

**ANÁLISIS DEL PERÍODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON
BASE EN EL MODELO HDM-4**

**ANDRES FELIPE CASTRO SALINAS
MAYRA ALEJANDRA VEGA JAIMES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2009**

**ANÁLISIS DEL PERÍODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON
BASE EN EL MODELO HDM-4**

**ANDRES FELIPE CASTRO SALINAS
MAYRA ALEJANDRA VEGA JAIMES**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**Director del proyecto de grado
Ing. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON
Docente Escuela de Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2009**

A Dios por ser mi fortaleza y motor
por permitirme llegar a este
momento tan feliz en mi vida
pero especialmente por su infinita bondad.

A mis amados padres Saúl y Silvia, por su amor y alegría,
porque tantas veces me acompañaron en el
transitar de la búsqueda de mi gran sueño,
a ellos les debo todo lo que soy.

A mi hermana Genny Lizzeth por su apoyo incondicional,
por todos los bellos momentos que hemos pasado juntas
y experiencias que jamás olvidaré.

A mis abuelos con quienes compartí maravillosos momentos,
A quienes recuerdo y llevo en mi corazón,
Ellos desde el cielo están felices y orgullosos de mí, lo sé.

A Daniela porque desde que llego a mi vida
Con sus travesuras transforma
la rutina en un desorden de alegría.

A mi novio Andrés Felipe por ser uno de mis grandes tesoros,
por su inmenso cariño y compañía inagotable,
por permitirme conocer lo lindo que es el amor.

A mis sobrinos por su ternura y afecto.

A todos mis familiares por ser tan especiales conmigo,
Porque sin duda ellos serán los que siempre
Estarán junto a mí en cada etapa de mi vida.

A mis amigos por permitirme entrar en sus corazones
Para compartir alegrías, tristezas, desilusiones, emociones,
Y por sus voces de aliento en días difíciles.

MAYRA ALEJANDRA VEGA JAIMES

Quiero dedicar este trabajo especialmente a Dios,
Por darme la fuerza necesaria para culminar
Con dedicación y orgullo mi carrera.

A mis padres, por todo lo que han dado en esta vida,
Especialmente por sus sabios consejos
Y estar a mi lado en los momentos más difíciles,
Con su sacrificio y entrega permitieron
Que este sueño se hiciera realidad.

A mi madre Florecita, motor de mi vida,
Quién con su amor y comprensión hizo de mí
Una persona íntegra, responsable y correcta.

A mi padre Enrique por todo su apoyo ofrecido.

A mis hermanos Luis, Raúl y Marcela,
Quiénes desde la distancia me apoyaron y
Animaron por la lucha de mis metas.

A mi tía Marina quien es mi segunda madre
Y siempre se preocupo por ayudarme.

A Mayra Vega, el amor de mi vida,
Quién con su cariño, comprensión, apoyo
Y compañía hizo realidad este sueño.

A Silvia y Genny por ser tan especiales
Y hacerme sentir parte de su familia.

A mis amigos por su apoyo incondicional, su lealtad
Y sobre todo por brindarme una gran amistad.

ANDRES FELIPE CASTRO SALINAS

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de proyecto, Eduardo Alberto Castañeda quien con su dedicación, orientación y profesionalismo nos permitió la realización de este trabajo.

A los profesores de la escuela de Ingeniería Civil Jorge Gómez Gómez por permitirnos asistir al seminario orientado por el Ingeniero Efraín Solano quién aportó información actualizada y experiencia en la temática abordada, y a Guillermo Mejía Aguilar por su apoyo y asesoría en nuestro proyecto.

A nuestras familias, por ser quienes estuvieron siempre incondicionales en el camino para alcanzar este logro.

A nuestros amigos, porque durante toda la vida han sido pieza fundamental en nuestro desarrollo personal.

A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Civil, por su excelencia profesional y personal.

A la Universidad Industrial de Santander, por ser nuestra alma mater y brindarnos la oportunidad de vivir nuestros sueños.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABLAS | |
| RESUMEN..... | |
| ABSTRACT..... | |
| INTRODUCCION..... | 1 |
| 1. PERÍODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES | 4 |
| 2. EVALUACIÓN DE COSTOS DE CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO. | 7 |
| 2.1 EL ANÁLISIS ECONÓMICO: HERRAMIENTA FUNDAMENTAL EN LA TOMA DE DECISIONES | 8 |
| 2.2 FUNDAMENTOS ECONÓMICOS..... | 11 |
| 2.2.1 Inflación..... | 11 |
| 2.2.2 El valor de los recursos en el tiempo | 13 |
| 2.3 ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA (ACCV) | 14 |
| 2.3.1 Aplicaciones del ACCV | 14 |
| 2.3.2 Costos y beneficios de un proyecto de construcción y mantenimiento de pavimentos..... | 15 |
| 2.3.2.1 Principales costos a tener en cuenta en la evaluación..... | 16 |
| 2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA APLICABLES EN UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS..... | 18 |
| 2.4.1 Definiciones conceptuales..... | 18 |
| 2.4.1.1 Período de análisis..... | 19 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4.1.2 | Tasa de descuento..... | 19 |
| 2.4.2 | Métodos para la evaluación económica de las estrategias | 21 |
| 2.4.2.1 | Análisis relación Costo/Beneficio (BCA) | 21 |
| 2.4.2.2 | Valor presente neto (VPN) | 28 |
| 2.4.2.3 | Relación Beneficio – Costo | 30 |
| 2.4.2.4 | Tasa interna de retorno (TIR)..... | 31 |
| 2.4.2.5 | Selección de alternativas mutuamente excluyentes..... | 34 |
| 3. | EL HDM-4 COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE PROYECTOS VIALES..... | 37 |
| 3.1 | PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA..... | 39 |
| 3.2 | FUNCIONES Y USOS DEL HDM-4 EN LA GESTIÓN DE CARRETERAS | 41 |
| 3.2.1 | Planificación..... | 41 |
| 3.2.2 | Programación..... | 41 |
| 3.2.3 | Preparación..... | 42 |
| 3.3 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MODELOS DE DETERIORO | 43 |
| 3.3.1 | Modelo de agrietamiento..... | 45 |
| 3.3.2 | Perdida de áridos | 46 |
| 3.3.3 | Baches | 47 |
| 3.3.4 | Roderas | 48 |
| 3.4 | TIPOS DE DETERIORO | 49 |
| 3.4.1 | Deterioros superficiales..... | 49 |
| 3.4.2 | Deterioros relacionados con la deformación del pavimento | 50 |
| 3.4.3 | Deterioros relacionados con la textura superficial..... | 51 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5 | EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD (IRI) COMO INDICADOR GLOBAL DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS | 52 |
| 3.5.1 | Importancia del IRI en la metodología de análisis del HDM-4..... | 53 |
| 3.6 | COMPONENTES DE CÁLCULO DEL MODELO HDM-4..... | 55 |
| 3.6.1 | Modelo de deterioro de carreteras/RD Model (Road Deterioration Model) | 55 |
| 3.6.2 | Modelo de las obras de mantenimiento/WE Model (Works Effects Model) | 55 |
| 3.6.3 | Modelo de efectos para los usuarios/RUE Model (Road User Effects Model) | 57 |
| 3.6.4 | Modelo de efectos sociales y ambientales/SEE Model (Social and Environment Effects)..... | 58 |
| 3.7 | INDICADORES ECONÓMICOS..... | 59 |
| 3.8 | PRECIOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS..... | 60 |
| 3.9 | INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL MODELO HDM-4..... | 60 |
| 3.10 | ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PROYECTOS DE REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS..... | 63 |
| 3.11 | ESTIMACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO CON HDM-4..... | 63 |
| 3.12 | PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA EVALUACIÓN DE PROYECTOS CON EL MODELO HDM-4..... | 65 |
| 3.12.1 | Creación de bases de datos y fichas de información | 65 |
| 3.12.2 | Definición de estrategias | 65 |
| 3.12.3 | Evaluación de estrategias | 65 |
| 3.12.4 | Solicitud de Reportes | 65 |
| 4. | MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES | 66 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | MANTENIMIENTO DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS A LO LARGO DE SU VIDA ÚTIL..... | 67 |
| 4.2 | TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS..... | 69 |
| 4.2.1 | Mantenimiento rutinario..... | 70 |
| 4.2.1.1 | Sellado de grietas | 71 |
| 4.2.1.2 | Bacheo..... | 71 |
| 4.2.2 | Mantenimiento periódico | 72 |
| 4.2.2.1 | Riegos de sello..... | 73 |
| 4.2.2.2 | Sobrecarpetas..... | 73 |
| 4.2.2.3 | Reconstrucción | 74 |
| 4.3 | MANTENIMIENTO VIAL REALIZADO EN COLOMBIA | 74 |
| 5. | METODOLOGIA..... | 76 |
| 6. | CONFIGURACIÓN BÁSICA, DESARROLLO Y CALCULO DE COSTOS | 79 |
| 6.1 | ORGANIZACIÓN DE LAS BASES DE DATOS..... | 79 |
| 6.1.1 | Bases de Datos..... | 79 |
| 6.1.1.1 | Configuración preliminar | 79 |
| 6.1.1.2 | Redes de Carreteras..... | 80 |
| 6.1.1.3 | Parques de Vehículos | 80 |
| 6.1.2 | Estándares de Trabajo..... | 80 |
| 6.1.2.1 | Estándares de Conservación | 80 |
| 6.1.2.2 | Estándares de Mejoras | 80 |
| 6.1.2.3 | Costos de los Trabajos | 80 |
| 6.1.2.4 | Proyectos | 80 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.2 | DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL PROYECTO ... | 81 |
| 6.2.1 | Definición de la red de carretera | 81 |
| 6.2.1.1 | Descripción de las vías utilizadas | 82 |
| 6.2.1.2 | Clima | 82 |
| 6.2.1.3 | Sectorización de los tramos de análisis | 83 |
| 6.2.1.4 | Características geométricas..... | 84 |
| 6.2.1.5 | Tipo de firme | 86 |
| 6.2.1.6 | Índice de rugosidad internacional..... | 87 |
| 6.2.2 | Información vehicular | 88 |
| 6.2.2.1 | Características del parque automotor colombiano..... | 88 |
| 6.2.2.2 | Definición de costos económicos para el parque automotor colombiano | 88 |
| 6.2.3 | Definición del tráfico utilizado..... | 93 |
| 6.2.3.1 | Tránsito Normal..... | 93 |
| 6.2.3.2 | Tránsito Atraído..... | 93 |
| 6.2.3.3 | Tránsito Generado | 93 |
| 6.3 | ESTÁNDARES DE MEJORAS Y DE CONSERVACION | 96 |
| 6.3.1 | Estándares de Mejoras | 97 |
| 6.3.1.1 | Número de ejes equivalentes para los tráncos en análisis..... | 97 |
| 6.3.1.2 | Estructuras planteadas para las mejoras | 99 |
| 6.3.1.3 | Costos directos para las estructuras de pavimento planteadas | 104 |
| 6.3.2 | Alternativas de conservación | 118 |
| 6.3.2.1 | Formulación de la Alternativas con las siguientes actividades de conservación | 118 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.4 | EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS | 128 |
| 6.4.1 | Definición del proyecto | 128 |
| 6.4.2 | Especificación de alternativas | 131 |
| 6.4.3 | Análisis del proyecto | 132 |
| 7. | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE INDICADORES DE COSTOS | 134 |
| 7.1 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 134 |
| 7.2 | COSTOS ECONÓMICOS POR TRAMO PARA CADA UNA DE LAS DE LAS ALTERNATIVAS DE MEJORA Y CONSERVACIÓN..... | 135 |
| 7.2.1 | Costos por tramo para el tránsito bajo | 135 |
| 7.2.2 | Costos por tramo para el tránsito medio | 139 |
| 7.2.3 | Costos por tramo para el tránsito alto | 143 |
| 7.3 | INDICADORES ECONÓMICOS..... | 146 |
| 7.3.1 | Tránsito bajo | 147 |
| 7.3.2 | Tránsito medio | 150 |
| 7.3.3 | Tránsito alto | 153 |
| | CONCLUSIONES | 157 |
| | BIBLIOGRAFIA | 159 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estado de la vía antes y después del deterioro. | 8 |
| Figura 2. Evolución de costos de la sociedad. | 38 |
| Figura 3. Presentación software HDM-4 | 39 |
| Figura 4. Ventana de bienvenida al HDM-4. | 40 |
| Figura 5. Espacio de Trabajo | 41 |
| Figura 6. Agrietamiento estructural por fatiga y envejecimiento..... | 45 |
| Figura 7. Pérdida progresiva de material en la superficie. | 46 |
| Figura 8. Deterioro de grietas anchas y pérdida de áridos severa..... | 47 |
| Figura 9. Deformación permanente en el pavimento. | 48 |
| Figura 10. Interacción entre los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos | 52 |
| Figura 13. Comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil..... | 68 |
| Figura 14. Red de carreteras creadas en el HDM-4 | 81 |
| Figura 15. Definición de las características del tramo..... | 83 |
| Figura 16. Tramos planteados. | 83 |
| Figura 17. Ingreso de Datos Geométricos. | 86 |
| Figura 18. Pestaña Firme | 87 |
| Figura 19. Pestaña Estado | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figura 20. Parque automotor seleccionado | 96 |
| Figura 21. Composición Actual del Suelo sin mejora..... | 115 |
| Figura 22. Diseño propuesto como mejora | 115 |
| Figura 23. Duración del proceso constructivo | 116 |
| Figura 24. Costos totales de construcción | 116 |
| Figura 25. Tipo de mezcla asfáltica utilizada | 117 |
| Figura 26. Características geométricas | 117 |
| Figura 27. Índice de regularidad (IRI) inicial | 118 |
| Figura 28. Actividades propuestas en el mantenimiento rutinario..... | 119 |
| Figura 29. Sello de fisuras correctivo..... | 120 |
| Figura 30. Tipo de intervención planteada en el Sello de fisuras..... | 121 |
| Figura 31. Sello de fisuras programado. | 121 |
| Figura 32 Intervalo de tiempo estimado para la aplicación. | 122 |
| Figura 33. Costos unitarios del sellado de grietas | 122 |
| Figura 34. Porcentaje de daño a reparar | 123 |
| Figura 35. Tipo de intervención para el bacheo tipo I | 124 |
| Figura 36. Criterio aplicado para la realización del bacheo | 124 |
| Figura 37. Tipo de intervención para el bacheo tipo II | 125 |
| Figura 38. Intervalo de tiempo estimado para la aplicación de esta actividad | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 39. Costos asignados para esta actividad | 126 |
| Figura 40. Porcentaje de daño y tipo intervención a considerar | 126 |
| Figura 41. Tipo de Intervención asignada a la limpieza | 127 |
| Figura 42. Intervalo de tiempo estimado para la aplicación de la actividad de limpieza..... | 127 |
| Figura 43. Costos unitarios para la limpieza | 128 |
| Figura 44. Definición proyecto. | 129 |
| Figura 45. Selección de tramos | 129 |
| Figura 46. Selección de vehículos | 130 |
| Figura 47. Definición de tramos a analizar..... | 130 |
| Figura 48. Detalle del tráfico normal | 131 |
| Figura 49. Definición de alternativas..... | 132 |
| Figura 50. Configuración de ejecución..... | 133 |
| Figura 51. Ejecución del análisis..... | 133 |
| Figura 52. Informes generados | 134 |
| Figura 53. Tránsito bajo CBR=3% - CBR=5% - CBR=10% | 148 |
| Figura 54. Regularidad media Tramo 1 CBR=3% PD=5 años | 149 |
| Figura 55. Regularidad media Tramo 1 CBR=5% PD=10 años | 149 |
| Figura 56. Regularidad media Tramo 1 CBR=10% PD=20 años | 150 |
| Figura 57. Tránsito medio CBR=3% - CBR=5% - CBR=10% | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58. Regularidad media Tramo 2 CBR=3% PD=20 años | 152 |
| Figura 59. Regularidad media Tramo 2 CBR=5% PD=30años | 152 |
| Figura 60. Regularidad media Tramo 2 CBR=10% PD=30 años | 153 |
| Figura 61. Tránsito alto CBR=3% - CBR=5% - CBR=10% | 154 |
| Figura 62. Regularidad media Tramo 3 CBR=3% PD=20 años | 155 |
| Figura 63. Regularidad media Tramo 3 CBR=5% PD=30 años | 155 |
| Figura 64. Regularidad media Tramo 3 CBR=10% PD=30 años | 156 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Elementos usados por BCA | 25 |
| Tabla 2. Actividades de conservación consideradas por el modelo | 56 |
| Tabla 3. Actividades de desarrollo consideradas por el modelo | 56 |
| Tabla 4. Variables tomadas para cada uno de los tramos | 82 |
| Tabla 5. Variables tomadas para cada uno de los tramos | 82 |
| Tabla 6. Variables tomadas para cada uno de los tramos | 85 |
| Tabla 7. Variables utilizadas para los tramos en estudio | 86 |
| Tabla 8. Costos Económicos para un automóvil | 89 |
| Tabla 9. Costos Económicos para buses | 90 |
| Tabla 10. Costos Económicos para un camión C2 pequeño | 90 |
| Tabla 11. Costos Económicos para un camión C2 grande | 91 |
| Tabla 12. Costos Económicos para un camión C3-C4 | 91 |
| Tabla 13. Costos Económicos para un camión C5 | 92 |
| Tabla 14. Costos Económicos para un camión >C5 | 92 |
| Tabla 15. TPD utilizado para transito bajo | 94 |
| Tabla 16. TPD utilizado para transito medio | 94 |
| Tabla 17. TPD utilizado para transito alto | 94 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 18. Composición del tráfico bajo..... | 95 |
| Tabla 19. Composición del tráfico medio..... | 95 |
| Tabla 20. Composición del tráfico alto..... | 95 |
| Tabla 21. Valores para desarrollo de ecuación | 97 |
| Tabla 22. Número de ejes equivalentes para tráfico Bajo- Medio –Alto | 98 |
| Tabla 23. Estructuras planteadas para transito bajo con periodos de 5-10 años .. | 99 |
| Tabla 24. Estructuras planteadas para transito bajo con periodos de 20-30 años | 100 |
| Tabla 25. Estructuras planteadas para transito medio con periodos de 5-10 años | 101 |
| Tabla 26. Estructuras planteadas para transito medio con periodos de 20-30 años | 102 |
| Tabla 27. Estructuras planteadas para transito alto con periodos de 5-10 años . | 103 |
| Tabla 28. Estructuras planteadas para transito alto con periodos de 20-30 años | 104 |
| Tabla 29. Costos de construcción del pavimento | 105 |
| Tabla 30. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD bajo..... | 105 |
| Tabla 31. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD bajo | 106 |
| Tabla 32. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD bajo | 107 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 33. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD bajo | 108 |
| Tabla 34. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD medio..... | 108 |
| Tabla 35. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD medio | 109 |
| Tabla 36. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD medio | 110 |
| Tabla 37. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD medio | 111 |
| Tabla 38. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD alto..... | 111 |
| Tabla 39. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD alto. | 112 |
| Tabla 40. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD alto. | 113 |
| Tabla 41. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD alto. | 114 |
| Tabla 42. Mantenimiento Rutinario Correctivo | 120 |
| Tabla 43. Mantenimiento Rutinario Programado | 121 |
| Tabla 44. Costos correspondientes al sello de fisuras | 122 |
| Tabla 45. Bacheo para mantenimiento rutinario correctivo | 123 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 46. Bacheo para mantenimiento rutinario programado..... | 125 |
| Tabla 47. Costos unitarios del bacheo | 126 |
| Tabla 48. Costos asignados a la limpieza cada año. | 128 |
| Tabla 49. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años | 136 |
| Tabla 50. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años | 136 |
| Tabla 51. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años | 136 |
| Tabla 52. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años | 136 |
| Tabla 53. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años | 137 |
| Tabla 54. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años | 137 |
| Tabla 55. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años | 137 |
| Tabla 56. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años | 138 |
| Tabla 57. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años | 138 |
| Tabla 58. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años | 138 |
| Tabla 59. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años | 139 |
| Tabla 60. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años | 139 |
| Tabla 61. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años | 140 |
| Tabla 62. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años | 140 |
| Tabla 63. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años | 140 |
| Tabla 64. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años | 140 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 65. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años | 141 |
| Tabla 66. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años | 141 |
| Tabla 67. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años | 141 |
| Tabla 68. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años | 141 |
| Tabla 69. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años | 142 |
| Tabla 70. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años | 142 |
| Tabla 71. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años | 142 |
| Tabla 72. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años | 142 |
| Tabla 73. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años | 143 |
| Tabla 74. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años | 143 |
| Tabla 75. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años | 143 |
| Tabla 76. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años | 144 |
| Tabla 77. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años | 144 |
| Tabla 78. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años | 144 |
| Tabla 79. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años | 144 |
| Tabla 80. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años | 145 |
| Tabla 81. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años | 145 |
| Tabla 82. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años | 145 |
| Tabla 83. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años | 145 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 84. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años | 146 |
| Tabla 85. VPN-TIR Tránsito bajo. | 147 |
| Tabla 86. VPN-TIR Tránsito medio. | 150 |
| Tabla 87. VPN-TIR Transito alto. | 153 |

