximadamente. Favoreciendo el ahorro del tiempo del ocupante.

A lo largo del tramo de San Lorenzo a Santa Irene existen dos puentes y tuberías transversales. Las cunetas existentes no tienen revestimiento de cemento.

En tanto que a lo largo de San Lorenzo a Comitancillo existen dos puentes de concreto de 4,0 metros de ancho de una sola vía localizados en las proximidades de la cabecera municipal de Comitancillo y tuberías transversales.

Las cunetas no tienen revestimiento de cemento.

A lo largo de Santa Irene a Río Blanco existe un puente y tuberías transversales. Las cunetas no tienen revestimiento de cemento.

La flota vehicular registrada en este tramo es de 600 vehículos diarios, el 74,17% (445 unidades son vehículos livianos y 25,83% (155 unidades) son vehículos pesados.

La longitud del tramo es de 26,02 kilómetros, se desarrolla en una topografía plana y semiplana a una altura de 2 620 metros sobre el nivel del mar y su clima es frío.

La precipitación pluvial de la zona oscila entre 2 000 y 3 000 milímetros anuales, situación que induce a un mantenimiento permanente de la ruta, puesto que de lo contrario el deterioro se acelera y genera molestias a los usuarios.

El mantenimiento actual de la ruta está a cargo de la Coordinadora de Mantenimiento Vial, (COVIAL) que tiene a su cargo el sostenimiento del proyecto.

Con la ejecución del proyecto se está beneficiando directamente a la población de San Lorenzo y Comitancillo, que en total suman 68 362 habitantes, quienes tendrán un mejor acceso hacia la Ruta Nacional 1, que proporciona acceso hacia las cabeceras departamentales de San Marcos y Quetzaltenango.

La distancia de San Lorenzo hacia la ciudad capital de Guatemala es de 260 kilómetros y para la cabecera departamental de San Marcos de 26 kilómetros.

Las características generales de la zona de influencia se detallan a continuación y el estado actual del tramo se observará en las figuras 9,10 y 11.

Tabla VI. **Características del proyecto**

Características	Comitancillo	San Lorenzo
Código Municipal	1 204	1 229
Altitud (Metros sobre Nivel del mar)	2 280	2 620
Latitud	15 05'20"	15 01'55"
Longitud	91 44'55"	91 44'152"
Precipitación (mm anuales)	3 000	3 000
Clima	Frío	Frío
Humedad relativa (%)	80	80
Días de lluvia (total anual)	160	160
Temperatura (Grados anuales)	20	20
Brillo solar (Horas/sol)	220	220
Hoja cartográfica	G-02	G-03
Extensión territorial kilómetros cuadrados	113	25
Población censo 1981	25 080	5 389
Población censo 1994	36 478	8 292
Población censo 2002	46 371	9 714
Población censo 2009	57 205	11 157
Tasa de crecimiento 81-94	2,92%	3,37%
Tasa de crecimiento 94-02	3,05%	2,00%

Fuente: Dirección General de Caminos de Guatemala (D.G.C.). 2do Programa de caminos rurales y carreteras principales – Préstamo BIRF 7169-GU. p. 35.

Tabla VII. **Velocidad de diseño, según tipo de sección**

T.P.D.A De	Carretera	Velocidad de diseño (km)	Radio mínimo (m)	Pendiente máxima (%)	Ancho de calzada (m)
3000.00 A 5000.00	TIPO "A"				2 x 7.20
	Llanas	100.00	375.00	3.00	
	Onduladas	80.00	225.00	4.00	
	Montañasas	60.00	110.00	5.00	
1500.00 A 3000.00	TIPO "B"				7.20
	Llanas	80.00	225.00	6.00	
	Onduladas	60.00	110.00	7.00	
	Montañasas	40.00	47.00	8.00	
900.00 A 1500.00	TIPO "C"				6.50
	Llanas	80.00	225.00	6.00	
	Onduladas	60.00	110.00	7.00	
	Montañasas	40.00	47.00	8.00	
500.00 A 900.00	TIPO "D"				6.00
	Llanas	80.00	225.00	6.00	
	Onduladas	60.00	110.00	7.00	
	Montañasas	40.00	47.00	8.00	
100.00 A 500.00	TIPO "E"				5.50
	Llanas	50.00	75.00	8.00	
	Onduladas	40.00	47.00	9.00	
	Montañasas	30.00	30.00	10.00	
10.00 A 100.00	TIPO "F"				5.50
	Llanas	40.00	47.00	10.00	
	Onduladas	30.00	30.00	12.00	
	Montañasas	20.00	18.00	14.00	

Fuente: Dirección General de Caminos de Guatemala (D.G.C.). 2do Programa de caminos rurales y carreteras principales – Préstamo BIRF 7169-GU. p. 38.

Figura 9. Carretera de terracería Santa Irene – San Lorenzo



Fuente: tramo carretero Santa Irene - San Lorenzo, San Marcos.

Figura 10. **Carretera de terracería San Lorenzo – Comitancillo**



Fuente: tramo carretero San Lorenzo - Comitancillo (12,0 km), San Marcos.

Figura 11. Carretera de terracería Santa Irene – Río Blanco



Fuente: tramo carretero Santa Irene - Río Blanco, San Marcos.

5.3. Censo de tráfico

Para la ejecución del censo de tráfico fue necesario el reconocimiento del proyecto y posteriormente la definición de la ubicación de los puntos de conteo, puntos que fueron ubicados en los mismos lugares presentando condiciones adecuadas y además para establecer análisis del TPDA en función de la tasa de crecimiento año con año.

5.3.1. Información de las estaciones de conteo

Las estaciones definidas son:

- Comitancillo
- San Lorenzo
- Santa Irene

Figura 12. Estación de conteo



Fuente: Gisystems. Instructivo ejecución de monitoreo de campo. p.15.

Los conteos volumétricos de tráfico se elaboraron en forma manual en una boleta diseñada que contiene la hora y los tipos de vehículos antes mencionados, en estos se realizaron turnos de 12 horas cada día comenzando a la 6 a.m. y terminando a las 6 p.m. (turno diurno) y de 6 p.m., a 6 a.m. (turno nocturno).

5.3.2. Tipología de vehículos contabilizados

Se contabilizaron siete tipos de vehículos que representan la flota vehicular que circula por el país.

- Automóvil
- Picop
- Microbús
- Bus
- Camiones C2
- Camiones C3
- Camiones C4

Las características técnicas y de operación para cada vehículo usada para este estudio se definió en:

- Automóvil: vehículos motorizado de cuatro ruedas para el transporte de hasta 9 pasajeros que incluye los taxis, camionetas y automóvil.
- Picop: vehículos motorizados de cuatro ruedas con paila trasera.
- Bus y microbús: vehículos motorizados destinados al transporte de pasajeros con una capacidad mayor a 9 personas y desde el punto de vista de su capacidad de transporte puede dividirse en: microbús, buses pequeños de 2 ejes, buses grandes de 2 ejes y buses grandes de más de 2 ejes.
- Camión C2: vehículo motorizado de 2 ejes destinado a transporte de carga incluyendo grandes y pequeños.

- Camión C3: vehículo motorizado de 3 ejes destinado a transporte de carga.
- Camión C4: vehículo motorizado de 4 ejes destinado a transporte de carga en el cual también están incorporados los vehículos articulados de más de cuatro ejes.

5.3.3. Resumen del tráfico promedio diario

Para el proyecto (Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene), la flota vehicular registrada es de 600 vehículos diarios, el 74,17% (445 unidades son vehículos livianos y 25,83% (155 unidades) son vehículos pesados.

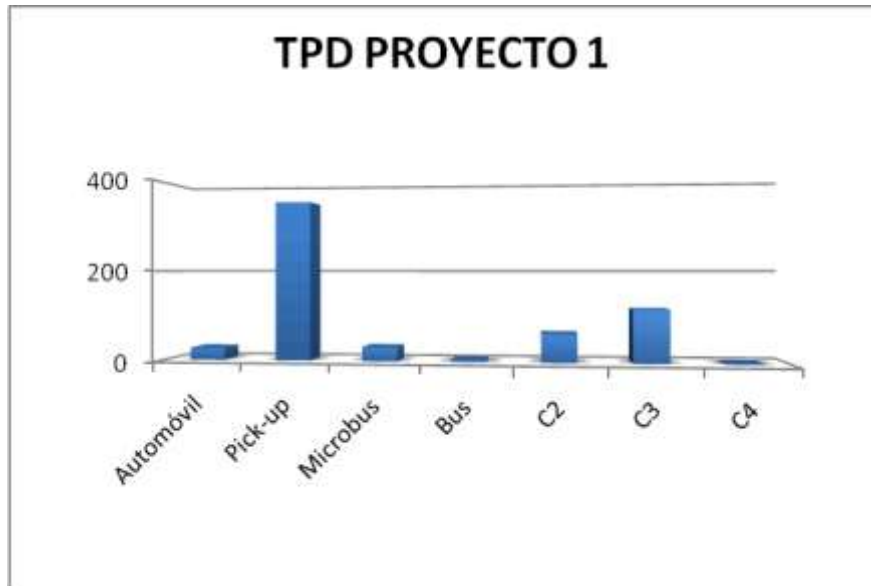
Tabla VIII. **Distribución porcentual del TPD**

PROYECTO	Automóvil	Pick-up	Microbus	Bus	C2	C3	C4	Total
1. Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	27	354	31	5	64	117	2	600
Distribución Porcentual	5%	59%	5%	1%	10%	20%	0%	100%

Fuente: elaboración propia.

No se consideró el tráfico generado producto de la reducción de los costos de operación de vehículo y estimado en un 10% adicional.

Figura 13. Tráfico promedio diario



Fuente: elaboración propia.

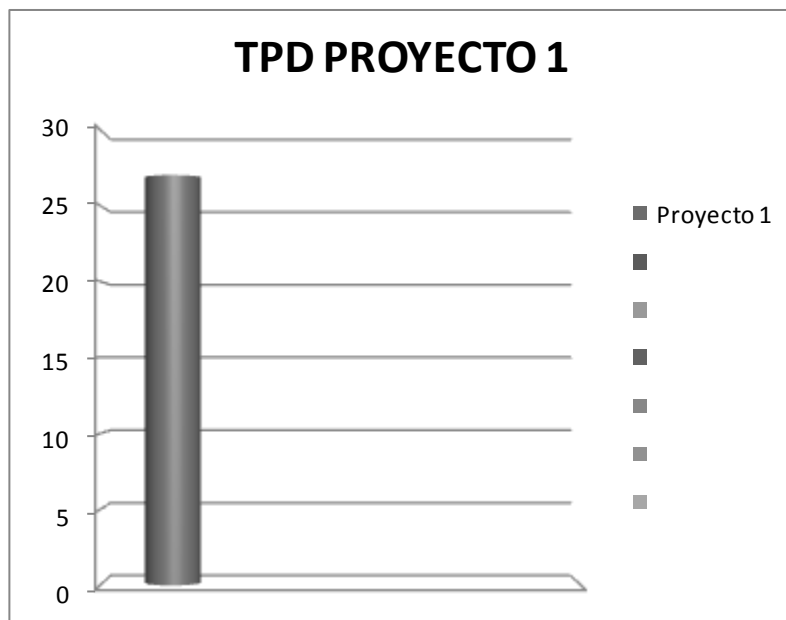
El tráfico promedio diario en cada sentido de circulación es aproximadamente de 50% y 50%, con una circulación de vehículos en turno diurno del 80% y 20% para el horario nocturno, con factores de expansión de 1,25 o 1,26 (total/día), factores que pueden usarse para expandir hacia las 24 horas del día.

En general, todas las ubicaciones de los conteos han sido muy bien establecidas; de las cuales se ha tratado de la mejor manera de ubicarlos en puntos estratégicos donde no hubiera por lo menos: tráfico urbano repetitivo, centros generadores de carga, estaciones de buses o microbuses, centros sociales que ameritan una repetición de tráfico a cada instante sino más bien en tramos homogéneos que cubrieran a lo menos la mayor parte de longitud de cada tramo (mitad de camino) y lo que representa en una estación promedio.

En lo referente al estado o condición de la calzada, depende que los viajes de los usuarios se minimicen dado el alto grado de deterioro ocasionando pérdidas marginales no despreciables en intercambios de bienes y servicios y hasta cierto punto ocasionando la no movilización de las personas en cada una de las comunidades dentro del área de influencia de los proyectos, sin embargo, la propuesta de pavimentación vendría a dar el impulso que amerita estas comunidades, justificadas por el incremento del tráfico promedio diario.