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL PERÍODO DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES CON BASE EN EL MODELO HDM-4*

AUTORES: MAYRA ALEJANDRA VEGA JAIMES
ANDRES FELIPE CASTRO SALINAS**

PALABRAS CLAVES: Evaluación económica, factibilidad, deterioro, conservación, mantenimiento, costos, HDM-4.

La red vial es uno de los factores más importantes para el desarrollo económico y social del país. Su estado ha despertado gran interés por parte de las entidades públicas para plantear mejores estándares de construcción, planes de conservación y mantenimiento de los pavimentos debido al mal estado en el que se encuentran, procurando que las evaluaciones técnico económicas que se realicen permitan tomar decisiones acertadas en cuanto a la rentabilidad de las inversiones propuestas.

El modelo HDM permite simular el comportamiento de un tramo homogéneo, este es un modelo estadístico que ayuda a conocer el estado funcional y estructural de la vía partiendo de unas condiciones iniciales como geometría, clima, pavimento, capa de rodadura, etc. y planteando hacia futuro unas actividades de mantenimiento. Este evalúa estrategias de construcción y mantenimiento de las carreteras considerando la rentabilidad de los proyectos sobre la base del costo global y general de uso.

En el análisis se evalúa y considera todos los costos asociados a cada alternativa propuesta a lo largo de la vida útil de los proyectos. Para esto se describirán algunas de las técnicas de análisis de costos como Análisis del Ciclo de Vida, Costos y Beneficios y efectos sobre los usuarios.

En este proyecto se describe el procedimiento utilizado para la segmentación de los distintos tramos en el análisis, especificando los pasos a seguir para la correcta formulación de un proyecto en el HDM-4, definiendo las alternativas y estándares de conservación.

El objetivo primordial de este trabajo de grado es determinar la conveniencia de elegir periodos de diseño cortos o largos para la construcción de pavimentos flexibles, planteando alternativas de evaluación y conservación compuestas por tramos con distintos tipos de tráfico, capacidad del suelo y periodos de diseño.

*Proyecto de grado

** Facultad de Ciencias Físico - mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Castañeda

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE PERIOD OF DESIGN FOR FLEXIBLE PAVEMENTS WITH BASE ON MODEL HDM-4*

AUTHORS: MAYRA ALEJANDRA VEGA JAIMES
ANDRES FELIPE CASTRO SALINAS**

KEY WORDS: Economic evaluation, feasibility, deterioration, conservation, maintenance, costs, HDM-4.

The road network is one of the most important factors for the economic and social development of the country. Its state has walked up great interest on the part of the public organizations to raise better standards of construction, plans of conservation and maintenance of the pavements due to badly been in which they are, trying that economic evaluations technical that are made allow to make decisions guessed right as far as the yield from the propose investments.

Model HDM it allows to simulate the behavior of a homogenous section, this it is a statistical model that helps to know functional and structural the state of the route starting off of conditions it initiates to them like geometry, climate, pavement, layer of tread, etc. and raising towards future maintenance activities. This it evaluates strategies of construction and maintenance of the highways considering the yield of the projects on the base of the global and general cost of use.

In the analysis one evaluates and it considers all the costs associated to each propose alternative throughout the life utility of the projects. It stops this some of the techniques of analysis of costs like Analysis of the Cost, Service life will be described and Benefit and effects you exceed the users. In this project one describes to the procedure used for the segmentation of the different sections in the analysis, specifying the steps to follow for the correct formulation of a project in the HDM-4, defining the alternatives and standards of conservation.

The fundamental objective of this work of degree is to determine the convenience of choosing periods of short or long design for the construction of flexible pavements, raising alternative of evaluation and conservation composed by sections with different types from traffic, capacity of the ground and periods of design.

*Degree project

** Faculty of Sciences Physical - mechanical. School of Civil Engineering. Director Eduardo Alberto Castañeda.

INTRODUCCION

Los elevados costos de las obras de infraestructura vial y la limitación de los presupuestos para ejecutarlos, han obligado a las administraciones viales a realizar estudios de costos y evaluaciones técnico económicas que permitan tomar decisiones acertadas en cuanto a la rentabilidad positiva de las inversiones. En general, el propósito es minimizar el costo total del transporte, incluidas la infraestructura y la operación vehicular, como base para determinar los planes y programas de rehabilitación y de mantenimiento de vías.

La evaluación económica se utiliza, tanto para determinar la factibilidad como para elegir entre distintas estrategias de un proyecto. En el análisis se evalúan y se consideran todos los costos o flujos de dinero asociados a cada estrategia propuesta a lo largo de la vida útil. De esta manera, la evaluación económica ayuda a elegir la estrategia de inversión que se considere más adecuada para los intereses institucionales. La evaluación económica en sí no representa una decisión y, por ello, conviene que los criterios de aplicación para la decisión sean definidos antes de que los resultados de la evaluación sean aplicados. En todo caso, se deben examinar todas las estrategias técnicamente viables dentro del tiempo previsto para el análisis, incluyendo la comparación con la situación existente.

A fin de mejorar los procesos internos relacionados con la conservación y mejoramiento de las redes viales, se ha impulsado el desarrollo de herramientas computacionales para el apoyo a los profesionales que se desempeñan en el ámbito de la administración y gestión de carreteras. Estas herramientas incorporan modelos de comportamiento de estructuras de pavimentos que deben ser adaptados a las condiciones particulares de cada país o región donde serán utilizados. La importancia del proceso de apreciación de los proyectos está en el

impacto económico, ya que debido a la influencia directa en el inicio y progresión de los deterioros del pavimento en un determinado tiempo, se hace necesaria una adecuada adaptación de ellos, de modo que se pueda efectuar una evaluación económica eficaz y nos permita darle una mayor solides a cada uno de los proyectos viales en estudio.

El HDM4 es una herramienta informática diseñada para la evaluación de los aspectos técnicos y económicos de proyectos de inversión vial.

El software consiste básicamente en tres módulos los cuales permiten simular la evolución de la condición de la carretera con el tiempo, bajo los efectos del tránsito vehicular, de la geometría, del tipo de pavimento, del clima, etc. y las necesidades de mantenimiento, además evaluación de los costos de transporte, determinando los costos de operación vehicular, la velocidad y los tiempos de recorrido, en relación con la condición de la carretera y el nivel de tránsito, por ultimo realiza balance económico, creando una síntesis de los cálculos anteriores; a partir de los flujos anuales de costos calcula varios indicadores económicos los cuales permitirán determinar cuáles serán las condiciones iniciales para poner en realización dicho proyecto.

Durante las últimas décadas la mayoría de los recursos de inversión en infraestructura vial de los países en desarrollo en general, y de Colombia en particular, se han usado para la construcción de pavimentos diseñados a cortos períodos de vida útil de 10 años. En países desarrollados los períodos de diseño son generalmente superiores a 20 años y existen grupos de ingeniería que consideran que la estructura de pavimento debería ser diseñada para resistir cargas por más de 40 años, pero lo peor del caso es que existen deficiencias en lo que concierne a la parte constructiva y carencia de programas de mantenimiento, que no ha permitido tener una red vial que satisfaga las necesidades del país.

Este análisis tiene como finalidad determinar la conveniencia de elegir periodos de diseño cortos o largos para la construcción de pavimentos flexibles, tomando como referencia de estudio 3 tipos de subbase, en donde se realiza una comparación entre estas, con pavimentos de bajo, medio y alto comportamiento estructural.

En este trabajo de grado se establecen los resultados de los modelos de deterioro del programa HDM-4, al cambiar los datos de entrada cuando se modela una estructura de pavimento flexible y de esta forma aprovechar la herramienta para realizar varios análisis de unas determinadas vías durante una serie de periodos de diseño preestablecidos y así saber cómo será su comportamiento de acuerdo a las solicitaciones proyectadas.

1. PERÍODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

El periodo de diseño juega un papel fundamental en el diseño de pavimentos asfálticos, permitiendo definir el tiempo estimado para determinar las solicitaciones de carga y de esta manera determinar las características estructurales del pavimento. Este puede definirse como el lapso transcurrido desde que se entrega al servicio la estructura, hasta que los deterioros producidos por el tránsito y los agentes ambientales normales hacen que la vía pierda su funcionalidad. Para garantizar un adecuado nivel de servicio que asegure movilidad, accesibilidad y seguridad se deberá establecer estándares de conservación que permitan mantener la capa de rodadura en buenas condiciones cuando entre en funcionamiento la vía.

Conviene recordar que a la luz del conocimiento actual, el diseño de un pavimento constituye un complejo problema físico-mecánico donde se interrelacionan variables tan diversas como las asociadas al ambiente, la geometría de las calzadas, las cargas del tránsito, los suelos de soporte, los materiales de construcción y la calidad de la construcción y del mantenimiento que pueden afectar el desempeño de la estructura.

Debido al estado de la red vial nacional, este se ha consolidado como el sistema más utilizado de desplazamiento de carga y de pasajeros en los últimos años. Este medio de transporte ha generado que el parque automotor circulante por las vías del país se incremente tanto en número como en magnitud de cargas. En general, el incremento promedio anual del tránsito es considerable y la capacidad instalada del parque automotor de carga ha venido creciendo con una tasa anual alta. Con respecto al clima, fenómenos ambientales como “El Niño” o “La Niña”, hacen que la temperatura presente variabilidad interanual de 2°C en algunas

zonas del territorio nacional y que la precipitación aumente provocando períodos de lluvia de hasta dos meses más de lo normal por año.

Para lo anterior, es indispensable que el pavimento posea estándares mínimos de conservación, los cuales permitirán que la vida útil de la estructura se prolongue impidiendo que el deterioro haga perder por completo su capacidad estructural.

En Colombia el método de diseño de pavimentos flexibles planteado de acuerdo con Instituto Nacional de Vías correlaciona el comportamiento de los pavimentos flexibles, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Donde los cambios en el tiempo de las condiciones de tránsito o del clima de la zona de estudio pueden hacer que métodos de este tipo pierdan confiabilidad en la predicción del dimensionamiento de pavimentos.

En el diseño de pavimentos se ha venido utilizando el método AASHTO dispuesto en los manuales de diseño para tránsitos bajos y altos del INVIAS. El algoritmo básico corresponde a la versión del año 1993, tomando de ésta algunos criterios y correlaciones que se han considerado particularmente útiles dado el nivel de detalle requerido por el diseño de los pavimentos asfálticos de las carreteras a las cuales va dirigido el estudio.

En consecuencia, de la tradicional definición de una sección estructural inicial para un “período de diseño” fijo, establecido de manera más o menos arbitraria, se ha pasado a la concepción de estrategias a mediano plazo, es decir, diseños optimizados que incluyen y analizan no sólo la construcción inicial, sino también la mejor combinación de materiales, políticas de construcción y mantenimiento rutinario, ciclos de refuerzo y rehabilitación y costos inherentes a los usuarios. El manejo de estas funciones involucra la operación de numerosas variables que en la práctica se ven acotadas por las limitaciones impuestas por los proyectistas debidos principalmente a no contar con los fondos disponibles para su inversión.

Las distintas entidades encargadas del diseño de pavimentos, se encuentran, entonces, ante la posibilidad de seleccionar diseños iniciales muy débiles que reclaman varios ciclos de refuerzo y pavimentos robustos que prácticamente no requieren ningún refuerzo durante un período prolongado. Así, el que pudiera denominarse “diseño integral” de un pavimento, suele implicar la consideración de varios ciclos en los que el sistema es repetidamente analizado. El primero de estos ciclos es el que se define como “Período de diseño estructural”.

En Estados Unidos, México, Argentina y Chile optan por considerar periodos de diseño estructural a largo plazo, donde se consideran para vías con grandes afluentes de tránsito entre 20-40 años, para vías de orden secundario entre 15-30 años ya para carreteras colectoras suburbanas entre 10-20 años.

En Colombia dado nivel de tránsito de las vías contempladas dentro de la red nacional y considerando las limitaciones de tipo operativo con que probablemente desarrollen su misión las entidades encargadas de su construcción y su mantenimiento, han considerado prudente adoptar un periodo de diseño estructural de diez (10) años, con el propósito de permitir que el pavimento tenga un comportamiento adecuado durante su vida útil.

Por lo tanto para el caso Colombiano, donde existe variedad de composición y tipos de suelos, escoger un periodo de diseño definido puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas, por lo que en ocasiones las entidades junto con su personal se han cuestionado lo conveniente que significaría contemplar nuevos periodos de diseño para las condiciones colombianas, teniendo como referencia el análisis de la funcionalidad y evolución de la estructura en el transcurso del tiempo, así como del desarrollo tecnológico y de diferentes estrategias de refuerzo para prolongar la vida útil de las calzadas preservando el patrimonio vial en Colombia.

2. EVALUACIÓN DE COSTOS DE CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO.

Conocida la viabilidad de un proyecto es necesario entrar a determinar si el capital invertido, el esfuerzo y riesgo que implica su ejecución son lo suficientemente remunerados.

Para la evaluación en términos económicos de los programas o proyectos de construcción y mantenimiento, de acuerdo a los resultados de los montos y beneficios de cada alternativa considerada, se calcula los indicadores de rentabilidad como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR). En términos generales, los costos incluidos en el análisis corresponden al gasto corriente y de inversión en los que debe incurrir la organización operadora para que se ejecuten las obras, mientras que los beneficios se derivan principalmente de ahorros en gastos de operación vehicular y disminución de los tiempos de recorrido, inducidos ambos por el mejoramiento del estado físico de las carreteras, y la reducción de la congestión.

Como se sustenta en este capítulo, los factores económicos juegan un papel importante en la toma de decisiones entre las alternativas propuestas por parte de la administración de proyectos viales.

Figura 1. Estado de la vía antes y después del deterioro.



2.1 EL ANÁLISIS ECONÓMICO: HERRAMIENTA FUNDAMENTAL EN LA TOMA DE DECISIONES

Los elevados costos de las obras de infraestructura vial y la limitación de los presupuestos para ejecutarlos, han obligado a las administraciones viales a realizar estudios de costos y evaluaciones técnico económicas que permitan tomar decisiones acertadas en cuanto a la rentabilidad positiva de las inversiones. En general, el propósito es minimizar el costo total del transporte, incluidas la infraestructura y la operación vehicular, como base para determinar los planes y programas de rehabilitación y de mantenimiento de vías.

La evaluación económica se utiliza, tanto para determinar la factibilidad como para elegir entre distintas estrategias de un proyecto. En el análisis se evalúan y consideran todos los costos o flujos de dinero asociados a cada estrategia propuesta a lo largo de la vida útil. De esta manera, la evaluación económica

ayuda a elegir la estrategia de inversión que se considere más adecuada para los intereses institucionales. La evaluación económica en sí no representa una decisión y, por ello, conviene que los criterios de aplicación para la decisión sean definidos antes de que los resultados de la evaluación sean aplicados. En todo caso, se deben examinar todas las estrategias técnicamente viables dentro del tiempo previsto para el análisis, incluyendo la comparación con la situación existente.

En general, se distinguen dos tipos de evaluación en un proyecto vial, según el punto de vista de la entidad encargada de realizar la inversión: privada o pública.

La evaluación privada o financiera es la que busca conocer el retorno o rendimiento que un proyecto generará, con base en el capital a invertir, en este caso se comparan los costos y los flujos de ingresos que afectan exclusivamente a un proyecto. Es el caso de las carreteras en concesión, en las cuales la atención se centra en optimizar los costos de inversión para lograr las condiciones mínimas exigidas de la vía y en maximizar los ingresos por el cobro de peaje, por ejemplo.

La evaluación pública o económica es la que considera los costos y beneficios que un proyecto tiene para la sociedad. Se denomina, también, evaluación social o evaluación socio-económica y se aplica por las entidades de gobierno o públicas que realizan la inversión y cuyo interés es maximizar el beneficio público con la realización del proyecto vial.

Por otra parte se consideran diferentes aspectos vitales en el funcionamiento de dichos proyectos como el análisis del tránsito, estudios beneficio-costos y evaluación de riesgos, siendo necesarios al estimar un posible flujo de capitales en un rango de tiempo deseado. Para obtener estos resultados, se

aplican ciertos modelos que más adelante se mencionarán y que no han sido adaptados, sino elaborados específicamente para este tipo de obras.

Algunas ventajas que se obtienen del análisis económico son las siguientes:

- Obtención del costo efectivo en el diseño y construcción: El análisis muestra qué proyecto resulta más económico tanto para la agencia diseñadora, como para el usuario, en términos de funcionalidad y de comodidad, y es posible encontrar la opción que provea de un balance adecuado entre las dos necesidades.
- Mejor recuperación de la inversión: Los programas que son analizados o que son formulados con base en este tipo de análisis, son capaces de generar un mayor margen de ganancia al inversionista, considerando algún período de tiempo dado y con un presupuesto también definido con anterioridad.
- Comprensión de proyectos complejos: Permite evaluar los beneficios de este tipo de proyectos y aplicar los resultados en un plano regional o local determinado.
- Documentación del proceso de toma de decisiones: Permite explicar de manera clara y precisa las razones que llevaron a la selección de la alternativa elegida, y exponerlas en un plano legal o público.

El Modelo HDM se basa en este tipo de análisis y 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 la que se trabaje. El análisis económico es un tanto abstracto, ya que se deben de 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 (económicas,

sociales, ambientales, etc.). Sin embargo se pueden tratar de contemplar la mayor cantidad de factores que estén involucrados.

2.2 FUNDAMENTOS ECONÓMICOS

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

Como cualquier tipo de proyecto de inversión, un proyecto de carreteras genera costos y beneficios, con la inversión más grande al tiempo de la construcción y los beneficios distribuidos a lo largo del tiempo, lo mismo que los gastos de mantenimiento que, al final del ciclo del proyecto, deben de ser cubiertos por las ganancias totales.

Hay dos factores que afectan el análisis económico y que deben ser considerados siempre: La inflación y el valor del dinero en el tiempo.

2.2.1 Inflación

Se dice que hay inflación cuando el precio de la mayoría de los bienes y servicios en una economía se elevan en determinado grado, a esto se le llama inflación general.

Los economistas piensan que la inflación ocurre cuando la demanda de servicios y productos es mayor que su oferta. La inflación es medida comparando los precios de productos de la canasta básica año con año. Se calcula el total de los precios del año a medir y se divide entre el total de los precios de un año base y el resultado se multiplica por cien. El costo de los

proyectos viales es afectado naturalmente por la inflación ya que los precios de los materiales usados, así como la mano de obra, se elevan con el tiempo.

La inflación afecta los resultados de un proyecto en varios aspectos:

- Aumenta los requerimientos (cantidad) y condiciones (tasa de interés, plazo) del financiamiento, al afectar la cantidad y el momento de los flujos de efectivo.
- Aumenta las necesidades de capital de trabajo.
- Aumenta los impuestos a pagar.
- Afecta las tasas de cambio para conversión en divisas.

Debido a que la inflación es muy difícil de predecir, es preferible no incluirla en el análisis de costos y beneficios de un proyecto vial. El tiempo más apropiado para tomar en cuenta la inflación es cuando se está preparando el presupuesto del proyecto, después de que el análisis económico demostró que el proyecto es viable. El total de dinero o efectivo se puede dividir en dos tipos: Dinero del año base y dinero del año actual. El primero consiste en dinero que no está afectado por la inflación y el segundo está afectado por un índice de inflación.

Para ajustar el presupuesto del proyecto a la inflación se usan las siguientes fórmulas:

$$Dinero_{\text{año base}} = \frac{Dinero_{\text{año corriente}} * Índice de precios_{\text{año base}}}{Índice de precios_{\text{año corriente}}}$$

$$Dinero_{\text{año corriente}} = \frac{Dinero_{\text{año base}} * Índice de precios_{\text{año corriente}}}{Índice de precios_{\text{año base}}}$$

2.2.2 El valor de los recursos en el tiempo

El valor de los recursos a través del tiempo es un concepto fundamental para el análisis económico de proyectos de conservación y para el sistema financiero en general. Este concepto puede interpretarse también como costo de oportunidad, ya que representa el costo que se sufre al destinar determinado tipo de recursos a una actividad y dejar de aprovecharlos en otra. El valor de los recursos en el tiempo es medido por un factor porcentual anual, conocido como tasa de actualización o tasa de rendimiento mínima atractiva.

Para tomar en cuenta el valor de los recursos en el tiempo se utiliza el concepto de “valor presente”, el cual consiste en referir erogaciones de recursos ocurridas en distintos períodos de tiempo a un año común, afectándolas con la tasa de actualización.

El valor presente de una cantidad se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$PV = \left[\frac{1}{(1 + \gamma)^t} \right] * A_t$$

En donde:

PV = Valor presente en el año cero (año base)

γ = Tasa de actualización

t = Tiempo (en años)

A = Beneficio o costo en el año t

2.3 ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA (ACCV)

El análisis de costos durante el ciclo de vida (ACCV) es una herramienta metodológica que facilita a la institución vial escoger la estrategia técnico-económica que proveerá el comportamiento deseado del pavimento al menor costo en el período bajo estudio. Para cada estrategia técnica se consideran los costos de mantenimiento y los costos para los usuarios. Esto permite realizar la comparación económica de las diferentes estrategias factibles, evaluadas a lo largo del mismo lapso de análisis. Una estrategia factible es aquella que cumple las necesidades técnicas del proyecto y se ajusta a las restricciones de toda índole que la pueden afectar. El ACCV es una herramienta en el proceso de decisión, pero no determina la decisión. Aspectos tales como las restricciones presupuestales y ambientales, el concepto de la comunidad y el buen juicio ingenieril, también deberán ser considerados en el momento de elegir la mejor estrategia para un proyecto en particular.

2.3.1 Aplicaciones del ACCV

- Diseño, selección y documentación de las opciones más redituables para la ejecución de un proyecto o el logro de un objetivo.
- Evaluar estrategias de conservación de pavimentos.

- Planeación e implementación de proyectos, especialmente al considerar diferentes áreas de trabajo.

Debe hacerse notar que en todos los casos anteriores, se trata de evaluar diferentes propuestas con iguales grados de servicio. Si se tratara de

alternativas en los que existe una diferencia en el nivel de servicios, la herramienta a usar podría ser un análisis beneficio-costos.

Al aplicar esta herramienta, el analista debe tomar en cuenta un período de tiempo suficiente para que la tasa de descuento funcione correctamente. El no abarcar un período suficiente en el análisis, así como el incluir costos que difieren significativamente entre las diferentes alternativas, puede producir resultados poco precisos. Por ejemplo, el período de tiempo al evaluar proyectos de conservación de carreteras puede ser de 20 a 40 años.

Algunos de los costos importantes a tomar en cuenta son los asociados con actividades de construcción rehabilitación y mantenimiento, y deben de ser identificados y evaluados con respecto al horizonte de tiempo que se use.

El Análisis del Ciclo de Vida del proyecto, como se verá más adelante, es uno de los pilares del funcionamiento del HDM-4, ya que permite visualizar el comportamiento de los flujos de efectivo del pavimento año con año, hasta el final de su vida útil. La comparación del estado de la carretera se hace también año con año y, gracias a esta comparación, es que se pueden identificar los factores que hacen a una alternativa fallar, y variarlos hasta que se obtengan resultados satisfactorios.

2.3.2 Costos y beneficios de un proyecto de construcción y mantenimiento de pavimentos

Los costos y beneficios de un proyecto de construcción y mantenimiento de pavimentos, se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Costos y beneficios cuantificables y posibles de convertir a unidades monetarias, como son los correspondientes a rehabilitación y mantenimiento, operación vehicular, tiempos de viaje, ingresos por cobro de peajes, etc.
- Costos y beneficios cuantificables pero no posibles de convertir en unidades monetarias sin estudios rigurosos fuera del alcance de un estudio tradicional de ACCV, como son los correspondientes a seguridad, contaminación, nivel de ruido, modificación de precios de terrenos, etc.
- Costos y beneficios no cuantificables en el marco de ACCV, como son los correspondientes a bienestar social, calidad de vida, oportunidades comerciales, etc.

La posibilidad de cuantificar determinados costos o beneficios dependerá de la información que se pueda obtener y de la viabilidad de usar modelos o técnicas de medición que faciliten asignarles una magnitud. Al respecto, es de anotar que algunos elementos están determinados conceptualmente pero no se dispone de medios para cuantificar el costo o los beneficios que generan en los usuarios de las vías.