En la siguiente gráfica se aprecia en su totalidad la configuración por tipo de vehículos en cada uno de los proyectos en estudio.

Figura 14. **Tipo de vehículos por proyecto**



Fuente: elaboración propia.

5.4. Tasa de crecimiento del tráfico promedio diario

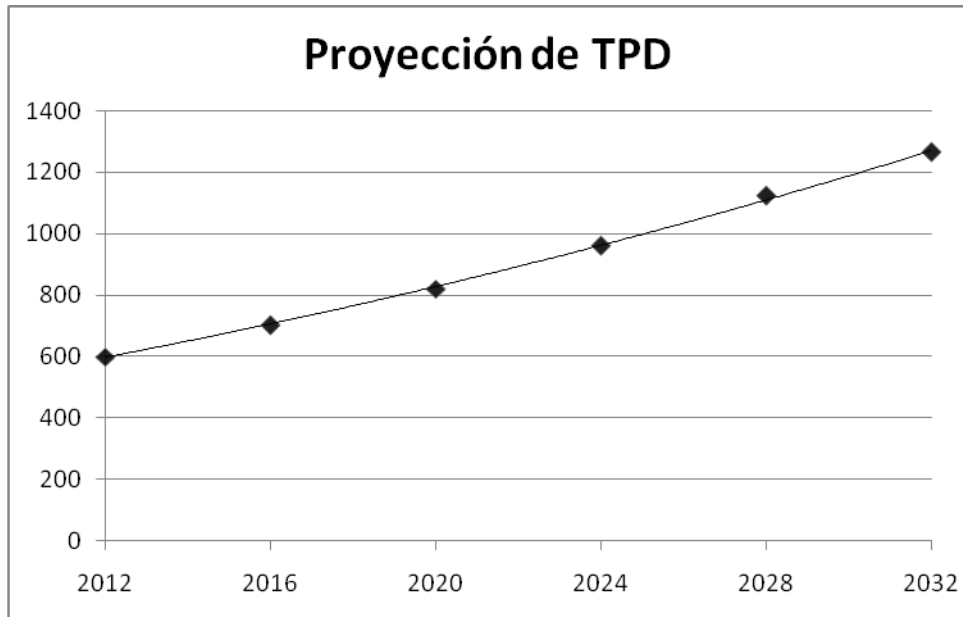
En lo concerniente al tráfico, se ha venido utilizando por parte del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda un recuento volumétrico de tráfico para toda la red vial, sin embargo, se han elaborado conteos aislados en diferentes carreteras por parte también de compañías consultoras privadas.

Tabla IX. **Proyección del TPD - Proyecto: Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene**

Año	Automóvil	Pick-up	Micro-bus	Bus	C2	C3	C4	Total
2012	27	354	31	5	64	117	2	600
2016	32	414	36	6	75	137	2	702
2020	37	484	42	7	88	160	3	821
2024	43	567	50	8	102	187	3	961
2028	51	663	58	9	120	219	4	1 124
2032	57	746	65	11	135	247	4	1 264

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Proyección del tráfico promedio diario**



Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos según el conteo vehicular elaborado recientemente y comparado con conteos anteriores se determinó que la tasa de crecimiento vehicular está en el orden del 4,0% para ser usada en la evaluación económica de los proyectos. En conclusión se puede mencionar que esta tasa está dentro de los parámetros que se han seguido en el Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda.

5.5. Modelo computacional utilizado, HDM-4

El uso del modelo Highway Development and Management o HDM-4 del Banco Mundial, es una herramienta computacional diseñada para la evaluación de los aspectos técnicos y económicos de proyectos de inversión vial. Permite tres niveles: proyecto, programa y estrategia.

El modelo consiste en 3 módulos como:

- El módulo técnico: que simula la evolución de la condición de la carretera con el tiempo, bajo los efectos del tráfico vehicular, del clima etcétera y de las necesidades de mantenimiento de la carretera.
- El módulo de costos de transporte: que calcula los costos de operación vehicular, la velocidad y los tiempos de recorrido, en relación con la condición de la carretera y el nivel de tráfico.
- El módulo económico: que realiza una síntesis de los cálculos anteriores; a partir de los flujos anuales de costos y de beneficios y calcula los indicadores económicos para la alternativa planteada.

Para la realización de la evaluación económica el modelo requiere de los datos de entrada consistentes en varios tipos:

- Datos relativos a la carretera
 - Geometría: longitud, número de carriles, ancho de la calzada, pendiente, curvatura, etcétera.
 - Pavimento: historia de mantenimiento, intervenciones, etcétera.
 - Condición: rugosidad y defectos.
 - Ambiente: zona climática, altitud y precipitación.

- Tráfico: volumen por tipo de vehículo, tasa de crecimiento y composición del parque vehicular.
- Datos relativos a los proyectos

Se presenta la configuración de los proyectos en función de los datos correspondientes a la geometría.

- Geometría: longitud, número de carriles, ancho de la calzada, pendiente, curvatura, etcétera.
- Pavimento: estructura del pavimento espesor y mantenimiento de esa estructura.
- Condición: rugosidad y defectos.
- Alternativas de construcción o conservación a comparar con sus respectivas asignaciones.

Tabla X. **Características de los proyectos**

Requerimiento	Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene
Descripción	
Longitud (km)	26,02
Ancho de hombro (metros)	0,00
Pendiente (metros/km)	65,24
Peralte	9%
Ancho de calzada (metros)	4,5
Número de carriles	1,00
Curvatura (Grados/km)	173,04
Medio Ambiente	
Altitud (MSNM)	2 280 a 2 620
Precipitación (mm/año)	3 000
Geometría	
Longitud (km)	26,02
Ancho de hombros (metros)	0,00
Pendiente (metros/km)	65,24
Peralte (%)	9%
Ancho de carril (metros)	3,00
Ancho de calzada (metros)	6,00
Número de carriles	2,00
Curvatura (grados/km)	173,04
Ancho de cuneta (metros)	0,45
Derecho de vía (metros)	25,00
Superficie	
Espesor de las capas nuevas	480
Espesor de las capas viejas (mm)	0,00
Base/subrasante	
Tipo de base	Base granular
CBR (%) de la subrasante	10,00 %
Espesor de la subbase (mm)	250,00
Espesor de la base (mm)	150,00
Espesor de la rodadura (mm)	80,00
Número estructural	2,88
Deflexión Benkelman	2,5
Rugosidad (IRI)	1,7

Fuente: elaboración propia.

5.6. Metodología de evaluación económica

La metodología a utilizar en la evaluación económica del proyecto consiste en un análisis diferencial entre una situación base o llamada también sin proyecto con una situación de proyecto. Ambas situaciones se proyectan de manera independiente dentro de un horizonte de evaluación que generalmente es de 20 años, de manera tal que estas proyecciones se hacen desde un punto de vista técnico (evolución de las características de la carretera) como económico (crecimiento del tráfico).

Posteriormente, a este proceso antes descrito se comparan los costos (del proyecto y se estima anualmente los costos de inversión y mantenimiento de la carretera), con los beneficios, (que son los ahorros de costos de operación vehicular, de tiempo y beneficios relacionados también al tráfico generado no considerado en este momento).

A partir de los flujos anuales de costos y de beneficios se calculan los indicadores económicos como pueden ser: El Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la razón de Beneficio Costo (B/C), los valores de sensibilidad en función de la disminución o aumento de los costos y beneficios del proyecto (+10 y -10).

5.7. Estándares y alternativas de conservación y mejora

Los estándares de trabajo se refieren a los objetivos o niveles de condición y respuesta que se desea alcanzar. Se definen diferentes estándares que puedan ser aplicados en situaciones prácticas a cada proyecto. La asignación de uno o más estándares combinados técnicamente para un tramo, resulta en la formación de una alternativa en términos del modelo HDM-4.

Alternativa de conservación: son los trabajos u obras básicas de conservación, propiamente, especificando la unidad de medida, pero sin especificar el momento de su aplicación. Estas se dividen en operaciones para caminos no pavimentados (conformación, bacheo localizado, recargue o reposición de grava y otras operaciones de mantenimiento rutinario), en forma similar se especifican operaciones para caminos pavimentados (bacheo asfáltico, resellos, refuerzos o sobrecapas asfálticas, reconstrucción y otras operaciones de mantenimiento rutinario). En estas actividades se especificaron los costos promedios por unidad de medida.

Estándares de conservación: es la aplicación de una o varias operaciones de mantenimiento en forma programada en el tiempo o en función de la respuesta a una condición máxima aceptable de estado del camino o del nivel de tránsito, se debe especificar por cada operación, cuando corresponda, los espesores a aplicar, granulometrías, coeficientes estructurales de capas, incremento de números estructurales, tipo de espesores de capas, métodos constructivos (con o sin compactación), calidad técnica de terminación de las obras (rugosidad inicial), áreas máximas dañada admisibles, valores máximos aceptables de agrietamiento, rugosidad y los costos o factores de costos necesarios.

Utilizando combinaciones de alternativas se definió y evaluó una serie de estándares de conservación y mejora, donde se aplicaron a todos los proyectos de inversión en el departamento de San Marcos y que consistió en:

Sin proyecto:

Esta alternativa se compone de una intervención que se realizan en un período de doce meses y que se presenta con un bacheo para reemplazar el 30% de la pérdida de material anual (si el espesor del la grava o material selecto 100 milímetros) y una renovación superficial (cuando el espesor del material selecto descienda de 50 milímetros o balastado cada 3 años). Se incluyó un mantenimiento de rutina de 1 000 \$/kilómetro.

El proyecto es un camino de material selecto o tierra con una longitud de 26,02 kilómetros de dos carriles con 600 vehículos, con una tasa de crecimiento del 4,0%, sobre un terreno montañoso y con una geometría bastante fuerte lo que permite el inicio de surcos o camellones dificultando el tráfico fluido y en algunos casos formando puntos críticos de difícil transitabilidad, recibe un mantenimiento que consiste en conformaciones y adición de material selecto o balastado en promedio cada 3 años de acuerdo a la disponibilidad de recursos del Ministerio de Comunicaciones.

Sin embargo, esta política no logra establecer permanentemente que el camino esté en condiciones óptimas, teniendo que recurrir a nuevas intervenciones en corto plazo dado que: si al camino lo dejan de atender provocaría que la falta de mantenimiento produzca altos costos de operación vehicular y una precaria accesibilidad, debido a las características geométricas de los caminos y al acelerado deterioro ya sea puntual o longitudinal, se podrá incurrir en frecuencias muy cortas de mantenimiento (cada cierto tiempo) ya sea periódico y rutinario aumentando los costo de las obras.

Con proyecto:

Esta alternativa incluye la mejora o pavimentación de la carretera en 1 año consecutivo, además se consideraron las siguientes hipótesis.

- Mantener lo que se tiene: mejorar aún más la política de mantenimiento aumentando la frecuencia de conformación a cada 180 días y 90 días (evaluar por la asignación de fondos) y mantener y aumentar la frecuencia de balastado cada 3 años. En este caso, la rugosidad media estimada es 15,2 IRI.
- Mejorar lo que se tiene: mejorar el camino a doble tratamiento superficial o carpeta asfáltica. En este caso, la rugosidad media estimada es 4,2 IRI y de 3,4 IRI en el caso de la carpeta de asfalto. Con una actuación anual de mantenimiento de rutina y sello cuando alcance un 20% de agrietamiento y de un refuerzo de 5 centímetros cuando se alcance una rugosidad del 4,5 IRI.

Se han considerado dos alternativas para la estructura del pavimento, la primera consiste en una estructura que se llama tradicional, porque está constituida por capas granulares de subbase y base, sin estabilizar, lo cual es la forma tradicional de la estructura del pavimento.

- Esta estructura está constituida por una capa de subbase de 15 centímetros de espesor, una capa de base de 15 centímetros protegida por un doble tratamiento superficial asfáltico, obteniendo un número estructural de 1,06.

- La segunda alternativa: una carpeta asfáltica de 10 centímetros y una base de 15 centímetros tratando de obtener un número estructural de 2,88 (se asume un aporte de parte de la capa superficial tratada de la subrasante).