El ACCV utiliza tanto los costos como los beneficios cuantificables y posibles de convertir a unidades monetarias; donde la factibilidad de un proyecto está dada por la relación entre esos costos y esos beneficios esperados.

2.3.2.1 Principales costos a tener en cuenta en la evaluación

La estructura de costos para la evaluación de un proyecto de construcción y mantenimiento de pavimentos tiene, en general, los siguientes componentes asociados:

- Costos para la entidad vial, que incluyen:
 - Costos del proyecto o costos de ingeniería.
 - Construcción.
 - Costos de mantenimiento.
 - Costos de otras rehabilitaciones futuras.
 - Gastos financieros.
 - Costos de administración.
 - Costos de Interventoría.

- Costos para los usuarios, que incluyen:
 - Costos de operación de los vehículos: combustibles, lubricantes, neumáticos, repuestos, mano de obra de mantenimiento, tripulación.
 - Costos anuales fijos: depreciación, intereses y administrativos.
 - Costos de tiempo de viaje de: pasajeros, demora o retención de carga.
 - Costos extras a los usuarios por demoras o inconvenientes ocasionados por trabajos o rehabilitaciones en la vía.

- Costos extras o exógenos que incluyen:
 - Accidentes de tránsito.
 - Impactos ambientales: emisión de gases, ruidos, sobrecalentamiento, contaminación visual, etc.
 - Impactos en el entorno cercano: intercambios comerciales, cambios en la actividad productiva, modificación en el valor y en el uso del suelo, etc.

Los beneficios referidos a los usuarios tienen, en general, los siguientes componentes asociados:

- Reducciones directas o indirectas de los costos de operación vehicular.
- Reducciones en los tiempos de viaje.
- Desarrollo de la zona de influencia del proyecto que proporcionará ganancias en los comercios aledaños, valorización de los terrenos, mayor intercambio comercial, incremento en la productividad, etc.

Cuando se evalúan alternativas con objetivos idénticos es común que algunos de sus costos sean iguales en cantidad y en tiempo de aplicación, por lo cual pueden no ser evaluados y se debe concentrar principalmente en aquellos costos que difieren de una propuesta a otra. Los costos de usuario pueden variar significativamente entre una y otra opción y más al hablar de los requerimientos de las diferentes zonas de trabajo en la construcción o rehabilitación de las opciones.

Existe una controversia al evaluar los costos de la entidad vial y los costos del usuario, ya que muchas compañías prefieren aislar estos últimos, pues es difícil estimarlos al hablar por ejemplo de retrasos en las áreas de trabajo, y se concentran más en los otros. Sin embargo esta práctica puede resultar inconveniente para el ACCV. Algunas de las herramientas usadas en el ACCV son hojas de cálculo y técnicas de análisis de riesgo.

2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA APLICABLES EN UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

2.4.1 Definiciones conceptuales

2.4.1.1 Período de análisis

Para el estudio económico de los pavimentos conviene distinguir entre varios períodos: (i) de diseño, (ii) de vida útil y (iii) de análisis. El período de diseño es aquel lapso para el cual fue diseñado el pavimento, es decir, el tiempo en años que se supone que resistirá las cargas estimadas que pasarán por él, en Colombia se trabajan con periodos de diseño de 10 años. El período de vida útil es el lapso en años que realmente resiste el pavimento las cargas efectivas que circularán por él. El período de análisis es aquel lapso, medido en años, que va desde la puesta en servicio del pavimento hasta el momento en que el evaluador quiere realizar su análisis. Por lo tanto, el período de análisis puede ser mayor o menor que el período de diseño.

En un proyecto de conservación de pavimentos, el período de análisis se utiliza para la evaluación de las estrategias de intervención en un determinado tiempo. En países como Colombia, dónde se tienen incertidumbres en relación con la evolución del deterioro de los pavimentos asfálticos de carreteras y con el incremento del tránsito, son recomendables períodos de análisis entre 20 años y 30 años para la evaluación económica de los proyectos de conservación de pavimentos, considerando el período mayor para aquellas vías con mayores volúmenes de tránsito.

2.4.1.2 Tasa de descuento

La tasa de descuento, conocida también como tasa de actualización, se define como la diferencia entre la tasa de interés en el mercado y la inflación, en dinero constante, esta puede afectar el resultado de un ACCV, dado que ciertas estrategias pueden verse favorecidas o perjudicadas por una determinada tasa de descuento.

Las tasas altas favorecen a las estrategias que difieren los costos sobre un período alejado en el tiempo, puesto que los costos futuros son descontados en relación con el costo inicial. En cambio, una baja tasa de descuento favorece estrategias con altos costos iniciales, puesto que los costos futuros son añadidos casi a su valor nominal. En el caso de una tasa de descuento igual a cero, todos los costos son tratados como iguales, independientemente de cuándo ocurran. En proyectos donde las distintas estrategias tengan costos similares de mantenimiento, rehabilitación y operación, la tasa de descuento tiene un efecto reducido en el análisis, mientras los costos iniciales tienen el mayor impacto.

Las tasas de descuento no son constantes, por cuanto dependen del tipo de negocio. Los siguientes puntos deben ser considerados en el momento de escoger el valor apropiado de la tasa en un análisis económico de pavimentos:

- La diferencia entre las tasas de interés y la inflación no permanece constante en el tiempo y, por lo tanto, no resulta posible identificar una tasa única de descuento que resulte siempre correcta. Es claro que la selección de una tasa adecuada no debe depender de condiciones económicas inusuales que pueden suceder durante períodos relativamente breves. Durante los últimos años, la diferencia entre la tasa activa de interés y la inflación en Colombia ha oscilado entre 16% y 17%, excepto durante el año 1998, cuando llegó a un inusual 26 %.
- Una vez elegida una tasa de descuento, resulta conveniente realizar un análisis de sensibilidad, para determinar la dependencia que tienen los valores presentes de la tasa que se escoja. Si una determinada estrategia se presenta como la más favorable en un rango amplio de

tasas de descuento, se puede tener la certeza de que el análisis ha identificado realmente la estrategia de menor costo.

Las tasas de descuento utilizadas históricamente en el sector vial en el país han tendido a encontrarse dentro de rangos muy restringidos, a pesar de los vaivenes que han sufrido las tasas de interés y la inflación con el transcurso de los años. En un documento del Ministerio de Obras Públicas se citaban valores entre 10% y 15%. Para este análisis se considero una tasa de descuento del 10% para cada uno de los modelos planteados.

2.4.2 Métodos para la evaluación económica de las estrategias

Para evaluar las distintas estrategias se utilizan diferentes métodos desarrollados por la ingeniería económica, siendo los de mayor aceptación relación Costo-Beneficio (BCA), el Valor Presente Neto (VPN) o Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

2.4.2.1 Análisis relación Costo/Beneficio (BCA)

El análisis de Costo-Beneficio es una herramienta muy útil al evaluar alternativas que no generan beneficios idénticos, considerando de la misma manera los beneficios y costos del ciclo de vida. Usada apropiadamente, el análisis costo-beneficio identifica la alternativa que ofrece los mejores beneficios económicos.

El análisis Costo-Beneficio no es lo mismo que un análisis financiero, ya que éste último trata de estimar con exactitud las inversiones, tanto presentes como futuras, necesarias para que el proyecto sea redituable en su construcción, mantenimiento y operación. Por su parte, el análisis costo-

beneficio es un estudio externo que no se preocupa de cómo sea financiado el proyecto.

El costo económico de cualquier alternativa es el incremento en inversión de capital. En el caso de carreteras, algunos de los costos típicos son por ejemplo:

- Construcción de la vía.
- Mantenimiento de la superficie de rodamiento.
- Mantenimiento de la carretera y del derecho de vía.

Los costos deben de ser contemplados de tal manera que no superen en un 20 % a los costos en la realidad.

Similarmente, los beneficios de la alternativa deberán medirse como el aumento neto en el ahorro de capital invertido (los beneficios de la alternativa comparando la alternativa base), sin embargo, muchas veces pueden presentar una dificultad, pues no se pueden saber con precisión los beneficios para un país entero (que es la entidad que finalmente se beneficiara con la carretera) o incluso para una región en específico. Dado esto, el modelo HDM -4 contempla los beneficios que van a recibir los usuarios de la vía o, llamándolo de otra forma , la reducción de los costos de operación , y para esto se cuenta con un número actual aproximado de vehículos por día que pasan por la carretera y una tasa de crecimiento anual.

Los beneficios en cuanto a costos de operación del vehículo se pueden obtener comparando los costos de operación de cada alternativa considerada, con los costos que resultan de la alternativa base, la cual no contiene ninguna propuesta de conservación, o contiene un mantenimiento

muy básico. Complementando lo anterior, se puede decir que los beneficios de una inversión vial se cuantifican indirectamente por medio de:

- Reducción de costos de operación de vehículos.
- Ahorros en el tiempo de los ocupantes y de la carga transportada.
- Otros ahorros a los usuarios (principalmente por concepto de accidentes).
- Reducción en costos de mantenimiento.

- **Aplicaciones del BCA**

- Ayuda a determinar si un proyecto debe ser tomado en cuenta (por ejemplo, determina si los beneficios del costo de vida del proyecto superan los costos del mismo).
- Provee los elementos para decidir cuándo debe aceptarse un proyecto (por ejemplo el BCA puede demostrar que en este momento el proyecto no es económicamente aceptable, pero en diez años será redituable gracias al crecimiento del tránsito).
- Permite elegir entre diferentes proyectos el que permita una mejor inversión para un presupuesto limitado, y considerando proyectos con características muy diferentes entre ellos.

- **El proceso del análisis Costo/Beneficio**

Como primer paso en el análisis BCA, está plantear objetivos, metas claras y definidas. Esto conlleva identificar las necesidades o las situaciones que se pretenden mejorar tratando de abarcar las más importantes, al mismo tiempo, se elabora una lista de prioridades, desde

económicas hasta de seguridad y ecológicas. A partir de estos puntos el analista es capaz de elaborar alternativas que resuelvan los diferentes problemas, con un criterio razonable en cuanto al aspecto económico. Las alternativas deben de evaluarse un período de tiempo adecuado, de tal manera que no quede una en desventaja con respecto a las otras. Como se verá más adelante, el modelo HDM-4 contiene estándares de conservación, pero el analista puede establecer sus propios parámetros al aplicarlos.

La tasa de actualización por utilizar es un factor importante, ya que es diferente desde la perspectiva del sector público o privado. En el primer caso se busca maximizar la utilidad del proyecto, mientras que en el segundo se pretende determinar cómo se pueden asignar los fondos disponibles de la mejor manera entre los proyectos en competencia, a fin de lograr las metas sociales. Se deben de tener tres consideraciones principales con respecto a qué tasas de actualización usar en estudios de ingeniería económica de proyectos del sector público:

- La tasa de interés sobre el capital tomado en préstamo.
- El costo de oportunidad del capital para la agencia gubernamental.
- El costo de oportunidad del capital para los contribuyentes.

- **Elementos del Análisis Costo/Beneficio**

En la siguiente tabla se muestran diferentes elementos usados generalmente por el Análisis Costo-Beneficio. Un caso curioso es el de las tarifas de peaje y los impuestos, ya que no se consideran como beneficios del proyecto, aunque representan una fuente importantísima de ingresos. La razón de este hecho es que la influencia de éstos ingresos ya está incluida en otros elementos del proyecto, como son el

menor o mayor uso de la obra debido al costo de ésta, y en caso de incluirlos al análisis se incurriría en una doble consideración de beneficios.

Tabla 1. Elementos usados por BCA

| Beneficios y Costos del usuario asociados con zonas de trabajo | Beneficios y Costos del usuario relacionados con la facilidad de operación |
|---|---|
| Retrasos | Tiempo de viaje y retrasos |
| Accidentes | Accidentes |
| Costos de operación C | Costos de operación del vehículo |
| Costos de construcción | Costos extras o exógenos |
| Diseño e Ingeniería | Emisiones |
| Compra de terrenos | Ruidos |
| Construcción | Otros impactos |
| Reconstrucción y rehabilitación | |
| Preservación y mantenimiento | |

Fuente: US Department of Transportation, 2003

La asignación de valores monetarios a cada uno de los elementos anteriores es un punto obligado del análisis. Para los costos de construcción, los analistas usan costos de proyectos pasados, sin embargo, se debe pensar en las contingencias o fenómenos extras que pueden presentarse a lo largo del proyecto. Otros factores que son difíciles de medir, como retrasos en el viaje o accidentes, se obtienen de la percepción de los usuarios al preguntarles cuánto estarían dispuestos a pagar si les sucediera alguno de los eventos mencionados. Para el costo de operación del vehículo, se toman en cuenta los gastos en los que se incurre al circular el vehículo por la carretera.

Una vez que el analista ha elaborado una lista de los costos y beneficios de las diferentes opciones o alternativas tendientes a mejorar el proyecto, se procede a evaluar los costos contra los beneficios en el BCA.

- **Problemas con el BCA**

El BCA es una herramienta poderosa para ayudar a proyectistas, ingenieros y ejecutivos. Sin embargo muchas compañías tratan de usarla lo menos posible. Una de las razones es que se dice que es poco precisa al evaluar los costos y beneficios, pues no incluye un estudio de la incertidumbre presente en las alternativas. Asimismo, el BCA se enfoca principalmente en los costos y beneficios de la agencia y relega el otro tipo de gastos.

Otro problema con el BCA, es cuando se elige un caso base fuera de la realidad. Recordemos que el caso base es el caso con el cual se comparan las propuestas analizadas en el BCA. Además cuando un proyecto está formado por dos proyectos diferentes y esto no se considera en el análisis, pudiendo resultar que uno de los dos sí sea aceptado y el otro no, pero al final el proyecto entero sea rechazado.

Otras desventajas son las siguientes:

- A menudo se usa como herramienta para justificaciones ante el hecho consumado más que para la evaluación del proyecto.
- No se pueden explicar serías desigualdades de distribución (es decir, un grupo cosecha los beneficios, mientras que otro asume los costos) basándose en estudios BCA.

- Suele pasarse por alto la información cualitativa en los análisis BCA.

En general éste método es bastante adecuado para evaluar proyectos de la iniciativa privada, pero debe tenerse mucho cuidado cuando se aplica a proyectos del sector público.

El modelo HDM-4 genera resultados de un proyecto neutral, de hecho, la forma en que los resultados serán aprovechados, depende de la entidad que esté utilizando el HDM-4. Dado que el programa considera como beneficios muy importantes la disminución de los costos de operación, el HDM-4 se puede considerar más apropiado para proyectos del sector público, aunque no necesariamente se tiene que usar en este sector.

Sin embargo, es interesante decir algunas de las dificultades a las que se enfrenta el método cuando se trata de evaluar proyectos financiados en su totalidad por alguna entidad del gobierno. Algunas de las desventajas son:

- No hay una utilidad estándar que pueda tomarse como una medida de eficacia financiera. La mayoría de los proyectos públicos tienen la intención de ser no lucrativos.
- Es difícil cuantificar el impacto monetario de muchos de los beneficios de los proyectos públicos.
- Puede haber poca o ninguna conexión entre el proyecto y el público, que es el propietario del proyecto.
- Con frecuencia hay una influencia política fuerte siempre que se utilizan fondos públicos. Cuando las decisiones con respecto a proyectos públicos las toman funcionarios electos que pronto buscarán otro cargo, se hace hincapié en los beneficios y costos

inmediatos, a menudo con poca o ninguna consideración hacia las más importantes consecuencias a largo plazo.

La utilidad como un estímulo para promover la operación eficaz no aplica en el caso de proyectos públicos, lo cual no quiere decir que todos los proyectos públicos son ineficientes o que a los administradores y empleados no les interesa hacer sus trabajos con eficiencia. Pero se cree que el estímulo de la utilidad directa presente en empresas de propiedad privada tiene un impacto favorable en la eficacia de los proyectos del sector privado.

2.4.2.2 Valor presente neto (VPN)

Es probablemente la medida más certera del BCA. El Valor Presente Neto (VPN) o Valor Actual Neto (VAN), es un método muy utilizado, por cuanto pone el valor del dinero tanto de los ingresos futuros como de los egresos futuros en el momento presente, lo cual facilita la decisión, desde el punto de vista financiero, de seleccionar la estrategia de un proyecto. Para poner todo el flujo de caja de ingresos y egresos en dinero actual es necesario utilizar una tasa de interés “ i ” o de descuento, que es la que aplica el inversionista en sus negocios. Si el $VPN > 0$ habrá una ganancia por encima de la tasa que se utilice para evaluar el proyecto; si el $VPN = 0$ significa que la inversión produce la rentabilidad a la tasa de interés prevista y si el $VPN < 0$ el proyecto no es aconsejable, porque produce pérdida.

El Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto a una tasa de descuento “ i ” es igual a la sumatoria del valor presente de los ingresos menos la sumatoria del valor presente de los egresos. Ese valor representa la ganancia extraordinaria que genera el proyecto, medida en valores actuales, es decir, en dinero de hoy día.

En un proyecto vial, los ingresos corresponden a los beneficios para los usuarios y para la entidad vial. Los egresos corresponden a los costos de ejecución de las obras, el mantenimiento y su operación.

La expresión para su cálculo es:

$$VPN = \sum_{i=1}^n (B_i - C_i) * \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

Donde:

VPN = Valor presente.

B_i = Beneficio futuro.

C_i = Costo futuro.

i = Tasa de descuento.

n = Año en el cual se realiza el gasto o se obtiene el beneficio.

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

Para el caso particular de comparación de estrategias de rehabilitación de pavimentos, se puede utilizar la siguiente ecuación modificada:

$$VPN = \sum_{y=1}^y \left[\frac{\Delta BN_{ky(a-b)}}{(1 + 0.01 * i)^{y-1}} \right]$$

Donde:

$\Delta BN_{ky(a-b)}$ = Beneficio económico neto de la estrategia "a" relativa a la estrategia "b", en el año "y" para el tramo de carretera "k".

i = Tasa de descuento.

y = Periodo de análisis especificado.

Este método permite aplicarse a proyectos con diferentes períodos de vida en servicio o con etapas ya desarrolladas. Este indicador es uno de los calculados por el HDM-4 y “refleja la diferencia que se obtiene al restar el valor presente de flujo de costos requeridos para la implantación de la alternativa bajo análisis con respecto a la alternativa base del valor presente de aquellos beneficios producidos por la misma alternativa nuevamente, como diferencia con respecto a la alternativa base durante todo el periodo de análisis. El cálculo del valor presente se realiza utilizando una tasa de actualización que refleja el costo de oportunidad del capital. Si el resultado de la diferencia es positiva la alternativa se considera rentable”.

2.4.2.3 Relación Beneficio – Costo

Esta medida se usa cuando se encuentran restricciones de inversión en el proyecto. La razón se compone de un numerador que contiene el valor presente neto de los beneficios y el denominador contiene el valor presente de los costos producidos a lo largo del proyecto. Si se tiene que elegir entre varias opciones, naturalmente se elige la que tenga el BCR más alto.

La relación beneficio costo se calcula tomando el valor presente de todo el flujo de beneficios y dividiéndolo por el valor presente de todo el flujo de costos de la misma alternativa. Tanto los beneficios como los costos deberán ser calculados como diferencia con respecto a la alternativa base y actualizados empleando una tasa que refleje el costo de oportunidad del capital. Una alternativa se considera rentable si se obtiene una razón beneficio costo mayor a la unidad. La fórmula de la razón costo-beneficio convencional es:

$$B/C = \frac{VP(\text{Beneficios})}{VP(\text{Costos})} = \frac{VP(B)}{I + VP(O_y M)}$$

Donde:

$VP(B)$ = Valor presente de los beneficios

I = Inversión inicial en el proyecto propuesto

O_yM = Costos de Operación y Mantenimiento del proyecto propuesto

La fórmula de la relación beneficio - costo modificada con VP es:

$$B/C = \frac{VP(B) - VP(O_yM)}{I}$$

Esta medida es muy conveniente para deducir la rentabilidad de un proyecto, ya que elimina el sesgo producido por el VPN cuando se estudian proyectos con períodos de análisis muy largos (Descripción de Modelos HDM-4, 2003). El factor anterior puede ser determinante, ya que aunque un proyecto produzca un VPN aceptable, si considera un número de años muy grande, su rentabilidad puede ser engañosa debido a que el tiempo de inversión es muy largo. También, se podría dar el caso de que algún otro proyecto produzca un valor presente neto un poco menor, pero que los costos de inversión sean mucho menores. En ese caso la opción más conveniente sería la segunda. Esta medida es aconsejable para aquellos proyectos en los que la seguridad financiera no está sólidamente fundamentada y asegurada.

2.4.2.4 Tasa interna de retorno (TIR)

Este método es uno de los más ampliamente usados para realizar análisis económicos en ingeniería. Se trata de obtener la tasa de interés que iguala el valor equivalente de flujos de entrada de efectivo (ingresos o ahorros) al

equivalente de flujos salientes de efectivo (gastos, incluidos costos de inversión). Cuando la TIR es positiva, significa que la suma de ingresos excede la suma de todos los flujos salientes de efectivo.

Una ventaja que tiene este método con respecto a otros, es que no requiere de un valor predeterminado para descontar los costos y beneficios, en otras palabras, no se sabe con certeza el valor del costo de capital, pero si se tiene idea de un rango probable, se puede determinar el valor de la TIR y si este resulta mayor que el rango probable para el costo de oportunidad, el proyecto es rentable.

De la definición de la TIR se observa que un valor de la TIR que resulte ser mayor que el costo de oportunidad del capital muestra que el proyecto es rentable.

La ecuación para obtener la TIR es la siguiente:

$$VPN = \sum_{y=1}^y \left[\frac{\Delta BN_{ky(a-b)}}{(1 + 0.01 * i)^{y-1}} \right] = 0$$

Donde:

$\Delta BN_{ky(a-b)}$ = Beneficio económico neto de la estrategia “a” relativa a la estrategia “b”, en el año “y” para el tramo de carretera “k”.

i = Tasa de descuento.

y = Período de análisis especificado.

Una práctica común al evaluar alternativas de proyectos simultáneos no excluyentes es el listarlos de acuerdo al orden descendente de la TIR, y

elegir aquellos que ocupen los primeros lugares. Esto garantizará que se elige el proyecto más rentable. Sin embargo, para determinar si el propietario habrá recuperado su capital en un lapso razonable de tiempo, se deberá proceder a obtener el VPN para cuantificar los beneficios.

- **Dificultades asociadas con el uso de la TIR**

En general la TIR resulta adecuada para evaluar proyectos viales donde el flujo de costos es fuerte al inicio del período de análisis y va seguido por un flujo de beneficios constante durante el resto del período. En otros casos el resultado puede resultar inválido. La razón de este comportamiento es que, a diferencia de otros indicadores como el VPN en los que se supone que los ingresos netos menos los gastos de cada período se invierten a la tasa de actualización durante el período de estudio N , el método de la TIR está basado en la suposición de que los fondos recuperados, si no se utilizan en cada periodo, se reinvierten a $i\%$ y no a la tasa de actualización. Otra dificultad está en la complejidad de cálculo, y la aparición de múltiples TIR en los análisis. Una desventaja importante de este indicador, pensando en la evaluación de alternativas, es que se debe de tener cuidado al aplicar el análisis de dos o más alternativas mutuamente excluyentes.

Finalmente se hace una observación, para valorar de forma adecuada los indicadores anteriores. Definitivamente el VPN es el indicador que muestra qué alternativa de conservación contribuye en mayor medida a un aumento neto del ingreso nacional, pues a mayor VPN mayor rentabilidad. El defecto de este indicador radica en que, generalmente, los proyectos de mayor valor presente neto también conllevan las mayores inversiones, por lo que unos pocos proyectos pueden acabar con todo el presupuesto disponible.

Por otro lado, es posible encontrar proyectos cuyo VPN es bajo, pero que tienen una alta rentabilidad debido a que se pueden obtener beneficios muy razonables con una inversión más baja. Esta situación ha beneficiado el uso de indicadores relativos, tales como la TIR y la Relación Beneficio - Costo en conjunto con o en lugar de los indicadores absolutos tales como el VPN.

Debe recordarse, sin embargo, que los proyectos no son el objetivo final del proceso de asignación; sino más bien las formas como la economía pone a trabajar sus recursos en la búsqueda de objetivos más importantes tales como la eliminación de la pobreza, la promoción del crecimiento (aumento en el ingreso total nacional) y la reducción de las desigualdades en la distribución del ingreso.

El análisis económico de proyectos o evaluación económica de alternativas, es una metodología para valorar la selección entre usos alternos de los recursos (y generalmente en abierta competencia) en una forma conveniente y exhaustiva.

La definición de los costos y los beneficios se hace de forma tal que estos objetivos más importantes jueguen un papel protagónico en la decisión final de aceptar o rechazar un proyecto. Los beneficios son definidos en relación con sus efectos sobre estos objetivos fundamentales.

2.4.2.5 Selección de alternativas mutuamente excluyentes

La selección de alternativas en la gestión de proyectos es el paso que corona el estudio y los análisis realizados. Generalmente las alternativas son mutuamente excluyentes, pues no se van a realizar diferentes alternativas de conservación al mismo tiempo, y para elegir la mejor, es

para lo que se usan los indicadores antes explicados. El HDM-4 arroja resultados del análisis de los Costos del Ciclo de Vida del Proyecto, de la relación Beneficio-Costo, el Valor Presente Neto y la TIR. Estos indicadores deben de ser evaluados primero por separado eligiendo alguno de los más confiables y posteriormente comparar los demás para formular una decisión correcta.

“La selección de la mejor alternativa para un proyecto, significa que se han hecho comparaciones de varias alternativas cada una de ellas con respecto a la alternativa base. El conjunto de alternativas evaluadas debe ser al menos unitario para que la evaluación tenga sentido. Al iniciar en las primeras etapas de evaluación, la cantidad de alternativas es muy importante. En los análisis finales, es la calidad en la definición de alternativas lo que realmente cuenta”.

Cada una de las alternativas es un desarrollo del proyecto diferente a las demás, y para obtener un juicio adecuado, es muy importante considerar todos los costos y beneficios de las alternativas. Como se podrá imaginar, a la hora de definir los beneficios de las alternativas, se puede actuar por el lado conservador, omitiendo ciertos beneficios, siempre y cuando se aplique el mismo criterio para todas.

Por lo general, los primeros indicadores por revisar son los de índole económica. A la par, se pueden ir revisando el estado de conservación de cada tramo, incluso de cada carril, ya que por lo general los carriles de las carreteras se deterioran de manera diferente. De hecho, es una práctica común trabajar con el IRI de los carriles más deteriorados, en este caso los de baja velocidad, para estar del lado de la seguridad.

A la par del análisis y comparación de éstos indicadores, se debe aplicar la experiencia y el sentido común de los analistas, pues aunque el programa es confiable, posiblemente se puedan dar casos en los que una opción aparezca como la más atractiva, pero sabemos que en la práctica podría no ser aplicable.

3. EL HDM-4 COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE PROYECTOS VIALES.

Actualmente en el mundo, existen sistemas de gestión de pavimentos compuestos por aplicativos computacionales que han servido de gran apoyo para ella. Las herramientas computacionales tienen la capacidad de realizar funciones de optimización en la condición y actividad del pavimento; éstas tienen como objetivo principal aumentar el poder de análisis, para obtener datos más confiables.

Dentro de estos programas de gestión se encuentra el HDM-4 que es un moderno instrumento analítico estructurado en un sistema informático para la evaluación técnica y económica de la ejecución de obras y mantenimiento de carreteras. Está basado en la interacción entre el costo de las obras y su mantenimiento, y los costos para los usuarios de la vía, considerando que el costo que representa el movimiento de personas y mercancías está íntimamente vinculado al estado que presenta la infraestructura y, en consecuencia, a las intervenciones de mantenimiento que se ejecutan sobre la misma.

El sistema HDM-4 ha tenido un desarrollo progresivo que ha permitido adaptarlo a distintas características de carreteras y de vehículos. Su funcionamiento se basa en las relaciones físicas y económicas de un extenso y riguroso estudio sobre el deterioro de las carreteras, el efecto de diferentes intervenciones para su mantenimiento y los costos de operación vehicular.

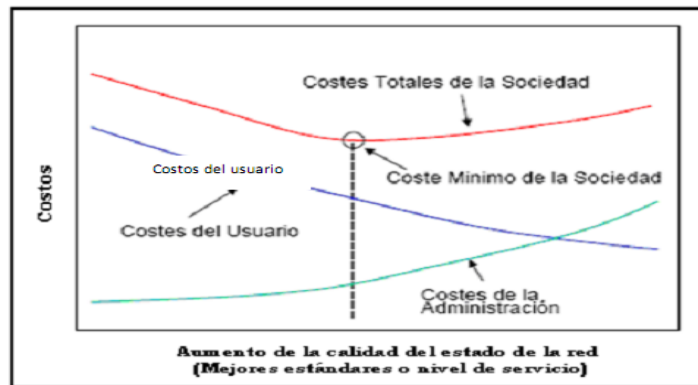
El modelo HDM (Highway Development and Management Model) se originó en 1968 con apoyo del Banco Mundial y en su desarrollo han participado diversas instituciones, como el Massachusetts Institute of Technology (MIT), el Laboratoire

Central des Ponts et Chaussées, el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) y la Universidad de Birmingham.

El HDM-4 se utiliza actualmente como una herramienta analítica que ayuda a los tomadores de decisiones a identificar dónde resulta más rentable invertir en la red de carreteras para conseguir el mayor beneficio neto para el conjunto de la sociedad, minimizando los costos globales del transporte y los costos de la administración vial.

En la siguiente figura se muestra la variación de costos, tanto para el usuario de la carretera como para la entidad encargada de la administración vial, en función del estado de la vía. Se puede observar que el punto mínimo para la sociedad corresponde al valor mínimo de la suma de costos para la entidad vial y para los usuarios:

Figura 2. Evolución de costos de la sociedad.



Es mediante este criterio económico que el sistema HDM-4 le facilita a las entidades gestoras de redes de carreteras efectuar la planificación, la programación y el desarrollo de proyectos de mantenimiento vial.