5.8. Costos de los proyectos

En relación a los costos de inversión aplicados a los proyectos, se presentan costos financieros y económicos para cada caso en particular, teniendo la particularidad de que los costos financieros se deducen a costos económicos multiplicados por el factor de conversión (0,85) los cuales se presentan a continuación:

Tabla XI. **Costos de los proyectos**

		Costo Financiero					
Proyecto	Longitud	DTS	CA 10 cm	DTS		CA 10 cm	
				Costo total	Costo Unitario	Costo total	Costo Unitario
	(km)	Q	Q	(US\$)	(US\$/km)	(US\$)	(US\$/km)
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	26.02	34 466 060,73	58 501 589,15	42 917 98.54	164 942,30	7 284 761,58	279 967,78
		Costo Económico					
Proyecto	Longitud	DTS	CA 10 cm	DTS		CA 10 cm	
				Costo total	Costo Unitario	Costo total	Costo Unitario
	(km)	Q	Q	(US\$)	(US\$/km)	(US\$)	(US\$/km)
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	26.02	29 296 151,62	49 729 350,78	3 648 028,76	140 200,95	6 192 047,35	237 972,61

Tasa cambiaria de US\$ 1,00 = Q 8,03068.

Fuente: Banco central de Guatemala 6 marzo de 2012.

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

Los costos calculados para el proyecto con la alternativa de pavimentación con Doble Tratamiento Superficial (DTS) su inversión es de US\$ 4,29 millones con un promedio de costo por kilómetro de US\$ 164 942 teniendo una longitud total del proyecto de 26,02 kilómetros.

Los costos calculados para los proyectos de inversión con la alternativa de pavimentación de Concreto Asfáltico (CA) es de US\$ 7,28 millones, con un promedio de costo por kilómetro de US\$ 279 967 teniendo una longitud total del proyecto de 26,02 kilómetros.

5.9. Evaluación económica del proyecto

El análisis de la evaluación económica se basa en los estimados de beneficios costos económicos del proyecto y tienen por objeto cuantificar la rentabilidad económica de la inversión propuesta.

5.9.1. Criterios básicos

El estudio de la evaluación económica de los proyectos del departamento de San Marcos se ha realizado sobre las siguientes bases:

- El período de análisis comprende la vida económica del proyecto con especificaciones de carretera de material selecto a carretera pavimentada, con un período de análisis de (20) años, realizándose la estimación a partir del 2012.
- Se ha utilizado una tasa de descuento del 12% y los resultados de esta evaluación son basados en indicadores tales como el Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR).

- Se ha calculado el tráfico promedio diario para la evaluación económica del proyecto en función de la actual colecta de datos.
- Se ha utilizado una política base optimizada que consiste en hacer balastado cada 3 años y conformaciones cada seis meses.
- No se ha cuantificado el tráfico generado valorado en promedio en un 10%.
- Se ha sensibilizado la tasa de crecimiento vehicular para varios escenarios, conservador (2%), esperado (4%) y optimista (6%).

5.9.2. Beneficios económicos

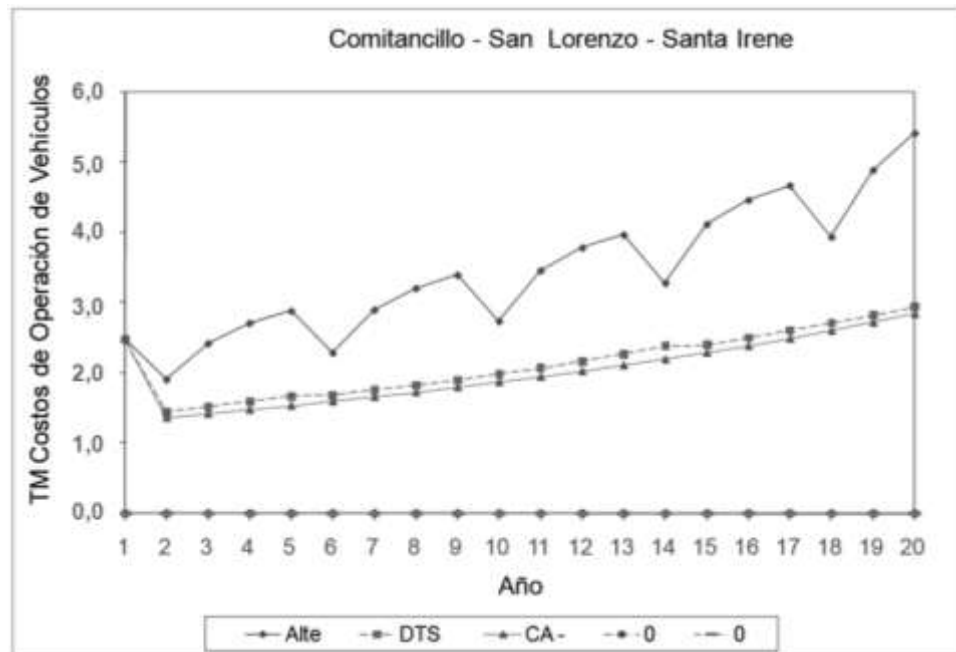
Los beneficios económicos que se han cuantificado y que son atribuibles a la ejecución del proyecto son los siguientes:

Ahorros en costos de operación de los vehículos del usuario para el tráfico normal y generado.

Para el cálculo de los beneficios por ahorros en costos de operación de vehículos, se utilizó implícitamente el modelo de efectos a los usuarios (RUE) Road user effects: mediante este modelo se determinan los costos de operación de los vehículos, accidentes y tiempo de viaje que se encuentra dentro del modelo HDM-4, también se encuentran los modelos del deterioro de la carretera (RD) road deterioration, efectos de la obras (We) work effects.

Como ejemplo se presenta el proyecto de Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene denotando claramente las situaciones de cada alternativa en función del aumento de los costos de operación en el período de evaluación.

Figura 16. **TM Costos de operación de vehículos**



Fuente: Gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Los costos de operación vehicular se estimaron a partir de los precios unitarios económicos (sin impuestos) de los componentes (combustibles, lubricantes, llantas, mano de obra, repuestos y depreciación) para cada tipo de vehículo.

Para el caso de los combustibles y demás insumos de los costos de operación se han utilizado los precios económicos y se ha actualizado la mayor parte de los vectores de precios de los mismos.

Tabla XII. **Características y costos económicos por vehículo**

Características Básicas	Automóvil	Pick-up	Bus	Micro-bus	Camión C2	Camión C3	Camión C4
Peso Bruto Vehicular (t)	1.2	1.8	10.9	5.6	11.3	20.8	27
No. Ejes Equivalentes (E-4)	0	0.01	0.8	0.2	1	2	4
Número de Ejes	2	2	2	2	2	3	5
Número de Neumáticos	4	4	6	6	6	10	18
Número de Pasajeros	2.3	2.3	30	20	1	1	1
Utilización del Vehículo							
Vida útil (años)	12	12	15	14	13	12	12
Horas conducidas por año	450	1300	2000	1300	2100	2100	2100
kms. Conducidos por año	20000	30000	65000	50000	65000	75000	90000
Código de Depreciación	2	2	1	1	1	1	1
Código de Utilización	1	3	3	3	3	3	3
Tasa de Interés anual (%)	12	12	12	12	12	12	12
Costos económicos Unitarios							
Vehículo Nuevo (M)	12,000	15,000	60,000	18,000	35,000	65,000	80,000
Neumático Nuevo (M)	60	60	275	275	275	275	275
Mano de obra Mant. (M/hr)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Tripulación (M/trip-hr)	1	1	3	3	3	3	3
Tiempo Pasajero (M/pa-hr)	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Tiempo Carga (M/veh-hr)	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. 2do Programa de caminos rurales y carreteras principales – Préstamo BIRF 7169-GU. p. 54.

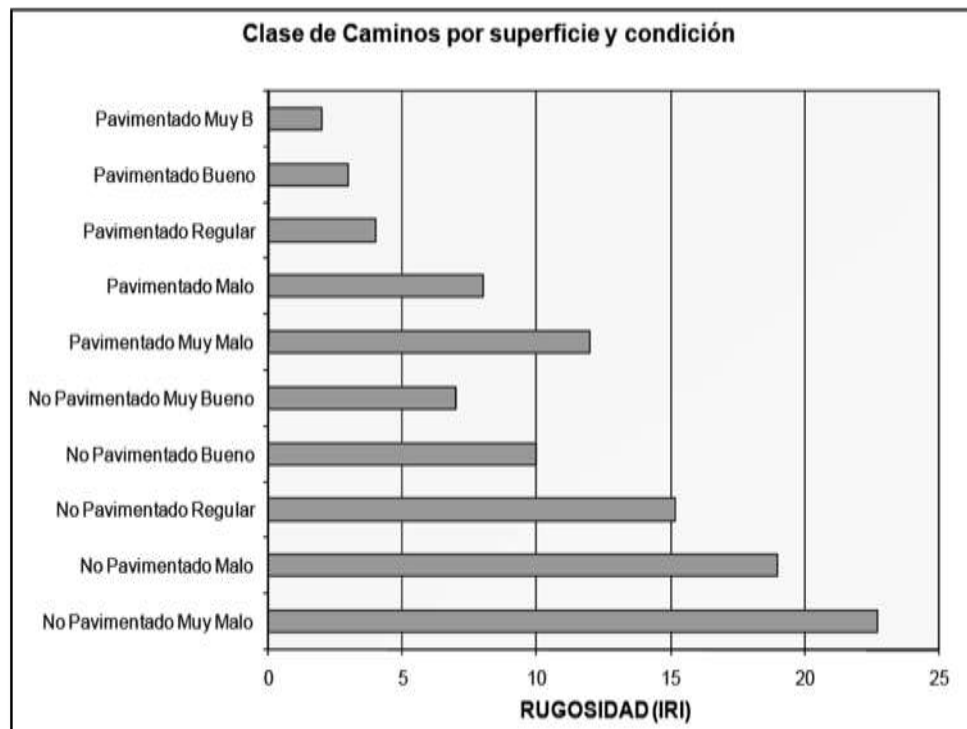
Para el caso de los combustibles se han utilizado los precios sombra, estos precios son:

- Precio económico de gasolina (US\$/litro) = 0,71
- Precio económico de diésel (US\$/litro) = 0,63
- Precio económico lubricantes (US\$/litro) = 4,06

Los ahorros de tiempo de viaje, por la mayor velocidad de circulación prevista, se han cuantificado considerando que la mayoría de los viajes son por motivos de trabajo.

Los costos unitarios de operación por tipo de vehículo, para la alternativa sin proyecto o base y las alternativas seleccionadas de pavimentación implica un diferencial entre la rugosidad inicial o sin proyecto *vs* la rugosidad inicial o con proyecto y dentro del horizonte de evaluación de 20 años. Rugosidades de 2,5 IRI Doble tratamiento superficial (DTS) y de 1,7 para Concreto Asfáltico (CA) en promedio, estos datos están sustentados en la siguiente gráfica para cada situación:

Figura 17. **Clase de caminos por superficie y condición**



Fuente: gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Las diferencias de costos de operación de vehículos en los proyectos señalados anteriormente de carreteras en mal estado en el departamento de San Marcos, ocasionan significativos ahorros en el costo de operación vehicular por la nueva pavimentación. A estos ahorros se deben agregar otros beneficios, los que incluyen los ahorros en los tiempos de viaje y otros beneficios no relacionados directamente con la operación de los vehículos (beneficios exógenos), que no fueron adicionados a este estudio.

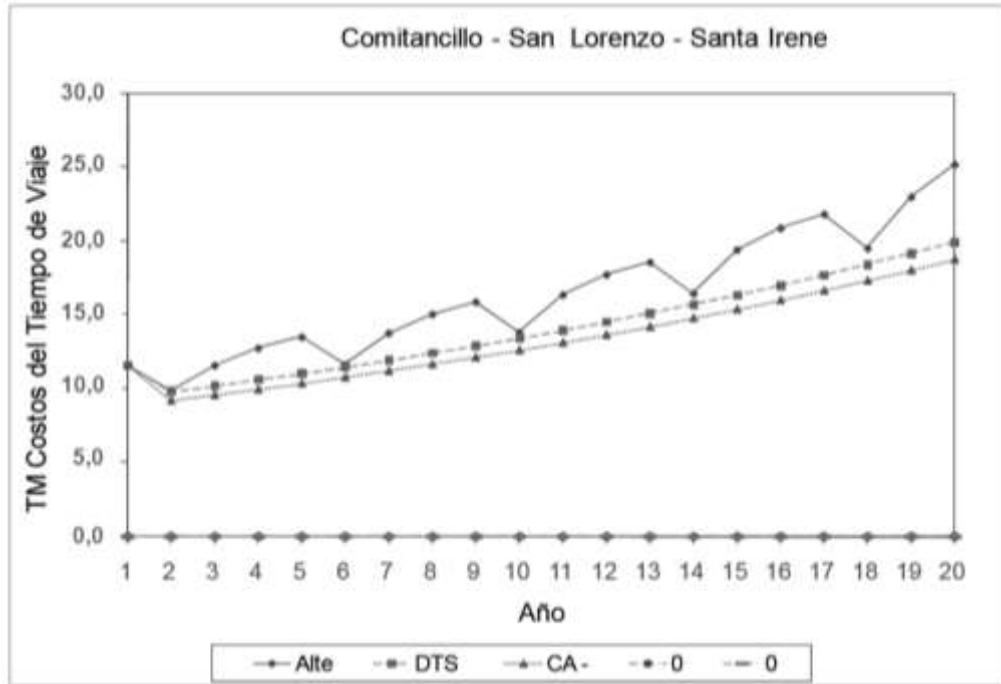
- Ahorros en tiempo de los ocupantes de los vehículos usuarios y de carga

La estimación del valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos en una carretera se basa en la premisa de que una persona siempre tiene usos alternativos para el tiempo que gasta en viajes, los que para ella tienen cierta importancia y valor.

El valor de inicio de tiempo para los ocupantes de buses incluye sólo los salarios por hora de un chofer y un ayudante, el valor normal incluye además un valor para los pasajeros.

El número promedio de pasajeros de los buses (excluyendo un chofer y un ayudante) se estableció de las encuestas anteriores de orígenes y destinos de tráfico para el proyecto, donde se distribuye entre los que están viajando por asuntos de trabajo y los que viajan por otras razones, (ver figura 18).

Figura 18. **TM Costos del tiempo de viaje**



Fuente: Gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

- Ahorros en costos de mantenimiento

La inversión inicial en la rehabilitación de los caminos propuestos conlleva la necesaria e ineludible inversión anual en mantenimiento rutinario y periódico a lo largo de los próximos 20 años donde proveerá una variada gama de beneficios, siempre que se cumplan ambas inversiones.

Si se ejecutan oportunamente los requerimientos de mantenimiento periódico durante la vida útil del proyecto, así como, las operaciones de mantenimiento rutinario requeridas todos los años, se obtendrán beneficios por ahorro de futuras y carísimas reconstrucciones o rehabilitaciones innecesarias.

Debe quedar claro que los costos de mantenimiento estimados representan lo que debería gastarse para mantener en condiciones adecuadas, una carretera bien proyectada y construida.

El mejoramiento de los proyectos y su futuro mantenimiento producirán reducciones en los costos de operación de vehículos para los actuales usuarios de la vía, así como, disminuirán los tiempos de viaje al incrementar la velocidad de circulación.

En el futuro se espera que se genere un tráfico adicional de vehículos, debido al mejoramiento de la vía, este tráfico no accedería a la carretera a no ser que se encuentre en mejores condiciones. Este tráfico generado produce variaciones en el equilibrio entre la oferta y demanda de transporte, que provoca beneficios por este concepto, los cuales son cuantificados aproximadamente por el modelo HDM (valorados al 50% de los beneficios obtenidos por el tráfico normal). Entre estos vehículos están aquellos correspondientes al turismo, que ocasionan ingresos localmente por la venta de servicios y productos típicos.

Es importante mencionar que los gastos de mantenimiento constituyen un aumento o una reducción en los beneficios del proyecto, dependiendo de si aplican o no en su momento.

Todos los análisis y resultados de los ítems antes mencionados se presentan en el anexo correspondiente a la evaluación económica distribuida en 2 análisis; una para la evaluación económica con la alternativa de pavimentación con DTS y otra con pavimentación con CA.

5.10. Costos económicos

El mejoramiento de las carreteras absorbe dinero que podría ser utilizado para otros propósitos productivos por los individuos o por el gobierno; pueden ser justificadas solamente si en resumen, las consecuencias son favorables; esto es, si las reducciones de costos a los usuarios de carreteras y a otros beneficiarios del mejoramiento exceden los costos.

5.10.1. Ahorro en costos de operación de vehículos (COV)

Como resultado de la evaluación económica se han determinado para cada tipo de vehículo los factores de ahorro que son el producto de las interrelaciones de los atributos que corresponden a las características de la carretera, los atributos que corresponden al funcionamiento de los vehículos y a los factores regionales con los precios de los combustibles.

En general el modelo HDM trabaja con varias alternativas, donde para cada tramo se han evaluado 3 de las cuales se presentan a continuación:

- Alternativa 1 = base
- Alternativa 2 = doble tratamiento superficial (DTS)
- Alternativa 3 = concreto asfáltico (CA)
- Alternativa 4 = no usada en este análisis
- Alternativa 5 = no usada en este análisis

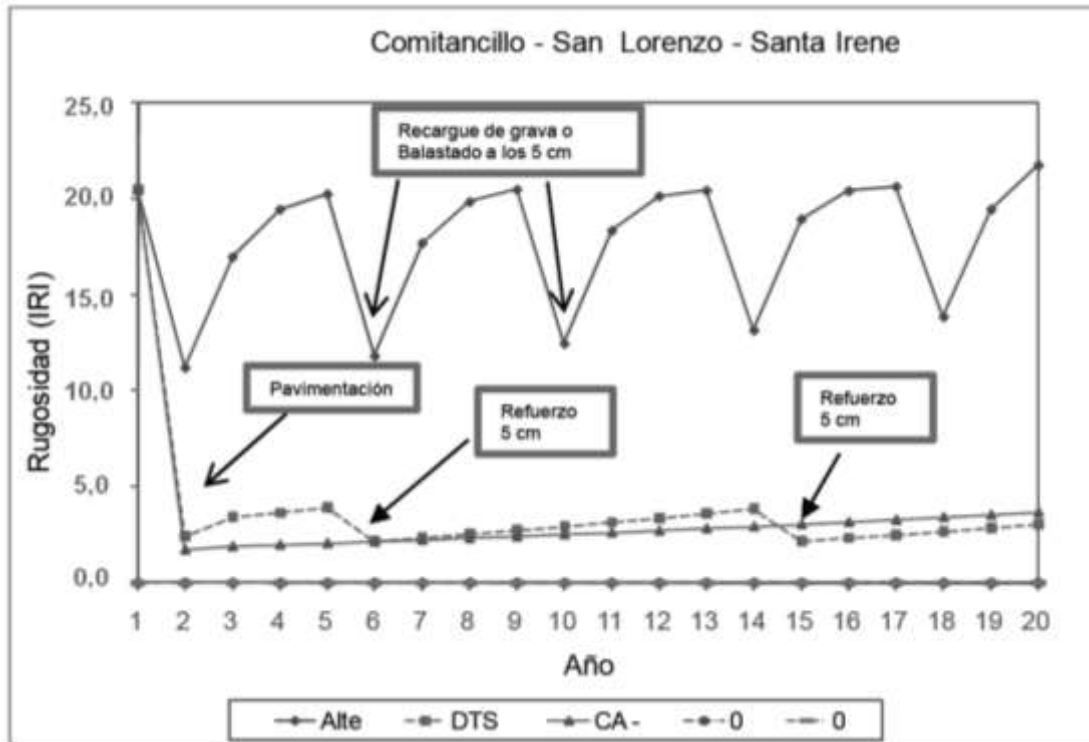
Tabla XIII. **COV & costo de tiempo de viaje (M US\$)**

COV & Costo de Tiempo de Viaje (M US\$)									
Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
TM Costos de Operación de Vehículos					TM Costos del Tiempo de Viaje				
2,3	2,55	2,55	0,00	0,00	10,94	11,89	11,89	0,00	0,00
1,86	1,45	1,39	0,00	0,00	9,74	9,83	9,43	0,00	0,00
2,25	1,53	1,45	0,00	0,00	11,04	10,22	9,81	0,00	0,00
2,47	1,60	1,51	0,00	0,00	11,90	10,63	10,20	0,00	0,00
2,13	1,68	1,57	0,00	0,00	11,03	11,06	10,61	0,00	0,00
2,58	1,77	1,63	0,00	0,00	12,56	11,51	11,04	0,00	0,00
2,82	1,86	1,69	0,00	0,00	13,53	11,97	11,48	0,00	0,00
2,44	1,83	1,76	0,00	0,00	12,52	12,43	11,94	0,00	0,00
2,95	1,90	1,83	0,00	0,00	14,29	12,93	12,42	0,00	0,00
3,22	1,98	1,91	0,00	0,00	15,36	13,45	12,91	0,00	0,00
2,79	2,06	1,98	0,00	0,00	14,21	13,98	13,43	0,00	0,00
3,38	2,15	2,06	0,00	0,00	16,26	14,55	13,97	0,00	0,00
3,60	2,25	2,15	0,00	0,00	17,21	15,13	14,53	0,00	0,00
3,19	2,36	2,23	0,00	0,00	16,16	15,74	15,11	0,00	0,00
3,86	2,48	2,32	0,00	0,00	18,50	16,38	15,72	0,00	0,00
4,10	2,60	2,42	0,00	0,00	19,55	17,04	16,36	0,00	0,00
3,66	2,73	2,52	0,00	0,00	18,41	17,74	17,02	0,00	0,00
4,40	2,71	2,63	0,00	0,00	21,04	18,42	17,71	0,00	0,00
5,01	2,82	2,74	0,00	0,00	23,49	19,17	18,42	0,00	0,00
4,32	2,93	2,86	0,00	0,00	21,30	19,96	19,18	0,00	0,00

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

En la siguiente gráfica se muestra claramente la comparación de los deterioros que teóricamente produce el modelo en cuanto a la pérdida que sufren los caminos, tanto de material selecto como los caminos ya pavimentados. Una vez rehabilitado el camino va perdiendo material hasta que llega un punto de un recargue de grava, tentativamente con un mantenimiento de rutina permanente.

Figura 19. **Rugosidad (IRI)**



Fuente: Gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

El mantenimiento periódico de caminos de material selecto, el balastado o recargue de grava tiene el objetivo de pulir el camino con una capa de selecto para evitar los problemas del transitabilidad durante la estación lluviosa, pero sólo tiene un impacto en estado de la calzada (rugosidad) por un período de tiempo muy corto.

En el caso de la evaluación de la alternativa de pavimentación suceden 2 cosas: un refuerzo de 5 centímetros para la pavimentación con doble tratamiento DTS en dos incursiones dentro del horizonte de evaluación por el rápido deterioro, para la pavimentación con concreto asfáltico también se incluyó el refuerzo de 5 centímetros, dando como resultado solamente un mantenimiento de rutina durante el mismo período debido a que es una estructura mejor diseñada y con un buen soporte estructural.

5.10.2. Costos de capital y recurrente

Los costos de capital se refiere a los costos financieros en que se incurre, en este caso en particular son para las obras de pavimentación; en el caso de los costos de recurrente son las obras de mantenimiento rutinario valuadas en este estudio en 1 000 US\$ kilómetros. Para esta evaluación se ha usado un 10% de valor residual estructural.

Tabla XIV. Costo de capital y recurrente (M US\$)

Costo de Capital y Recurrente (M US\$)										
Año	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5	Alt.1	Alt.2	Alt.3	Alt.4	Alt.5
	Costos de Capital de la Agencia					Costos Recurrentes de la Agencia				
2012	0,76	3,65	6,19	0,00	0,00	0,16	0,02	0,02	0,00	0,00
2013	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02	0,02	0,00	0,00
2014	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2015	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02	0,05	0,00	0,00
2018	0,76	2,14	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2021	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,05	0,00	0,00
2024	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,06	0,00	0,00
2025	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,06	0,00	0,00
2026	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,07	0,06	0,00	0,00
2027	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,07	0,06	0,00	0,00
2028	0,00	2,14	0,00	0,00	0,00	0,16	0,05	0,06	0,00	0,00
2029	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02	0,06	0,00	0,00
2030	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,05	0,06	0,00	0,00
2031	0,00	-0,36	-0,62	0,00	0,00	0,02	0,05	0,06	0,00	0,00

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

En la tabla anterior se muestra la inversión, producto de las necesidades de los caminos para restablecer su estado inicial, estas inversiones son el producto de los análisis de costos unitarios por un lado y por el otro la definición de las alternativas de pavimentación para todos los proyectos.