El modelo HDM-4 permite calcular los costos totales del transporte, considerando los costos en infraestructura y los costos de operación vehiculares. Estos costos se obtienen anualmente para diferentes estándares de conservación que permiten la comparación entre diferentes estrategias de mantenimiento y ayudan en la

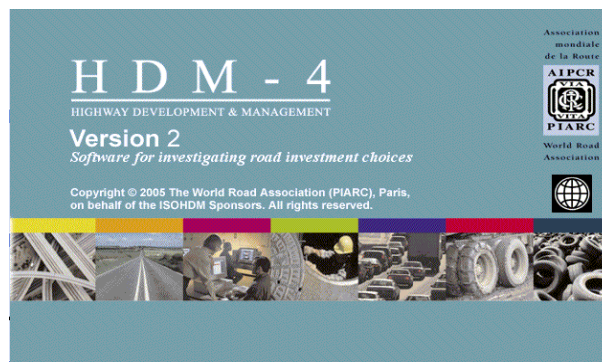
selección de la más conveniente, además calcula internamente las velocidades y los costos de operación vehicular, así como también los deterioros y los costos de conservación de las carreteras, en función del diseño del camino, de las prácticas de conservación, del volumen del tránsito, de las cargas por eje y de las condiciones ambientales.

Los costos totales de conservación y de operación de los vehículos son calculados endógenamente sobre la base de las cantidades físicas y precios unitarios especificados, determinando los costos financieros y económicos requeridos.

En resumen el HDM-4 permite analizar y evaluar técnica y económicamente los proyectos viales utilizando la comparación de alternativas. Desde el punto de vista económico se encarga de hacer la planeación de presupuesto de recursos para construcción y conservación, optimizándolos de acuerdo a lo que esté disponible y sujeto a restricciones propuestas, además contempla los costos y los beneficios tanto sociales como privados generados por el desarrollo del proyecto. En la parte técnica, ésta herramienta hace la evaluación del deterioro de los pavimentos, el seguimiento y control de los actividades de conservación y mejoramiento de las vías.

3.1 PRESENTACIÓN DEL PROGRAMA

Figura 3. Presentación software HDM-4

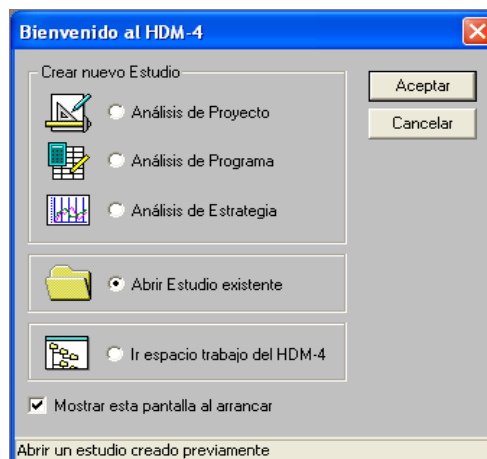


Este modelo recibe como datos de entrada el inventario vial, datos de tránsito y condiciones de la vía, generando un plan estratégico a largo plazo, un programa de intervención de la red vial definiendo los trabajos específicos a realizar, también permite analizar los resultados de diferentes estrategias de planificación del proyecto.

Inmediatamente de ingresar al programa, se visualiza una ventana como la que se muestra en la Figura 10, donde el usuario puede elegir entre las siguientes opciones a trabajar:

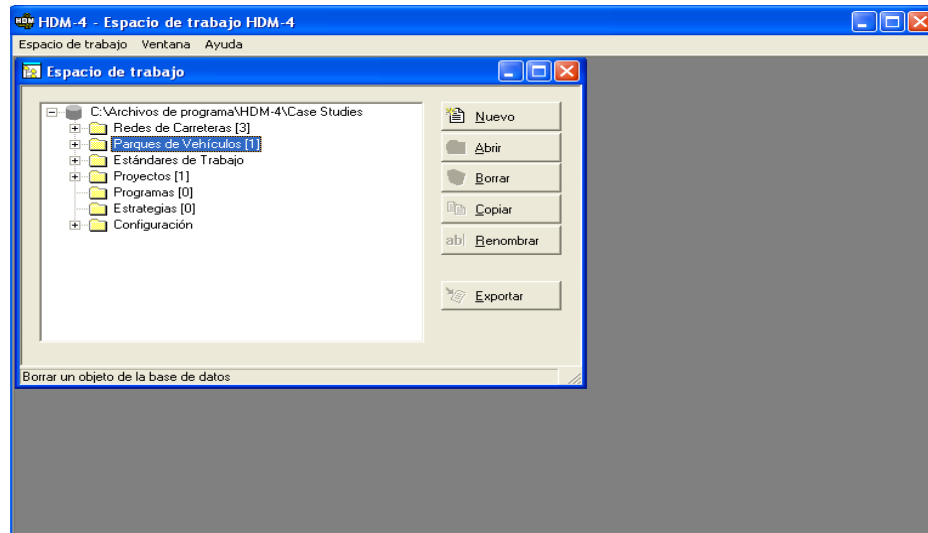
- Crear un nuevo estudio mediante el análisis de proyecto, programa o estrategia.
- Abrir un estudio existente.
- Ir a un espacio de trabajo.

Figura 4. Ventana de bienvenida al HDM-4.



Luego de elegir el tipo de estudio, se despliega la ventana de “Espacio de Trabajo”, como la que muestra la Figura 11, en la cual se visualizan todos los componentes del programa, como lo son las Bases de Datos (Configuración, Redes de Carreteras, Parques de Vehículos y Estándares de Trabajo) y las Herramientas de Análisis (Proyectos, Programas y Estrategias).

Figura 5. Espacio de Trabajo



3.2 FUNCIONES Y USOS DEL HDM-4 EN LA GESTIÓN DE CARRETERAS

En la gestión de carreteras, el sistema abarca las siguientes funciones:

3.2.1 Planificación

Comprende el análisis de redes de carreteras en su conjunto, para definir presupuestos a mediano y largo plazo y estimación de gastos de desarrollo y mantenimiento de carreteras bajo diferentes escenarios presupuestales.

3.2.2 Programación

Comprende la elaboración de programas plurianuales de obras, tanto de construcción de nuevos tramos como de mejora y mantenimiento de la red vial. Estos programas se definen para distintos tramos de carreteras de la red vial, generalmente, bajo condiciones de presupuestos limitados.

3.2.3 Preparación

Comprende la definición del detalle de cómo se han de llevar a cabo los distintos tipos de obras a ejecutar sobre un tramo de carretera. En este nivel están la definición de las características de los refuerzos de pavimentos, las modificaciones de trazados geométricos, las ampliaciones de tramos de carretera, la reconstrucción de pavimentos y obras similares.

De acuerdo a esto el HDM-4 permite analizar los resultados de diferentes estrategias de planificación de redes carreteras. Asimismo, se pueden analizar los resultados de diferentes programas de intervención en una determinada red vial y se pueden llegar a definir los trabajos específicos a realizar maximizando el beneficio de los mismos.

El sistema permite:

En planificación:

- Apoyar analíticamente la justificación de inversiones.
- Pronosticar necesidades financieras y físicas futuras para preservar la red vial.
- Determinar estrategias de mantenimiento en función de los recursos disponibles.

En aplicaciones técnicas:

- Determinar estrategias óptimas de mantenimiento.
- Determinar umbrales económicos para mejoras en las vías.
- Comparar estrategias de diseño y de mantenimiento.
- Calcular el tipo y la extensión del deterioro de las vías.

En aplicaciones económicas:

- Calcular el costo del uso de la vía y atribución de daños a la vía, en estudios de determinación de impuestos en el sector de transporte.
- Determinar pesos por ejes y configuraciones óptimas.
- Determinar los efectos de modernizar la flota de vehículos.

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Los modelos de deterioro son una herramienta muy importante para tratar de entender el comportamiento del pavimento en un futuro con unas condiciones iniciales determinadas.

Los modelos de deterioro son modelos de predicción que permiten ser utilizados en las siguientes actividades:

- Estimar las condiciones del pavimento en un futuro.
- Reconocer el tipo de acción de mantenimiento y rehabilitación, y el momento en el que se debe realizar.
- Optimizar el programa de mantenimiento o de rehabilitación en uno o varios años.
- Analizar el impacto de cierto programa de mantenimiento en las condiciones futuras del pavimento.
- Conocer el costo de ciclo de vida del pavimento.
- Retroalimentar el proceso de diseño del pavimento.

Los modelos que generalmente se utilizan en el análisis del deterioro de pavimentos flexibles pueden surgir a partir de desarrollos mecanicistas y/o empíricos.

Los primeros, tienen fundamento en teorías del comportamiento de pavimentos con una validez ampliamente reconocida, se basa no sólo en datos de pavimentos existentes, sino particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos, específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la subbase, la base granular o estabilizada y del pavimento propiamente, sea este rígido o flexible (de hormigón o asfalto); sin embargo, estos modelos requieren de una gran cantidad de datos de entrada, entre los cuales se encuentran parámetros difíciles de obtener en campo.

Mientras que el desarrollo de los modelos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes donde se ha registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, etc.), características del drenaje y de las bermas, datos de tránsito, de condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil.

Estos modelos se basan normalmente en un análisis estadístico del deterioro observado en tramos específicos y, por lo tanto, podrían no ser aplicables en condiciones distintas a las prevalecientes durante las observaciones.

Con el propósito de minimizar los problemas anteriores, en el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-III se adoptó un enfoque empírico estructurado, el cual consistió en identificar la forma funcional y las principales variables a partir de fuentes externas, y en evaluar sus impactos utilizando diversas técnicas estadísticas. De esta manera, se logró combinar en las relaciones obtenidas las bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas con los comportamientos observados en estudios empíricos. Puesto que los modelos de deterioro del HDM-III constituyeron la base para la integración de

los modelos correspondientes en el HDM-4, estos últimos mantuvieron el carácter empírico estructurado de los primeros.

A fin de ampliar el rango de aplicación de los modelos a regiones con condiciones distintas a las de los sitios en los que se desarrollaron los estudios empíricos considerados, se ha incorporado a las distintas relaciones una serie de factores de calibración diseñados para modificar la escala de los resultados.

Entre los cuales se representan los siguientes modelos:

3.3.1 Modelo de agrietamiento

Figura 6. Agrietamiento estructural por fatiga y envejecimiento



Es uno de los deterioros más importantes en los pavimentos asfálticos. Las grietas son un defecto en la superficie del pavimento que con el transcurso del tiempo y las cargas de tráfico, produce el desgaste y posteriormente la desintegración de la superficie, siendo la fatiga y el envejecimiento los principales factores que contribuyen a la generación de este tipo de afectación.

La propagación del agrietamiento puede acelerarse debido al envejecimiento y al ingreso de agua en las grietas ya producidas; lo cual se traduce también en un deterioro de las capas subyacentes.

El análisis del agrietamiento está conformado por dos etapas: la de inicio y la de progreso; además considera dos tipos de agrietamiento, el llamado agrietamiento total, y el agrietamiento ancho. El primero, se refiere a la totalidad del agrietamiento estructural, independiente de su magnitud. El agrietamiento ancho, sólo considera grietas mayores de 3 mm.

3.3.2 Pérdida de áridos

Figura 7. Pérdida progresiva de material en la superficie.



El desprendimiento de áridos se debe a la pérdida progresiva de material en la superficie debido a efectos climáticos y/o tráfico. Estos se desarrollan básicamente en los tratamientos superficiales.

La forma del deterioro de este es muy similar al modelo de agrietamiento, caracterizándose por fases de inicio y de progreso.

3.3.3 Baches

Figura 8. Deterioro de grietas anchas y pérdida de áridos severa.



Un bache se desarrolla por lo regular en una superficie agrietada o con desprendimientos. La presencia de agua acelera su formación y provoca un debilitamiento de la estructura del pavimento.

El análisis del baches está conformado por dos etapas: la de inicio y la de progreso, esta primera es calculada en el HDM-4 por separado, de acuerdo a los tiempos de aparición de los baches por agrietamientos y por desprendimientos. Mientras que en el análisis del progreso de los baches, este programa obtiene también por separado las cantidades que corresponden a los distintos precursores de este fenómeno, en este caso agrietamiento, desprendimientos y ensanchamiento de los baches existentes. El progreso de los baches puede aminorarse mediante la ejecución oportuna de acciones de conservación.

3.3.4 Roderas

Figura 9. Deformación permanente en el pavimento.



El deterioro conocido como roderas, consiste en la deformación permanente y no recuperable a lo largo del tiempo de las distintas capas del pavimento; la cual se manifiesta como depresiones en las huellas de las llantas de los vehículos.

El HDM-4 estima la profundidad de roderas después de calcular los cuatro tipos de deterioros superficiales y de redistribuir las áreas dañadas.

La profundidad total de roderas se basa en la suma de las siguientes componentes:

- Densificación inicial.
- Deformación estructural.
- Deformación plástica.
- Uso de llantas con aditamentos.

3.4 TIPOS DE DETERIORO

El programa HDM-4 modela el deterioro de pavimentos mediante los siguientes tipos:

3.4.1 Deterioros superficiales

En esta categoría se caracterizan de acuerdo a:

- **Área de Grietas**

Suma de áreas rectangulares que circunscriben el daño (grietas lineales con un ancho de 0.5 m), expresada como un porcentaje de la área de la calzada.

- ❖ Grietas Estructurales
- ❖ Grietas Angostas (1-3 mm ancho)
- ❖ Grietas Anchas (> 3 mm ancho)
- ❖ Grietas Termales

- **Área de Desprendimientos**

Área de la pérdida de material de la superficie, expresada como un porcentaje del área de la calzada.

- **Número de Baches**

Cantidad por kilometro expresados en términos del número de baches con un tamaño estándar de área de 0.1 m². Un bache es definido como una cavidad abierta en la superficie con al menos 150 mm de diámetro y 25 mm de profundidad.

- **Rotura de Borde**

Perdida de material bituminoso superficial (y posibles materiales de la base) del borde del pavimento, expresada en m² por km. El HDM-4 asigna una profundidad de 100 mm a los baches y a la rotura de borde.

De los deterioros anteriores, los tres primeros se caracterizan por dos fases, denominadas de inicio y de progreso. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La rotura de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

3.4.2 Deterioros relacionados con la deformación del pavimento

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- **Roderas**

Deformación permanente asociada al tráfico de las capas del pavimento, que se canalizan en el trayecto de las ruedas y se acumula sobre el tiempo, esta expresada como la profundidad máxima abajo de una regla de 2 m colocada transversalmente al trayecto de las ruedas.

- **Rugosidad**

Desviación entre una superficie de otra realmente plana con características de dimensión que afectan la dinámica de los vehículos y la calidad del viaje, expresada en el Índice Internacional de Rugosidad, IRI (m/km).

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

3.4.3 Deterioros relacionados con la textura superficial

Están relacionados con la capacidad del pavimento para evitar el deslizamiento de vehículos, particularmente en presencia de agua sobre la superficie. Para evaluar el estado del pavimento en este rubro, el programa utiliza los siguientes indicadores:

- **Profundidad de Textura**

Para la caracterización de la macrotextura de un pavimento se utiliza fundamentalmente el método de la mancha de arena que determina la “profundidad media de textura”, es mayor cuanto más rugosa sea la macrotextura y es conocido como el Método volumétrico.