En el caso de la política base las inversiones de capital están en un rango de cada tres años y un mantenimiento de rutina cada seis meses, esto para mantener un estado aceptable en los años siguientes alcanzando un crecimiento ligero de deterioro para después retornar a obras de inversión de capital. En el caso de las pavimentaciones, las inversiones de capital son más recurrentes en las de doble tratamiento que en las de concreto asfáltico.

5.11. Resumen técnico y económico del proyecto

Se presentan los análisis económicos comparativos en las situaciones base y con proyecto, esto para establecer en forma clara los datos y análisis técnicos que se desprenden y respaldan cada evaluación económica; sin embargo para efectos de ejemplo explicativo, se presentan las tablas y gráficas siguientes:

5.11.1. Pavimentación con Doble Tratamiento Superficial (DTS)

La evaluación económica refleja que la rugosidad inicial del Doble Tratamiento Superficial (DTS) que aparece en los caminos, son típicamente más altos que la rugosidad inicial que los caminos construidos con Concretos Asfálticos (CA). El Doble Tratamiento se deteriora en función del tráfico y el ambiente a medida que pasa el tiempo y el mantenimiento periódico consiste típicamente en resellos que tiene el objetivo de sanear la superficie eliminando imperfecciones pero no bajando la rugosidad del camino. Por consiguiente, no influye en la rugosidad de los caminos el tratamiento de la superficie por el mantenimiento periódico (el resellado) hasta que exista una mejora sustancial (refuerzo) o la reconstrucción aplicada en el camino por el mal estado.

Los trabajos de mantenimiento recurrentes que consisten en mantenimiento rutinario, sellando grietas y sellando la superficie impactando en la no progresión en el tiempo de la rugosidad una vez que las grietas y los baches aparecen que típicamente pasan a los 23 años después de la inversión inicial. Los caminos de tratamiento superficiales proporcionan el acceso de todo el tiempo, pero tiene una rugosidad relativamente alta en comparación con los caminos de concreto asfáltico donde constantemente aumenta hasta que se llegue a un refuerzo estructural o la aplicación de la reconstrucción.

Por consiguiente, no influye mucho en la rugosidad el doble tratamiento superficial como mantenimiento periódico (sellados de superficie) o por el mantenimiento recurrente en el corto plazo.

En conclusión se presenta la evaluación económica en la tabla siguiente denotando muy claramente el comportamiento con respecto a la pavimentación con DTS y la política base la cual denota el incremento en la rugosidad que en promedio resulta de 15,2 de IRI *vs* la rugosidad con la pavimentación con Doble tratamiento con un IRI inicial de 2,5 y en términos de un promedio de 4,2 aplicando 2 refuerzos de 5 centímetros en el período de evaluación y denotando su rentabilidad económica al respecto.

Tabla XV. Evaluación económica para DTS

Año	CASO SIN PROYECTO						CASO CON PROYECTO					
	Alternativa Base						DTS - Pavimentación					
	Tráfico Diario (TDM)	Rugosidad (IRI)	Costos Económicos US\$				Tráfico Diario (TDM)	Rugosidad (IRI)	Costos Económicos US\$			
Costos Agencia			Costos Veh & Tiem	Costos Ac&Ex	Costos totales	Costos Agencia			Costos Veh & Tiem	Costos Ac&Ex	Costos totales	
2012	600	17,80	0,92	13,24	0,00	14,16	600	21,50	3,67	14,44	0,00	18,11
2013	624	10,50	0,16	11,60	0,00	11,76	624	2,50	0,02	11,27	0,00	11,29
2014	649	14,70	0,16	13,29	0,00	13,45	649	3,50	0,05	11,75	0,00	11,80
2015	675	16,40	0,92	14,37	0,00	15,29	675	3,70	0,05	12,23	0,00	12,29
2016	702	10,90	0,16	13,16	0,00	13,32	702	3,90	0,05	12,74	0,00	12,79
2017	730	15,30	0,16	15,14	0,00	15,30	730	4,30	0,07	13,27	0,00	13,34
2018	759	16,80	0,92	16,35	0,00	17,27	759	4,70	2,19	13,83	0,00	16,03
2019	790	11,40	0,16	14,95	0,00	15,11	790	2,30	0,02	14,26	0,00	14,28
2020	821	15,80	0,16	17,25	0,00	17,40	821	2,50	0,05	14,83	0,00	14,88
2021	854	17,30	0,92	18,58	0,00	19,50	854	2,70	0,05	15,43	0,00	15,48
2022	888	11,90	0,16	17,00	0,00	17,16	888	2,90	0,05	16,05	0,00	16,10
2023	924	16,30	0,16	19,64	0,00	19,80	924	3,10	0,05	16,70	0,00	16,75
2024	961	17,10	0,92	20,81	0,00	21,73	961	3,30	0,05	17,38	0,00	17,43
2025	999	12,40	0,16	19,36	0,00	19,51	999	3,60	0,05	18,10	0,00	18,15
2026	1039	16,80	0,16	22,36	0,00	22,51	1039	3,80	0,07	18,85	0,00	18,92
2027	1081	17,50	0,92	23,65	0,00	24,57	1081	4,10	0,07	19,64	0,00	19,71
2028	1124	12,90	0,16	22,07	0,00	22,23	1124	4,40	2,19	20,46	0,00	22,66
2029	1169	17,30	0,16	25,44	0,00	25,60	1169	2,30	0,002	21,13	0,00	21,15
2030	1215	20,30	0,8	28,5	0,00	29,30	1215	2,40	0,05	21,99	0,00	22,04
2031	1264	14,20	0,02	25,61	0,00	25,64	1264	2,60	-0,31	22,89	0,00	22,58
Promedio		15,20						4,2				
Total (descontado)			3,68	133,87	0,00	137,56			5,42	121,17	0,00	126,59

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

5.11.2. Concreto Asfáltico (CA)

La rugosidad en el caso de los caminos de Concreto Asfáltico (CA) son típicamente bajos y no se influye mucho el espesor de la carpeta del asfalto. El camino se deteriora en función del tráfico y el ambiente a medida que transcurre el tiempo y el mantenimiento periódico consiste típicamente en refuerzos de mezcla de asfalto que tiene el objetivo de corregir daños de la superficie e incrementando el soporte estructural del pavimento y reduciendo la rugosidad.

Los trabajos de mantenimiento recurrentes que consisten en mantenimiento rutinario, sellando grietas y bacheo de la superficie impacta en la no progresión en el tiempo de la rugosidad una vez que las grietas y los baches aparecen qué típicamente pasan a los 5 años después de la inversión inicial. En los caminos de concreto asfáltico mantienen una rugosidad relativamente baja lográndose a través de los trabajos del mantenimiento periódico (refuerzos).

Tabla XVI. Evaluación económica para CA

Año	CASO SIN PROYECTO						CASO CON PROYECTO					
	Alternativa Base						CA - Pavimentación					
	Tráfico Diario (TDM)	Rugosidad (IRI)	Costos Económicos US\$				Tráfico Diario (TDM)	Rugosidad (IRI)	Costos Económicos US\$			
Costos Agencia			Costos Veh&Tiem	Costos Ac&Ex	Costos Totales	Costos Agencia			Costos Veh&Tiem	Costos Ac&Ex	Costos Totales	
2012	600	17,80	0,92	13,24	0,00	14,16	600	21,50	6,21	14,44	0,00	20,65
2013	624	10,50	0,16	11,60	0,00	11,76	624	1,70	0,02	10,83	0,00	10,85
2014	649	14,70	0,16	13,29	0,00	13,45	649	1,90	0,05	11,26	0,00	11,31
2015	675	16,40	0,92	14,37	0,00	15,29	675	1,90	0,05	11,71	0,00	11,76
2016	702	10,90	0,16	13,16	0,00	13,32	702	2,00	0,05	12,18	0,00	12,23
2017	730	15,30	0,16	15,14	0,00	15,30	730	2,10	0,05	12,67	0,00	12,72
2018	759	16,80	0,92	16,35	0,00	17,27	759	2,10	0,05	13,17	0,00	13,23
2019	790	11,40	0,16	14,95	0,00	15,11	790	2,20	0,05	13,70	0,00	13,75
2020	821	15,80	0,16	17,25	0,00	17,40	821	2,30	0,05	14,25	0,00	14,30
2021	854	17,30	0,92	18,58	0,00	19,50	854	2,40	0,05	14,82	0,00	14,87
2022	888	11,90	0,16	17,00	0,00	17,16	888	2,50	0,05	15,41	0,00	15,47
2023	924	16,30	0,16	19,64	0,00	19,80	924	2,50	0,05	16,03	0,00	16,09
2024	961	17,10	0,92	20,81	0,00	21,73	961	2,60	0,06	16,68	0,00	16,73
2025	999	12,40	0,16	19,36	0,00	19,51	999	2,70	0,06	17,35	0,00	17,40
2026	1039	16,80	0,16	22,36	0,00	22,51	1039	2,80	0,06	18,05	0,00	18,10
2027	1081	17,50	0,92	23,65	0,00	24,57	1081	2,90	0,06	18,78	0,00	18,83
2028	1124	12,90	0,16	22,07	0,00	22,23	1124	3,00	0,06	19,54	0,00	19,60
2029	1169	17,30	0,16	25,44	0,00	25,60	1169	3,10	0,06	20,33	0,00	20,39
2030	1215	20,30	0,80	28,50	0,00	29,30	1215	3,20	0,06	21,16	0,00	21,22
2031	1264	14,20	0,02	25,61	0,00	25,64	1264	3,30	-0,56	22,03	0,00	21,48
Promedio		15,20						3,40				
Total (descontado)			3,68	133,87	0,00	137,56			6,51	116,73	0,00	123,24

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

5.12. Resultados del análisis económico

Existe un sinnúmero de indicadores económicos para ser considerados como principales, pero, para hacer una actividad periódica en la misma sección de carreteras como es el caso de la pavimentación, será el indicador del mayor Valor Presente Neto para la opción de alternativas o estrategias (VPN) el escogido, para determinar prioridad de la sección tal como es el caso de este proyecto, es decir, compara la pavimentación de doble tratamiento *vrs* concreto asfáltico.

Además, se puede priorizar teniendo el Valor Presente Neto por kilómetro de cada proyecto, teniendo esta característica la determinación de saber cuantificar los beneficios que da cada kilómetro en cada proyecto.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) y razón B/C son desaconsejadas para comparar la alternativa como es el caso de este proyecto, debido a que solamente se utilizan para comparar varias carreteras con diferente alternativa de inversión (refuerzos, sellos, bacheos, rehabilitaciones y mejoramientos).

5.12.1. Rentabilidad del proyecto

Se ha considerado como factible el proyecto en estudio dado que los indicadores económicos son mayores que el costo de oportunidad del Capital (12%). Como resultado de las corridas del modelo HDM-4 y con las variables de entrada correspondiente, los resultados de rentabilidad son las que aparecen y se resumen en los siguientes cuadros y gráficas:

Tabla XVII. **Comparación y rentabilidad del proyecto**

Resultados de Análisis Económico	Tipo de Pavimento	Longitud (km)	Valor Presente Neto (M US\$).	Tasa Interna de Retorno (%)
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	DTS	26,02	10,969	37,8
	CA	26,02	14,318	33,9

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

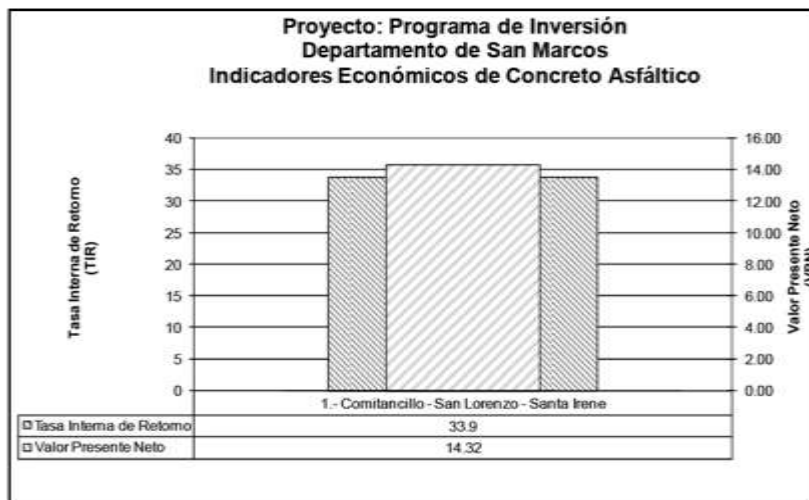
Se deja establecido que las 2 opciones son rentables y están económicamente justificadas. La opción de pavimentar con Concreto Asfáltico (AC) en relación con un Doble Tratamiento Superficial (DTS) acarrea mayores beneficios dando como resultado un Valor Presente Neto (VPN) de 14 318 millones de US\$ y una Tasa Interna de Retorno de 33,9%.

Figura 20. Programa de inversión departamento de San Marcos – indicadores económicos del Doble Tratamiento Superficial



Fuente: gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Figura 21. Programa de inversión departamento de San Marcos – indicadores económicos de Concreto Asfáltico



Fuente: gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Como puede observarse la inversión es completamente rentable en las condiciones que se tomen para la misma. Ello se debe fundamentalmente a que los impactos de un mejoramiento de la ruta son importantes debido al volumen del tráfico actual (principalmente en la cercanías de las comunidades) y del tráfico esperado según las proyecciones analizadas.

5.13. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad normal del proyecto se realizó suponiendo la probable ocurrencia de un incremento en los costos de construcción de la obra (+10%) y de un decrecimiento en los beneficios del tráfico vehicular y de pasajeros (-10%) y de la combinación de estos dos (+10% y -10%).

El análisis de sensibilidad indica que la rentabilidad económica del proyecto se mantiene satisfactoria a pesar de las variaciones en los indicadores antes mencionados.

Tabla XVIII. Resultados de análisis económico

Resultados de Análisis Económico	Tipo de Pavimento	Lontigud (km).	Valor Presente Neto (M US\$)	Tasa Interna de Retorno (%)	Análisis de Sensibilidad TIR		
					Costos +10%	Beneficios -10%	± 10%
Comitancillo-San Lorenzo- Santa Irene	DTS	26,02	10,969	37,8	36,20	36	34,40
	CA	26,02	14,318	33,9	32,20	32	30,30

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

5.13.1. Valores sensibles

El valor cambiante de una variable es el valor al que el VPN del proyecto se vuelve cero (o la TIR es igual a la tasa de descuento). Normalmente los valores sensibles se dan en porcentaje cambiando el valor de la variable que se necesita para que el valor de referencia se vuelva a poner cero. Cambiando los valores pueden ser útiles identificando qué variables afectan los resultados del proyecto.

En resumen este tipo de análisis es para determinar cuánto más puede incrementarse el costo o cuánto menos pueden disminuirse los beneficios de cada proyecto, para que no hayan beneficios ni costos adicionales. Se presenta la tabla que contiene dichos costos y reducciones de beneficios solamente para la alternativa escogida de Carpeta de Concreto Asfáltico (CA).

Tabla XIX. **Switching Values Multipliers (Valores límites para los que los costos son iguales a los beneficios)**

Resultados de Análisis Económico	Tipo de Pavimento	Costo Gobierno	Beneficios COV
Comitancillo - San Lorenzo	DTS	7,32	0,14
- Santa Irene	CA	6,06	0,17

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

Proyecto: Comitancillo – San Lorenzo –Santa Irene – Río Blanco:

Para el proyecto en (CA) los costos del gobierno podrían ser de hasta 6,06 veces más y aún justificar el proyecto. Los beneficios que obtienen los usuarios podrían ser reducidos hasta un 83% del valor básico y aún justificarse el proyecto. Ambas opciones tienen Tasas Internas de Retorno al 12% y VPN cero en el análisis de Switching values o valores críticos.

5.14. Sensibilidad al tráfico

Finalmente, se elaboró un análisis de sensibilidad y un ejemplo de gráfica para los proyectos en función de las tasas de crecimiento vehicular por ser uno de los factores más relevantes y sensibles en la evaluación económica, diferenciado para distintos escenarios como:

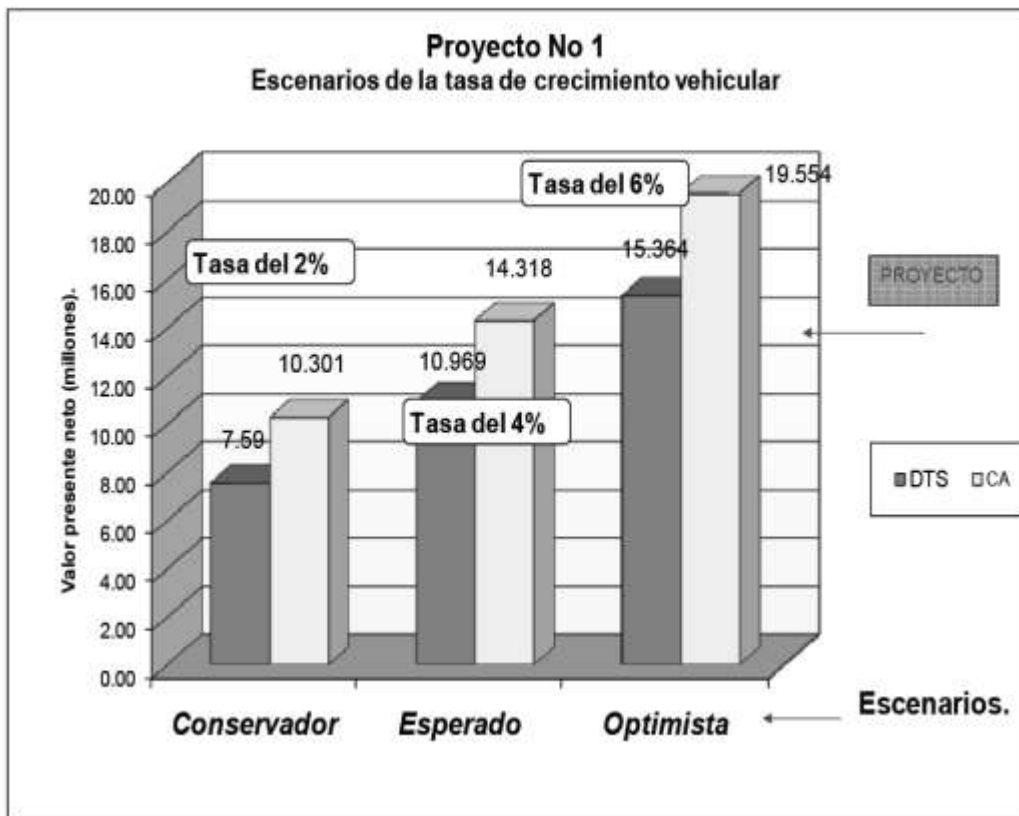
- A: bajo (conservador), 2%
- B: moderado (esperado) 4%
- C: alto (optimista), 6%

Tabla XX. **Indicadores económicos para el proyecto Comitancillo – San Lorenzo – Santa Irene**

Proyectos	Indicador Económico	2%	4%	6%	2%	4%	6%
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene		Doble Tratamiento Superficial (DTS)			Concreto Asfáltico (CA)		
	Valor Presente Neto (VPN)	7,59	10,969	15,364	10,301	14,318	19,554
	Tasa Interna de Retorno (TIR)	33,5	37,80	41,40	30,40	33,90	37,40

Fuente: análisis efectuado por el software HDM-4.

Figura 22. Escenarios de la tasa de crecimiento vehicular



Fuente: gráfica extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Tabla XXI. **Comparación por medio de VPN y TIR utilizando Doble Tratamiento Superficial y Concreto Asfáltico**

ITEM	Comitancillo-San Lorenzo-Santa Irene			
	Doble tratamiento Superficial (DTS)		Concreto Asfáltico (CA)	
Población	68,362		68,362	
Longitud (km)	26,02		26,02	
Costo Financiero MUS\$	4,291		6,192	
Costo Económico/km. (MUS\$ millones)	0,14		0,237	
TIR (%)	37,80		33,90	
Valor Presente Neto/km	0,422		0,550	
Tipo y condición de Superficie				
<u>Existente</u>				
Condición	Regular		Regular	
IRI	17,8		17,8	
<u>Propuesta</u>				
Condición	Buena		Buena	
IRI	2,5		1,7	
Tráfico				
TPDA Existente total	600		600	
Vehículos desplazamiento lento	155		155	
Fuentes Principales de Beneficios				
VPN millones al 12% US\$ Basados en COV y ahorro de tiempo	10,969		14,318	
Sensibilidad	VPN	TIR (%)	VPN	TIR (%)
Valor Base con VOC + Tiempo				
Costos +10%	10,795	36,2	14,035	32,2
Beneficios -10%	9,698	36	12,603	32
switching Value	Costo * Beneficio		Costo * Beneficio	
Costos y Beneficios de los usuarios	7,32	0,14	6,06	0,17

Fuente: extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

5.15. Resumen del proyecto y análisis de resultados

Características de los proyectos y evaluación

Sobre la ubicación física: todos los proyectos se ubican en el altiplano occidental de la República de Guatemala, específicamente en el departamento de San Marcos, considerando varios tramos que forman tres proyectos con una longitud total de 112,48 kilómetros de las cuales se describen solamente el primer proyecto a continuación:

Figura 23. Características del proyecto

Tramos	Longitud (km)	Proyecto
Comitancillo . San Lorenzo - Santa Irene	26,01	1

Fuente: elaboración propia.

Sobre el proyecto No.1: inicia en la cabecera municipal de Comitancillo, pasando por San Lorenzo y terminando por Santa Irene, donde entronca con la ruta nacional 12 con una longitud de 26 kilómetros. El ancho de la capa de rodadura es de 4,5 metros. En promedio con una velocidad de recorrido entre 15 – 20 kilómetros/hora. A lo largo del tramo San Lorenzo – Santa Irene existen dos puentes, la topografía es plana y semiplana a una altura de 2 620 metros sobre el nivel del mar (msnm) y con un clima frío.

La precipitación pluvial de la zona oscila entre 2 000 y 3 000 milímetros anuales, situación que induce a un mantenimiento permanente de la ruta, puesto que de lo contrario el deterioro se acelera y genera molestia a los usuarios. Y con la ejecución del proyecto se está beneficiando directamente a la población de San Lorenzo y Comitancillo, que en total suman 68 362 habitantes, quienes tendrán un mejor acceso a la ruta nacional 1 y por ende a las cabeceras departamentales de San Marcos y Quetzaltenango.

Sobre los tipos de vehículos: para el estudio en referencia se han utilizado 7 tipos de vehículos motorizados que consistieron en: automóvil, picop, microbús, bus, camiones de 2 ejes, camiones de 3 ejes, camiones de 4 y más ejes.

Sobre el tráfico promedio diario (TPD): en el primer proyecto (No.1) la flota vehicular registrada fue de 600 vehículos diarios, el 74,17% (445 unidades) son vehículos livianos y el 25,83% (155 unidades) son vehículos pesados.

Sobre los datos de entrada al modelo y costos unitarios: se ha utilizado el modelo HDM-4 para la evaluación económica de todos los proyectos, utilizando valores de costos unitarios actualizados. Los costos de operación vehicular se estimaron a partir de los precios unitarios (económicos) de los componentes de combustible, lubricantes, llantas, mano de obra, repuestos, precios de vehículos, etcétera.

Alternativas de proyectos

Sobre los criterios básicos de la evaluación: el período de análisis comprende la vida económica del proyecto con especificaciones de carretera de material selecto a una carretera pavimentada, con un período de análisis de 20 años realizándose la estimación a partir del 2012. Se ha utilizado una tasa de descuento social del 12%; y los resultados económicos son basados en indicadores tales como el Valor Presente Neto (VPN) y La Tasa Interna de Retorno (TIR).

Sobre la base o caso sin proyecto: esta alternativa compone una política optimizada de una intervención que se realizan en un período de doce meses y que se presenta con un bacheo para reemplazar el 30% de la pérdida de material anual (si el espesor de la grava o material selecto llega a 100 milímetros) y una renovación superficial (cuando el espesor del material selecto descienda de 50 milímetros o balastado cada 3 años). Se incluyó un mantenimiento de rutina de 1 000 US\$/kilómetros. Si se considera una política base no optimizada, es decir, sin hacer absolutamente ningún tipo de trabajo (en algunos casos es la realidad) sin duda alguna que se tendría más beneficios de los ya cuantificados en este análisis, pero aún, sin estos detalles que no son descartables, los proyectos en estudio presentan indicadores económicos sólidos para su ejecución.