- **Coefficiente de Rozamiento**

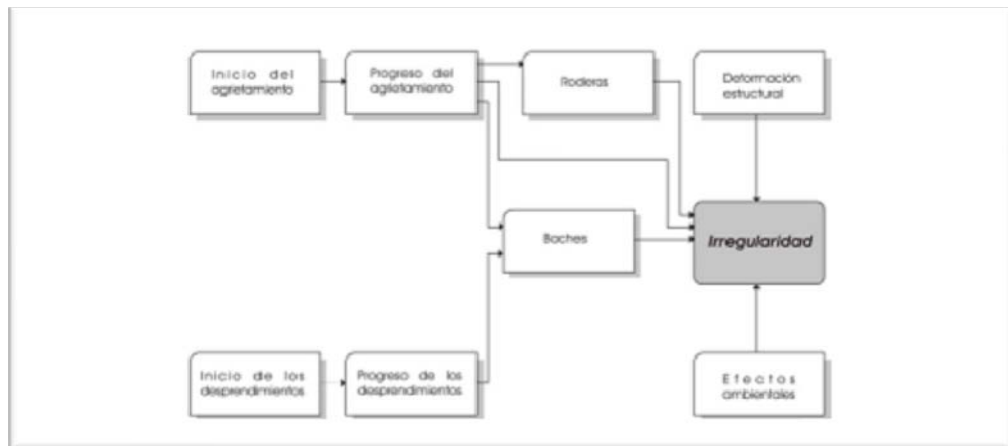
La resistencia al rozamiento es el parámetro que permite evaluar la fricción entre las llantas de un vehículo y la superficie de rodadura de la vía, evaluando en primera instancia la seguridad del usuario, mediante el coeficiente de fricción. Para que un pavimento ofrezca su suficiente adherencia a cualquier velocidad de los vehículos, debe tener una macrotextura, que contribuya a la expulsión del agua y una microtextura que garantice la adherencia. Donde la resistencia al rozamiento se expresa como el coeficiente de fuerza lateral (SDF) a 50 km/h medido usando el “Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine” (SCRIM).

Los parámetros anteriores también varían en forma continua, por lo que, como las roderas o la irregularidad, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso. En el programa se modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la irregularidad del pavimento.

La aplicación de los modelos de deterioro incluye, también, una estimación de la pérdida de capacidad estructural del pavimento en el tiempo y del deterioro del drenaje.

En la siguiente figura se muestran las interacciones entre los modelos utilizados para predecir los tipos de deterioro considerados.

Figura 10. Interacción entre los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos.



3.5 EL ÍNDICE DE RUGOSIDAD (IRI) COMO INDICADOR GLOBAL DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS

Los procedimientos de estimación de capacidad vial y nivel de servicio asumen la presencia de buenas condiciones de superficie de rodamiento, la cual se evalúa mediante herramientas que miden el perfil longitudinal del camino. El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es la medida estándar de la regularidad superficial de un camino. Dicho índice es la sumatoria, en valor absoluto, de los desplazamientos verticales a lo largo de un intervalo de distancia, dividido entre su longitud. El nivel de servicio se evalúa a partir del

volumen horario por carril, ajustado por diversos factores, así como de la velocidad de flujo libre, estimada a partir de un valor ideal, reducido según las condiciones de la carretera.

Ignorar el efecto de la regularidad superficial suele resultar en una sobrevaluación del nivel de servicio real, lo cual generalmente retrasa la justificación de las obras de mejoramiento, con las consecuentes pérdidas económicas y de funcionalidad. Por esta razón se decidió, como propósito del presente trabajo, incorporar el efecto de la condición de la superficie de rodamiento en la estimación de la capacidad, y el nivel de servicio de las vías en nuestro país, ignorar el efecto anterior perjudica la gestión de los presupuestos necesarios para la realización oportuna de las obras de mejoramiento requeridas.

La eficiencia de esta red o sistema de carreteras, tanto en su estructura como en su superficie de rodamiento, se mejorará a través de buenos diseños de pavimentos, con la implantación de sistemas adecuados de administración de pavimentos que mantengan las carreteras en condiciones de operación satisfactorias. Hay que considerar que en el área de las carreteras, los análisis de capacidad y nivel de servicio son un punto importante en la etapa estratégica de la planeación por ser elementos primordiales en la toma de decisiones en ampliaciones, construcción, mantenimiento, conservación y operación de las mismas.

3.5.1 Importancia del IRI en la metodología de análisis del HDM-4

La irregularidad del pavimento, expresada en términos del índice internacional de irregularidad es un elemento central en el uso del HDM-4 para evaluar inversiones en proyectos viales, por lo que constituye otro

elemento de justificación para la elección como principal resultado de los modelos de deterioro en la evaluación de la sensibilidad de los mismos.

El concepto de irregularidad se refiere a las imperfecciones de la superficie de la carpeta que inciden en la velocidad, costos de operación vehicular, seguridad vial, y la comodidad de los usuarios al circular por las carreteras, así como en su percepción con respecto al nivel de servicio ofrecido por las mismas. La irregularidad afecta directamente la dinámica vehicular, incrementando el desgaste de las llantas y los componentes mecánicos de los vehículos, además de un impacto considerable en el consumo de combustible.

El concepto que tienen los usuarios con respecto a la importancia del IRI como estándar internacional para la medición de la irregularidad en las carreteras, motivaron en primera instancia a la elección de este como principal resultado de referencia para evaluar los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos del programa.

El IRI, además de ser una medida objetiva de la irregularidad del pavimento, constituye un indicador de su condición global, ya que en él se reflejan tanto los defectos de la superficie de rodamiento como las deformaciones permanentes de la estructura en su conjunto. De hecho, el procedimiento para la predicción en el HDM-4 consiste básicamente en estimar en cada año del período de análisis considerado, los efectos del deterioro superficial y la pérdida de capacidad estructural en el IRI.

Lo anterior también justifica su uso como resultado de referencia en el análisis de sensibilidad. Por otro lado, la correlación entre el IRI, la velocidad y los costos de operación vehicular representa una de las premisas más importantes en las que se fundamenta la metodología de análisis del HDM-4 en particular.

3.6 COMPONENTES DE CÁLCULO DEL MODELO HDM-4

El sistema HDM-4 está estructurado con los siguientes cuatro modelos para el cálculo y análisis técnico de las mejores estrategias de mantenimiento y mejora de los distintos tramos de carretera evaluados en una forma determinada. Para utilizar adecuadamente el HDM-4, cada país o región debe calibrar muchos de los parámetros de los algoritmos incluidos en los submodelos. En nuestro caso los valores de calibración del deterioro del pavimento se referencian a los que por defecto trae incluido el programa, puesto que en Colombia aun no se ha realizado los suficientes estudios para determinar estos factores, los cuales se diferenciarían de acuerdo a las características propias de cada región o tramo en estudio.

3.6.1 Modelo de deterioro de carreteras/RD Model (Road Deterioration Model)

Este modelo predice el deterioro del pavimento en carreteras construidas en pavimento asfáltico, en concreto y en afirmado. El deterioro de la vía está en función de: tipo de pavimento, espesores, materiales empleados en su construcción, la calidad de la construcción, el volumen de tránsito que circula por la vía, las características de las cargas por eje, la geometría de la carretera, las condiciones ambientales, la edad del pavimento y las políticas de mantenimiento aplicadas.

3.6.2 Modelo de las obras de mantenimiento/WE Model (Works Effects Model)

Este modelo simula los efectos generados por los trabajos de mantenimiento y la mejora en el estado del pavimento y determina los

costos correspondientes. Estas actividades se clasifican en dos categorías como se referencia en las siguientes tablas, que son conservación y desarrollo, las cuales, a su vez, se subdividen según el trabajo a efectuar en la vía:

Tabla 2. Actividades de conservación consideradas por el modelo

| CONSERVACIÓN | | |
|---|--|--------------------------------------|
| MANTENIMIENTO RUTINARIO | MANTENIMIENTO PERIÓDICO | ESPECIAL |
| En pavimento: parcheo, sello grietas, reparación bermas, etc. | Tratamiento preventivos: sellos, riegos, etc. | Emergencias, mantenimiento invernal. |
| Drenaje | Renovación superficial: tratamientos superficiales, lechadas, etc. | |
| Miscelánea: control de vegetación, señalización, etc. | Rehabilitación: sobrecarpetas, etc. | |
| | Reconstrucción: parcial o total | |

Tabla 3. Actividades de desarrollo consideradas por el modelo

| DESARROLLO | |
|---|------------------|
| MEJORAMIENTO | CONSTRUCCIÓN |
| Ampliación | Pavimentación |
| Reconstrucción total con ampliación menor | Secciones nuevas |
| Realineamiento | |
| Trabajos por fuera de la calzada | |

3.6.3 Modelo de efectos para los usuarios/RUE Model (Road User Effects Model)

Los efectos de un proyecto para los usuarios y que el modelo determina, se reflejan en los costos de operación de los vehículos, los tiempos de viaje y los accidentes de tránsito.

Los costos de operación de los vehículos (VOC) incluyen costos variables en consumo de combustible, aceites, lubricantes, neumáticos, reparación de los vehículos (mano de obra y repuestos) y costos fijos en depreciación del vehículo, intereses, costos de tripulación y gastos generales tales como administración, seguros y estacionamiento. Estos costos son calculados para los diferentes tipos de vehículos que componen el tránsito en cada año. Los beneficios surgen los ahorros por la disminución de los costos de operación que genera el proyecto frente a la estrategia sin proyecto u otra estrategia.

Los costos de tiempos de viaje se consideran en términos del valor del tiempo de los pasajeros y de la carga y se expresan en términos económicos. Se considera que al mejorar el estado de la vía o las condiciones físicas de la calzada, habrá un aumento de la velocidad de circulación, lo que implicará un menor tiempo de viaje de los pasajeros y de la carga de los camiones. Estos ahorros serán diferentes para cada tipo de vehículo, debido a que cada tipo desarrolla diferente velocidad y distinta actividad económica.

El cálculo del costo por tiempo de viaje consiste en determinar el costo por pasajero-hora, clasificando los motivos del viaje en dos categorías: trabajo y ocio. Para el caso de trabajo, el costo se estima de acuerdo con los ingresos medios de los pasajeros y para el caso de ocio, un 50% del anterior, por ejemplo.

El tiempo de la carga consiste en determinar el costo por tonelada – hora, de acuerdo del valor de la carga promedio, según la región y en función de la tasa de de descuento.

La accidentalidad en las carreteras es analizada de acuerdo con la severidad del accidente, la cual se clasifica en tres tipos que son:

- Accidente fatal, si se presentan muertos en el lugar del accidente o los lesionados fallecen dentro de un período fijo después del accidente (por ejemplo, 31 días).
- Accidente con heridos, cuando sólo hay lesionados.
- Accidente con sólo daños, cuando no hay heridos ni muertos y sólo se presentan daños materiales.

La metodología para obtener el valor económico del costo de los usuarios, se basa en calcular la velocidad media de circulación vehicular para cada tramo de carretera a partir de las características de cada tipo de vehículo y de la geometría de la vía, el tipo de superficie y las condiciones actuales en la carretera. A partir de esta velocidad, obtener los gastos materiales de los vehículos y multiplicar las cantidades por sus respectivos precios unitarios, obteniendo así el valor total por operación vehicular. A este valor se debe agregar el costo de los accidentes y el costo de los tiempos de viaje.

Para estimar los ahorros en costos de operación vehicular se procede a calcular los costos de operación vehicular sin y con proyecto, los ahorros en cada año estarán dados por la diferencia entre ellos.

3.6.4 Modelo de efectos sociales y ambientales/SEE Model (Social and Environment Effects)

El modelo de efectos sociales y ambientales determina los efectos del consumo de energía y de las emisiones de los vehículos. Con respecto al

consumo de energía, el HDM-4 permite el cálculo del consumo de energía en el ciclo de vida, en los análisis, tanto a nivel de proyecto como de red, de las políticas de inversión en carreteras, las diferencias en consumo de combustibles renovables y no renovables, por los modos de transporte no motorizado y motorizado y el uso nacional y global de la energía.

En cuanto a la emisión de los vehículos, el HDM-4 considera y calcula los diferentes componentes de las emisiones generadas por el escape de los vehículos, entre las que se encuentran hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOX), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de carbono (CO₂), plomo (Pb) y partículas (Par).

3.7 INDICADORES ECONÓMICOS

El flujo de costos y beneficios anuales para las diferentes políticas de conservación evaluadas con respecto a una estrategia base o estrategia de referencia, permiten obtener los indicadores de rentabilidad que se utilizarán en el estudio: Valor Presente Neto (VPN) descontado a una tasa prefijada, VPN/Inversión y Tasa Interna de Retorno (TIR).

La tasa de descuento usada para los proyectos de inversión representa el costo de oportunidad del capital, definido como la rentabilidad de una inversión alternativa a la que se renuncia, para invertir en el proyecto que se está considerando. La tasa adoptada en la mayoría de los países de América del Sur para proyectos de inversión pública es del orden de 12% anual en dólares americanos sin inflación.

La tendencia histórica de esta tasa en pesos colombianos está por el orden del 10 al 15 por ciento según documentos de INVIAS.

3.8 PRECIOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS

Como el propósito de la evaluación económica es medir la conveniencia del proyecto para la sociedad, muchos de los rubros de beneficios y costos tienen asociados subsidios, impuestos, etc., que se deben ser eliminados de los precios de mercado. Para ello, se hace uso de factores de conversión (denominados razones precios – cuenta), factores que son calculados por el Ministerio de Hacienda y Crédito Público o por el organismo central de planeación. A los precios de mercado, corregidos con los factores de conversión, se les denomina precios económicos, precios sombra o precios sociales.

Esta tarea se considera importante, no sólo para que se pueda realizar la evaluación con el modelo HDM-4, sino para simplificar y estandarizar los procedimientos de evaluación económica de cualquier proyecto en el país. De esta manera, es posible determinar si los beneficios totales del proyecto para la economía en su conjunto son superiores a los respectivos costos, independientemente de quienes sean los que perciban esos beneficios.

3.9 INFORMACIÓN REQUERIDA POR EL MODELO HDM-4

La utilización del HDM-4 como herramienta de ayuda para la definición de planes, programas y proyectos de mantenimiento de carreteras, requiere la

obtención e incorporación de información que debe ser obtenida y procesada por técnicos con amplio conocimiento y criterio en el momento de evaluar las intervenciones en carreteras.

La información general requerida comprende un conjunto de datos sobre las características geométricas de la vía, su estado de deterioro, el volumen de tránsito y las previsiones de crecimiento del mismo. También, sobre la composición vehicular, definiendo las características físicas y de utilización, la valoración económica de los distintos componentes del vehículo y del valor del tiempo de los usuarios. Además, los estándares de mantenimiento y mejora de las carreteras y sus efectos sobre el estado de las carreteras, así como la determinación de su costo unitario. Por último, se debe disponer de información sobre las características climáticas de la zona en estudio.

Los datos específicos que se requieren para evaluar un proyecto de mantenimiento de pavimentos son los siguientes:

- Datos geométricos y ambientales
 - Longitud.
 - Ancho de calzada y bermas.
 - Curvatura horizontal.
 - Peralte.
 - Alineamiento vertical.
 - Altura sobre el nivel del mar.
 - Precipitación media anual.

- Estructura del pavimento existente
 - Secuencia y tipo de capas.

- Espesores.
- Características de los materiales constitutivos.
- Clasificación, granulometría, plasticidad, CBR, densidades, etc.