Sobre el caso con proyecto: en este caso se tienen dos alternativas: doble tratamiento superficial y carpeta de concreto asfáltico. En este caso, la rugosidad media estimada es 2,5 IRI y de 1,7 IRI en el caso de la carpeta de asfalto. Con una actuación anual de mantenimiento de rutina y sello cuando alcance un 20 % de agrietamiento y de un refuerzo de 5 centímetros cuando se alcance una rugosidad del 4,5 IRI.

Sobre consideraciones técnicas para Doble Tratamiento Superficial (DTS): en el caso particular la decisión para los proyectos de pasar a la pavimentación de concreto asfáltico obedece a la colocación de la mezcla que por inclemencias del clima y humedad relativa de la zona, como también a las fuertes pendientes que podrían reflejar ahuellamiento mayores a 2 centímetros y consecuentemente ha desprendimiento de áridos, teniendo a corto plazo el inicio de la formación de baches ocasionando esto la reducción en las velocidades de todos los vehículos (factor que se ha tomado en cuenta para la evaluación de este proyecto) por lo que hace que se recomiende este cambio de carpeta.

Generalmente, los resellados como obra periódica no dan soporte estructural para este tipo de pavimento y no influyen en la reducción de la rugosidad teniendo este concepto un mayor IRI o rugosidad que los de concreto asfáltico y por ende mayores costos de operación vehicular.

Sobre consideraciones técnicas para Concreto Asfáltico (CA): la obra que se requiere es construir una calzada con una carpeta asfáltica de 10 centímetros y una base de 15 centímetros tratando de obtener un número estructural de 2,88 y con un ancho de 6 metros. La rugosidad en el caso de los caminos de Concreto Asfáltico (CA) son típicamente bajos y no influye mucho el espesor de la carpeta del asfalto. El camino se deteriora en función del tráfico y el ambiente a medida que transcurre el tiempo y el mantenimiento periódico consiste típicamente en refuerzos de mezcla de asfalto que tiene el objetivo de corregir daños de la superficie e incrementando el soporte estructural del pavimento y reduciendo la rugosidad.

Los trabajos de mantenimiento recurrentes que consisten en mantenimiento rutinario, sellando grietas y bacheo, la superficie impacta en la no progresión en el tiempo de la rugosidad una vez que las grietas y los baches aparecen qué típicamente pasan a los 5 años después de la inversión inicial. En los caminos de concreto asfáltico mantienen una rugosidad relativamente baja lográndose a través de los trabajos del mantenimiento periódico (refuerzos).

Resultados de la evaluación económica

Sobre los criterios básicos de los indicadores económicos: existe un sinnúmero de indicadores económicos para ser considerados como principales, pero, según los criterios adoptados por el Banco Mundial para proyectos viales para hacer una actividad periódica (pavimentación ya se DTS o CA) en las mismas secciones de carreteras como es el caso de este estudio, será el indicador del Mayor Valor Presente Neto o el Mayor Valor Presente Neto por kilómetro para la opción escogida. La Tasa Interna de Retorno (TIR) y razón B/C son desaconsejadas para comparar la alternativa como es el caso de este estudio, debido a que solamente se utilizan para comparar varias carreteras con diferentes alternativas de inversión (refuerzos, sellos, bacheos, rehabilitaciones y mejoramientos).

Sobre la rentabilidad de los proyectos: se deja establecido que las 2 opciones son rentables y están económicamente justificadas. La opción de pavimentar con Concreto Asfáltico (AC) en relación con un Doble Tratamiento Superficial (DTS) acarrea mayores beneficios dando como resultado un Valor Presente Neto (VPN) de US\$ 14318 millones para el proyecto y una Tasa Interna de Retorno de 33,9%.

Lo anterior se expresa en: menor progresión del deterioro de los caminos en su vida útil, por estar en mejor condición estructural del pavimento. Beneficios para todos los usuarios de vehículos de carga, de pasajeros, automóviles y picop, por transitar en caminos con mejores condiciones y en consecuencia con menores costos de operación. Rugosidad, en los que se resume en la siguiente tabla:

Tabla XXII. Resumen de los indicadores económicos por tipo de alternativa (Doble Tratamiento Superficial)

Resultados de Análisis Económico	Proyecto #	Tipo de Pavimento	Longitud (Km)	Valor Presente Neto (M US\$).	Tasa Interna de Retorno (%)
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	1	DTS	26,02	10,969	37,8

Fuente: información extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Tabla XXIII. Resumen de los indicadores económicos por tipo de alternativa (carpeta de Concreto Asfáltico)

Resultados de Análisis Económico	Proyecto #	Tipo de Pavimento	Longitud (Km)	Valor Presente Neto (M US\$).	Tasa Interna de Retorno (%)
Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene	1	CA	26,02	14,318	33,9

Fuente: información extraída directamente del análisis efectuado por el software HDM-4.

Sobre los indicadores económicos proyecto No.1: como resultado del análisis se concluye que basados en los criterios de priorización del Banco Mundial anteriormente expuestos con mucha claridad, se desprende que la opción más rentable para este proyecto es la de la colocación de la carpeta asfáltica con beneficios de US\$ 14 318 millones, mayores en un 31% que a los del doble tratamiento superficial. Por lo tanto, estos indicadores están respaldados también por los beneficios económicos (VPN) obtenidos por kilómetro por construir para cada proyecto, que en este caso resultan de US\$ 0,550 millones-kilómetro para CA y de US\$ 0,421 millones-kilómetro para DTS.

Sobre el análisis de sensibilidad: se han realizado varios análisis de sensibilidad con las variables más críticas o sensibles como son los costos , el tráfico y los valores sensibles cuando el Valor Presente Neto se vuelve cero, o la Tasa Interna de Retorno llega al 12%. Por consiguiente sobre el análisis de estas variables se concluye que los proyectos cumplen con las exigencias a las que fueron sometidas.

Sobre la sensibilidad a los costos de obras: el análisis de sensibilidad normal del proyecto se realizó suponiendo la probable ocurrencia de un incremento en los costos de construcción de la obra (+10%) y de un decrecimiento en los beneficios del tráfico vehicular y de pasajeros (-10%) y de la combinación de estos dos (+10% y -10%). El análisis de sensibilidad indica que la rentabilidad económica de los proyectos se mantiene satisfactoria a pesar de las variaciones en los indicadores antes mencionados.

Sobre la sensibilidad a la tasa de crecimiento del tráfico: el análisis de sensibilidad del proyecto se realizó suponiendo el decremento en el tráfico al 2% anual y el incremento del mismo al 6% anual con una base del 4% que se ha utilizado para este estudio (2%, 4% y 6%). El análisis de sensibilidad indica que la rentabilidad económica de los proyectos se mantiene satisfactoria a pesar de las variaciones en los indicadores antes mencionados.

Sobre la sensibilidad a los valores críticos (switching value): son valores sensibles que pueden aumentar los costos y disminuir los beneficios para que el Valor Presente Neto sea 0 y la TIR sea 12%.

Sobre los costos de asociados al cambio de la nueva alternativa: los valores, así como, el análisis del costo unitario de la empresa COCISA se tiene considerado en su contrato la colocación de Concreto Asfáltico en el mismo préstamo 7 169 del Banco Mundial. Con relación a la manera de financiar la diferencia del costo de la colocación de la carpeta asfáltica, esta será con recursos propios del Ministerio de Comunicaciones.

CONCLUSIONES

1. Los Sistemas de Gestión de Pavimentos SGP nacen de la necesidad de optimizar los fondos de una agencia de carreteras, para financiar obras de mantenimiento y mejoramiento de las redes de carretera bajo su cargo.

Los sistemas de gestión de pavimentos se relacionan de manera directa con el HDM, de tal forma que este actúa como una herramienta para la integración y organización de los datos provenientes del estudio de campo, para luego definir el tipo de intervención económica, con el fin de mejorar los niveles de servicio del pavimento partiendo de estrategias definidas por la agencia de carreteras.

2. Debido al complejo sistema del HDM es necesario definir un procedimiento de calibración antes de utilizar completamente el sistema, para obtener un modelo de predicción ajustado que ofrezca estimaciones realistas y confiables para establecer planes de conservación vial que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar los costos de operación de la carretera.
3. La aplicación del HDM a un proyecto de carreteras se basa en el análisis de estrategia, programa y proyecto que en su conjunto predicen las necesidades de la red, definen la asignación de trabajos prioritarios para crear un programa de obras de uno o más años, los cuales estiman la viabilidad económica de las alternativas de inversión.

4. Para la evaluación técnica de un proyecto de carreteras el HDM involucra los costos del sistema de transporte y los costos asociados con el camino, necesita datos técnicos que se extraen de inventarios viales, conteos de tránsito, evaluaciones del estado del pavimento y factores climáticos.

5. La evaluación económica se determina por indicadores de rentabilidad como la TIR, VAN y B/C. Los cuales definen la viabilidad de un proyecto si estos cumplen con los parámetros de calificación impuestos por la agencia de carreteras.

RECOMENDACIONES

1. Es indispensable determinar un único procedimiento para la administración y gestión de una red de pavimentos, asistido por una herramienta como el HDM, que sea fácil y accesible para usuarios de instituciones o agencias de carreteras.
2. La optimización de los recursos del estado es urgente para la conservación de las carreteras, debido a que carreteras con un buen nivel de servicio estimulan la actividad económica del país, una mejor integración nacional y una reducción en los costos de los usuarios.
3. Debido a que la conservación de una carretera supera el costo de una escuela o un centro de salud, es importante cuidar el presupuesto de inversión.
4. La implementación del HDM favorece la macroeconomía del país, debido a que el mercado interno y externo necesita una infraestructura vial eficiente, capaz y segura para facilitar el intercambio de servicios.
5. Es necesario invertir en la investigación de modelos de deterioro de pavimentos confiables y autosostenibles, que proveen la certeza necesaria para la toma de decisiones

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highways and Transportation Officials. *Guidelines for Pavement Management System*. Washington, D.C.: AASHTO, 2000. 28 p.
2. American Society for Testing and Materials. *Standard Guide for Network Level Pavement Management*. USA: ASTM, 2003. 43 p.
3. BACA URBINA, Gabriel. *Evaluación de proyectos*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2002. 373 p. ISBN: 970 -10 – 3001 - X.
4. BENGOA PÉREZ, Elva. *Descripción de sistemas de gestión de pavimentos y uso de los programas HDM-III y HDM-4*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2001. 145 p.
5. DE SOLMINIHAC, H. *Modelo de evaluación técnica de desempeño del mantenimiento de pavimentos flexible*. Revista de la Construcción, diciembre, vol.9, no. 2. 88 p.
6. _____. *Pavement and shoulder condition models developed with expert surveys: the Chilean application*. Arabian Journal for Science and Engineering , abril, vol. 34, no. 1B. p. 6.

7. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones. Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. Guatemala: MICIV, 2001. 37 p.
8. Gisystems. *Instructivo de preparativos de equipo de campo*. Guatemala: Gisystems, 2010. 7 p.
9. KERALI, Henry G.R. *HDM-4: Highway Development and Management: Overview of HDM-4*. Vol. I. Francia: Asociación Mundial de Carreteras, 2000. 43 p.
10. MENDOZA DÍAZ, Alberto. et al. *Aplicación del HDM-III a La Red Carretera Federal del Estado de Puebla*. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 164. 121 p.
11. SIECA. *Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras*. Guatemala: Cepredenac, 2010. 350 p.
12. SOLORIO MURILLO, Ricardo. *Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para Pavimentos Asfálticos*. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No 253. 83 p.
13. Unidad Ejecutora de Conservación Vial. *Especificaciones de Mantenimiento del Programa de Conservación Vial*. Guatemala: COVIAL. 2008. 164 p.
14. World Road Association. *HDM-4 Highway Development and Management, Versión 1*. Paris, Francia: World Road Association, 2000. 9 p.

APÉNDICE

**Resumen de proyecto
(Sin y con proyecto)
Comitancillo-San Lorenzo-Santa Irene**

Apéndice 1. Doble Tratamiento Superficial (DTS)

Proyecto: Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene (Doble tratamiento Superficial).																														
World Bank HDN-4 Management Tool- Resumen del Proyecto																														
Evaluación:										Monedas:		Millon US Dollar																		
Carretera: ICOMITANCILLO- SAN LORENZO- SANTA IRENE										26.00		12.0																		
Grupo 1: Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene										4.5		Tasa de Descuento (%)																		
Caso SIN PROYECTO										CASO CON PROYECTO					COMPARACION					SENSITIVIDAD					COSTOS DEL PROYECTO					
Año	Alternativa Base					DTS - Pavimentación					Beneficios Económicos					a					b					Costos Financieros Agencia				
	Tráfico Diario (TMD)	Rugosidad (IR)	Costos Agencia	Costos Veh&Tie	Costos AC&Ex Totales	Tráfico Diario (TMD)	Rugosidad (IR)	Costos Agencia	Costos Veh&Tie	Costos AC&Ex Totales	Costos Agencia	Costos Veh&Tie	Costos AC&Ex Totales	Beneficios Agencia	Costos Veh&Tie	Beneficios AC&Ex	Beneficios Netos	Agencia +10%	Usuario -10%	a & b	Costos Capital	Costos Recurram.	Costos Totales							
2012	600	17.8	0.92	13.24	0.00	14.16	600	21.5	3.67	14.44	0.00	18.11	-2.75	-1.20	0.00	-3.95	-4.22	-3.83	-4.1	4.29	0.03	4.32								
2013	624	10.5	0.16	11.6	0.00	11.76	624	2.5	0.02	11.27	0.00	11.29	0.13	0.33	0.00	0.46	0.48	0.43	0.44	0.00	0.03	0.03								
2014	649	14.7	0.16	13.29	0.00	13.45	649	3.5	0.05	11.75	0.00	11.80	0.10	1.54	0.00	1.64	1.66	1.49	1.5	0.00	0.06	0.06								
2015	675	16.4	0.92	14.37	0.00	15.29	675	3.7	0.05	12.23	0.00	12.28	0.67	2.14	0.00	3.01	3.1	2.79	2.888	0.00	0.06	0.06								
2016	702	10.9	0.16	13.16	0.00	13.32	702	3.9	0.05	12.74	0.00	12.79	0.10	0.42	0.00	0.52	0.54	0.49	0.5	0.00	0.06	0.06								
2017	730	15.3	0.16	15.14	0.00	15.30	730	4.3	0.07	13.27	0.00	13.34	0.09	1.87	0.00	1.96	1.97	1.77	1.78	0.00	0.08	0.08								
2018	759	16.8	0.92	16.35	0.00	17.27	759	4.7	2.19	13.83	0.00	16.02	-1.27	2.51	0.00	1.24	1.11	0.99	0.86	2.68	0.06	2.74								
2019	790	11.4	0.16	14.95	0.00	15.11	790	2.3	0.02	14.26	0.00	14.28	0.13	0.69	0.00	0.82	0.84	0.76	0.77	0.00	0.03	0.03								
2020	821	15.8	0.16	17.25	0.00	17.41	821	2.5	0.05	14.83	0.00	14.88	0.10	2.42	0.00	2.52	2.53	2.28	2.29	0.00	0.06	0.06								
2021	854	17.3	0.92	18.58	0.00	19.50	854	2.7	0.05	15.43	0.00	15.48	0.67	3.16	0.00	4.03	4.11	3.71	3.8	0.00	0.06	0.06								
2022	888	11.9	0.16	17.00	0.00	17.16	888	2.9	0.05	16.05	0.00	16.10	0.10	0.95	0.00	1.05	1.07	0.96	0.97	0.00	0.06	0.06								
2023	924	16.3	0.16	19.64	0.00	19.80	924	3.1	0.05	16.7	0.00	16.75	0.10	2.94	0.00	3.04	3.06	2.75	2.76	0.00	0.06	0.06								
2024	961	17.1	0.92	20.81	0.00	21.73	961	3.3	0.05	17.38	0.00	17.43	0.67	3.43	0.00	4.30	4.38	3.95	4.04	0.00	0.06	0.06								
2025	999	12.4	0.16	19.36	0.00	19.52	999	3.6	0.05	18.1	0.00	18.15	0.10	1.26	0.00	1.36	1.37	1.23	1.24	0.00	0.06	0.06								
2026	1039	16.8	0.16	22.36	0.00	22.52	1039	3.8	0.07	18.85	0.00	18.92	0.09	3.50	0.00	3.59	3.6	3.24	3.25	0.00	0.08	0.08								
2027	1081	17.5	0.92	23.65	0.00	24.57	1081	4.1	0.07	19.64	0.00	19.71	0.85	4.01	0.00	4.86	4.95	4.46	4.55	0.00	0.08	0.08								
2028	1124	12.9	0.16	22.07	0.00	22.23	1124	4.4	2.19	20.46	0.00	22.65	-2.04	1.61	0.00	-0.43	-0.63	-0.59	-0.79	2.88	0.06	2.74								
2029	1169	17.3	0.16	25.44	0.00	25.60	1169	2.3	0.02	21.13	0.00	21.15	0.13	4.31	0.00	4.44	4.46	4.01	4.03	0.00	0.03	0.03								
2030	1215	20.3	0.80	28.50	0.00	29.30	1215	2.4	0.05	21.99	0.00	22.04	0.75	6.51	0.00	7.26	7.34	6.61	6.69	0.00	0.06	0.06								
2031	1264	14.2	0.02	25.61	0.00	25.63	1264	2.6	-0.31	22.89	0.00	22.58	0.33	2.73	0.00	3.06	3.09	2.79	2.82	0.00	0.06	0.06								
Promedio								4.2												0.48	0.06	0.54								
Total (descontado)			3.68	133.87	0.00	137.56			5.42	121.17	0.00	126.59	-1.74	12.70	0.00	10.969	10.795	9.698	9.525	6.08	0.45	6.53								
Valor Actual Neto al 12% de tasa de Descuento																	10.969	10.795	9.698	9.525										
Valor Actual Neto al 12% de tasa de Descuento por Costo Financiero de Capital																	2.556	2.515	2.26	2.219										
Tasa interna de Retorno (%)																	37.80%	36.20%	36.00%	34.40%										
Tasa interna de Retorno Modificada (%):																	20.0%	19.80%	19.20%											

Continuación del apéndice 1.

Carpeta Asfáltica (CA)

Proyecto: Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene (Concreto Asfáltico)																							
World Bank HDM-4 Management Tool - Resumen del Proyecto																							
Evaluación:										Mileaje:		Miles US Dólar											
I-COMITANCILLO - SAN LORENZO - SANTA IRENE										26.00		12.0											
Carretera: Grupo 1 : Comitancillo - San Lorenzo - Santa Irene										4.5		Tasa de Descuento (%)											
COSO SIN PROYECTO																							
Alternativa Base																							
Año	Tráfico Diario (TMD)	Rugosidad (IR)	Costos Económicos			Tráfico Diario (TDM)	Rugosidad (IR)	Costos Económicos			Beneficios Económicos			SENSITIVIDAD			COSTOS DEL PROYECTO						
			Costos Agencia	Costos Velocidad	Costos AC&EX			Costos Agencia	Costos Velocidad	Costos AC&EX	Costos Agencia	Costos Velocidad	Costos AC&EX	Costos Agencia	Costos Velocidad	Costos AC&EX	Costos Agencia	Costos Velocidad	Costos AC&EX	Costos Recur.	Costos Totales		
2012	600	17.8	0.92	13.24	0.00	14.16	600	21.5	6.21	14.44	0.00	20.65	-5.29	-1.20	0.00	-6.49	-7.02	-6.37	-6.9	7.28	0.03	7.31	
2013	624	10.5	0.16	11.6	0.00	11.76	624	1.7	0.02	10.83	0.00	10.85	0.13	0.78	0.00	0.91	0.92	0.83	0.85	0.00	0.03	0.03	
2014	649	14.7	0.16	13.29	0.00	13.45	649	1.9	0.05	11.26	0.00	11.31	0.10	2.03	0.00	2.13	2.15	1.93	1.94	0.00	0.06	0.06	
2015	675	16.4	0.92	14.37	0.00	15.29	675	1.9	0.05	11.71	0.00	11.76	0.87	2.66	0.00	3.53	3.62	3.26	3.35	0.00	0.06	0.06	
2016	702	10.9	0.16	13.16	0.00	13.32	702	2.0	0.05	12.13	0.00	12.18	0.10	0.96	0.00	1.08	1.10	0.99	1	0.00	0.06	0.06	
2017	730	15.3	0.16	15.14	0.00	15.30	730	2.1	0.05	12.67	0.00	12.72	0.10	2.47	0.00	2.57	2.59	2.33	2.34	0.00	0.06	0.06	
2018	759	16.8	0.92	16.35	0.00	17.27	759	2.1	0.05	13.17	0.00	13.22	0.87	3.17	0.00	4.04	4.13	3.72	3.81	0.00	0.06	0.06	
2019	790	11.4	0.16	14.95	0.00	15.11	790	2.2	0.05	13.7	0.00	13.75	0.10	1.25	0.00	1.35	1.36	1.23	1.24	0.00	0.06	0.06	
2020	821	15.8	0.16	17.25	0.00	17.41	821	2.3	0.05	11.25	0.00	11.3	0.10	3.00	0.00	3.10	3.11	2.8	2.81	0.00	0.06	0.06	
2021	854	17.3	0.92	18.58	0.00	19.50	854	2.4	0.05	14.82	0.00	14.87	0.87	3.76	0.00	4.63	4.71	4.25	4.34	0.00	0.06	0.06	
2022	888	11.9	0.16	17.00	0.00	17.16	888	2.5	0.05	15.41	0.00	15.46	0.10	1.59	0.00	1.69	1.07	1.53	1.54	0.00	0.06	0.06	
2023	924	16.3	0.16	19.64	0.00	19.80	924	2.5	0.05	16.03	0.00	16.08	0.10	3.61	0.00	3.71	3.72	3.35	3.36	0.00	0.07	0.07	
2024	961	17.1	0.92	20.81	0.00	21.73	961	2.6	0.06	16.63	0.00	16.69	0.86	4.13	0.00	4.99	5.08	4.58	4.67	0.00	0.07	0.07	
2025	999	12.4	0.16	19.36	0.00	19.52	999	2.7	0.06	17.35	0.00	17.41	0.10	2.01	0.00	2.11	2.12	1.91	1.92	0.00	0.07	0.07	
2026	1039	16.8	0.16	22.36	0.00	22.52	1039	2.8	0.06	18.05	0.00	18.11	0.10	4.31	0.00	4.41	4.42	3.98	3.99	0.00	0.07	0.07	
2027	1081	17.5	0.92	23.65	0.00	24.57	1081	2.0	0.06	18.73	0.00	18.79	0.86	4.88	0.00	5.74	5.83	5.25	5.34	0.00	0.07	0.07	
2028	1124	12.9	0.16	22.07	0.00	22.23	1124	3.0	0.06	19.54	0.00	19.6	0.10	2.53	0.00	2.63	2.64	2.38	2.39	0.00	0.07	0.07	
2029	1169	17.3	0.16	25.44	0.00	25.60	1169	3.1	0.06	20.33	0.00	20.39	0.10	5.11	0.00	5.21	5.21	4.69	4.7	0.00	0.07	0.07	
2030	1215	20.3	0.8	28.50	0.00	29.30	1215	3.2	0.06	21.16	0.00	21.22	0.74	7.34	0.00	8.08	8.16	7.35	7.42	0.00	0.07	0.07	
2031	1264	14.2	0.02	25.61	0.00	25.63	1264	3.3	-0.56	22.03	0.00	21.47	0.58	3.58	0.00	4.16	4.22	3.80	3.86	0.00	0.08	0.08	
Promedio								3.4													0.36	0.06	0.43
Total (descuento)			3.68	133.87	0.00	137.56			6.51	116.73	0.00	123.24	-2.83	17.15	0.00	14.318	14.035	12.603	12.320	7.28	0.47	7.75	
Valor Actual Neto al 12% de tasa de descuento																							
Valor Actual Neto al 12% de tasa de descuento por Costo Financiero de Capital																							
Tasa interna de Retorno (%)																							
Tasa interna de Retorno Modificada (%):																							

Fuente: Información extraída del análisis efectuado por el software HDM-4.