- Estado actual de la calzada
 - Condición superficial.
 - Rugosidad (IRI): Índice de Rugosidad Internacional.
 - Tipo y nivel de gravedad de las degradaciones (fisuras, baches, etc.).
 - Condición estructural.
 - Deflexión.
 - Número Estructural.
 - Otras características geotécnicas.

- Tránsito
 - Intensidad (TPDS).
 - Composición.
 - Tendencias de crecimiento.
 - Características de la flota o parque vehicular.

- Costos
 - Precios unitarios de los ítems de rehabilitación y mantenimiento.
 - Costos de operación de los vehículos.

Con estos datos de entrada, el Modelo HDM-4, mediante una simulación del comportamiento del pavimento y aplicando las normas de mantenimiento propuesto, prevé la condición futura de la vía, calcula los costos de operación

vehicular, los ahorros en costos de operación entre la estrategia en estudio y la estrategia base, y calcula los indicadores de evaluación económica.

3.10 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PROYECTOS DE REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

Los análisis de proyectos típicos incluyen la rehabilitación y el mantenimiento tramos de carreteras existentes, con las estrategias de intervención por estudiar y con los costos y beneficios asociados, proyectados anualmente a lo largo del periodo del análisis.

Los indicadores económicos vienen determinados por las diferentes opciones de inversión. Se puede usar el análisis de proyectos para estimar la viabilidad económica o técnica de los proyectos de inversión en carreteras, considerando los siguientes aspectos:

- Comportamiento estructural de pavimentos.
- Previsiones de ciclos de vida del deterioro de la carretera, efectos y costos de las obras.
- Costos y beneficios de los usuarios.
- Comparación económica de las estrategias al proyecto.

3.11 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE MANTENIMIENTO CON HDM-4

Para la determinación de los costos unitarios anuales de mantenimiento se ha desarrollado un submodelo que considera las condiciones geométricas y el estado de la vía, las condiciones climáticas, los niveles de tránsito y las

intervenciones de mantenimiento vial a realizar. Con este propósito, se dispone de un conjunto de relaciones que explican el comportamiento del pavimento y su deterioro por acción del clima y del tránsito. De otra parte, las intervenciones en la vía, expresadas como normas o estrategias de mantenimiento, alteran, a su vez, el comportamiento del pavimento, cuya respuesta es el costo de operación vehicular de los vehículos. Si se desean comparar dos políticas o estrategias de mantenimiento, se producen unos flujos de dinero, a precios económicos, que permitirán medir la conveniencia económica de las intervenciones.

Mediante una simulación del comportamiento del pavimento y aplicando las normas de mantenimiento propuestas, el Modelo HDM-4 prevé la condición futura de la vía, calcula los costos de operación vehicular, los ahorros en costos de operación entre la estrategia en estudio y la estrategia base, y calcula los indicadores de evaluación económica.

La principal razón para la utilización del HDM-4 radica en su capacidad de medir la conveniencia de aplicar ciertas normas o estrategias de mantenimiento a la carretera o la red en su totalidad. Las estrategias de mantenimiento las diseña el usuario del modelo, atendiendo las prácticas normales de la entidad vial, conformadas por aquellas actividades que, en conjunto, propendan por un aceptable estado permanente de la vía. Se pueden establecer tres niveles básicos de intervención:

- Nivel 1 que corresponde a Intervención Baja con mantenimiento mínimo, insuficiente, prácticamente nulo.
- Nivel 2 que corresponde a Intervención Media con mantenimiento regular.
- Nivel 3 que corresponde a Intervención Alta con mantenimiento deseable.

Cada nivel conforma una política coherente en materia de mantenimiento vial y, en términos precisos, conforma una estrategia de mantenimiento.

3.12 PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA EVALUACIÓN DE PROYECTOS CON EL MODELO HDM-4

El procedimiento para utilizar operativamente el HDM-4 comprende las siguientes acciones:

3.12.1 Creación de bases de datos y fichas de información

Atendiendo la guía del Modelo HDM-4 se debe preparar la información de entrada y su verificación para detectar posibles errores numéricos o de formato e inconsistencias internas.

3.12.2 Definición de estrategias

Combinación de características actuales, características futuras, tránsito y estrategias de mantenimiento que, en conjunto, representan un escenario de análisis, y que el HDM-4 simulará a lo largo del período de análisis reportando, para cada año, estado de la vía, intervenciones realizadas, costo de las intervenciones, a precios financieros y económicos y todas estas cifras descontadas a la tasa de actualización que se defina.

3.12.3 Evaluación de estrategias

Se realiza una comparación entre una estrategia definida y generalmente una estrategia base sin proyecto. Para esta comparación, el Modelo HDM-4 reporta los flujos de comparación y produce los indicadores de evaluación.

3.12.4 Solicitud de Reportes

Se le indica al sistema el reporte o informe de resultados que debe generar.

4. MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Desde un punto de vista general, las actividades de mantenimiento para pavimentos flexibles se relaciona con el servicio a prestar a los usuarios (circulación segura, fluida y cómoda), llevando los costes del transporte a un mínimo posible. Otro parámetro importante incluye la preservación patrimonial de la carretera que forma parte de la riqueza (capital fijo) de una Nación o de un particular.

Plantear un mantenimiento normal, es hablar del conjunto de trabajos constantes o periódicos a ejecutar para evitar el deterioro o destrucción prematuro de una obra, que la mantenga en su calidad y valor. Estos trabajos deben tender a ejecutarse en forma de ciclos.

Los objetivos particulares de las tareas de mantenimiento son tendientes a lograr:

- Una adecuada resistencia al deslizamiento relacionada ésta con la seguridad de los vehículos.
- Una regularidad superficial acorde a los trazados y velocidades, logrando así comodidad en la circulación, factor este que influye en la seguridad.
- Una resistencia estructural suficiente para el tráfico a circular por la carretera, de no ser así se caería en una disminución del valor patrimonial.

Las carreteras se proyectan y se construyen para determinado período de vida útil u horizonte de proyecto en servicio, para una determinada cantidad de años. Al concluir estos, la carretera se debe reparar para aumentar su vida útil, si las condiciones lo ameritan o rehacer.

Las vías están sometidas a un desgaste continuo originado por diferentes factores como el tráfico, factores climáticos, geotécnicos y la baja calidad de la construcción, etc. Este desgaste debe ser contemplado en el diseño y en el presupuesto de una vía mediante la programación del mantenimiento durante la vida útil, con el fin de conservar el nivel de servicio para el que fue diseñado.

El mantenimiento de pavimentos flexibles equivale a un costo de conservación, el gasto realizado para el mantenimiento de los pavimentos a lo largo del tiempo será compensado, pues, la no conservación de ellos trae consigo costos mayores que muchas veces no pueden ser considerados en las inversiones anuales, por lo que con un buen mantenimiento se llega a tener un ahorro considerable.

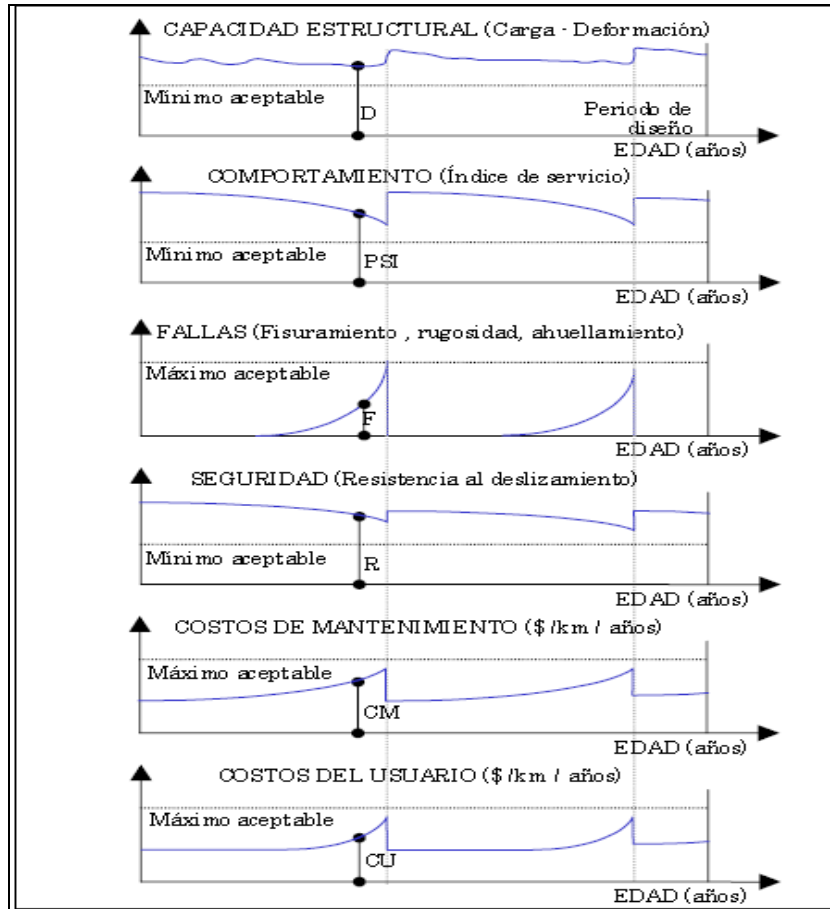
4.1 MANTENIMIENTO DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS A LO LARGO DE SU VIDA ÚTIL

El mantenimiento de las vías, debe ser concebido en la etapa de planeación, comenzando por la correcta definición de los parámetros de diseño entre los cuales se tienen la calidad de la Subrasante, tráfico, la sectorización e identificación de sitios puntuales, el método de diseño de la estructura y el diseño integral del pavimento.

Del análisis de estos, debe quedar un diseño y el dimensionamiento de la estrategia mantenimiento apropiado.

En el siguiente esquema representa el comportamiento de la estructura y los tiempos en los que se recomienda una debida intervención para evitar que los costos aumenten por el aumento del deterioro en el pavimento:

Figura 13. Comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil.



Para poder realizar una estrategia de mantenimiento se debe tener en cuenta la variación de algunos parámetros a lo largo del período de diseño, como son la capacidad estructural, índice de servicio, fallas, resistencia al deslizamiento, costos de mantenimiento y costos del usuario. Estos parámetros deben estar por dentro de los márgenes aceptables debajo del límite.

De acuerdo al tipo de estructura de pavimento y al tráfico, se requiere un proceso de mantenimiento, el cual está sintetizado de manera porcentual en una tabla de mantenimiento de acuerdo al tipo de falla durante la vida útil del pavimento

4.2 TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS

Un programa de mantenimiento adecuado, evita la necesidad de ejecutar la rehabilitación de las vías, este procura asegurar al menor costo posible, el funcionamiento adecuado de una vía o red vial, permitiendo mejores costos de operación de los vehículos y mayor seguridad para los usuarios, por lo que la falta de este significaría desperdiciar las inversiones hechas anteriormente.

Es importante tener en cuenta que para proyectar un mantenimiento, es necesario conocer como es el deterioro de las vías y cuál es el momento en que se debe aplicar los correctivos necesarios. Los indicadores más significativos en el proceso normal de deterioro de los pavimentos flexibles son debidos a fallas como deformaciones permanentes, longitudinales y transversales, también a la fisuración, agrietamientos y desprendimientos. Otros factores importantes son la adherencia entre neumático / pavimento y las deformaciones bajo carga (deflexión y radio de curvatura). La falta de atención a estos indicadores, lleva a pagar costos de reparación excesivos.

Entre otras razones para que se presente el deterioro, se han identificado las siguientes:

- Insuficiencia y volatilidad en los recursos destinados al mantenimiento.
- Ausencia de mecanismos que garanticen la coordinación entre la planeación del mantenimiento y la asignación de los recursos.
- Ineficiencia en el modelo de gestión.

Las entidades viales han encontrado que es muy rentable mantener un pavimento cuando la vía se encuentra en regular estado ya que los gastos invertidos son más bajos. Por el contrario, recuperar la carretera cuando esta

pasa de un estado malo a uno muy malo, los costos a largo plazo son mucho más altos. De igual forma la estrategia de mantenimiento y el momento en que se deba aplicar puede afectar al usuario.

Las clases de mantenimiento que comúnmente se manejan son:

4.2.1 Mantenimiento rutinario

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. Se debe realizar una vez por año para conservar las partes aledañas a la calzada en perfecto estado de funcionalidad y operación.

El mantenimiento rutinario generalmente consta de las siguientes actividades:

- Reparación localizada de pequeños defectos
- Nivelación de hombros no pavimentados
- Limpieza de cunetas
- Limpieza de alcantarillas
- Limpieza de otros sistemas de drenaje
- Mejora del señalamiento
- Control de malezas
- Mejora de las zonas laterales
- Protección contra erosión y deslizamientos
- Nivelación de superficies sin pavimentar
- Bacheo
- Sellado de grietas y fisuras

El bacheo y el sellado de fisuras son las tareas comúnmente ejecutadas como mantenimiento de rutina de los pavimentos asfálticos, cuyas características son:

4.2.1.1 Sellado de grietas

El sellado de grietas se utiliza para rellenar grietas individuales y prevenir la entrada de agua o de materiales tales como arena, rocas o desechos. Esta tarea permite la corrección de grietas transversales, longitudinales, de reflexión y de bloque. Antes de aplicar el sellado de grietas éstas deben ser limpiadas de impurezas. El sellado es más efectivo si se aplica bajo temperaturas moderadas, como puede ser en otoño o primavera y si se efectúa inmediatamente después de la formación de las grietas.

4.2.1.2 Bacheo

El bacheo es un método común para el tratamiento de áreas con daños localizados. Las reparaciones pueden ser profundas y extenderse desde la superficie de rodamiento hasta la subbase, o parciales, las cuales no abarcan toda la profundidad del pavimento existente.

El bacheo profundo es necesario cuando la sección entera del pavimento está dañada. La mayoría de las veces, la base o la subbase contienen material en mal estado y éste es el origen del problema, por lo cual es necesario reparar a profundidad. El material de bacheo puede ser cualquier mezcla asfáltica en caliente o en frío, como mortero o lechada asfáltica.

Típicamente, las mezclas en caliente son usadas para bacheo permanente y las mezclas en frío para bacheos temporales o de emergencia.

El procedimiento para bacheo es bien conocido y comprende los siguientes pasos:

- Remover el agua y los desechos del bache.
- Dar una forma cuadrada a las orillas del bache, de tal manera que los lados queden verticales y mantengan una posición adecuada de contacto en todos los lados.
- Aplicar el material de bacheo en la superficie cuadrada formada en el paso anterior.
- Compactar el material vertido partiendo del centro hasta los lados.

4.2.2 Mantenimiento periódico

La conservación periódica incluye todas las obras de rehabilitación que se necesita implementar para que un camino ofrezca las condiciones adecuadas de servicio, se realiza con una periodicidad superior a un año para evitar daños mayores que conlleven a inversiones no cuantificadas en el proyecto.

Las actividades contempladas dentro del mantenimiento periódico pueden ser:

- Recuperación de pavimentos
- Renivelación
- Tratamientos superficiales
- Reconstrucción de terraplenes
- Rehabilitación de bases
- Reconstrucción de carpetas
- Riegos de sello

- Restitución de señalamiento horizontal
- Obras de prevención de derrumbes.

El mantenimiento periódico generalmente consta de las siguientes actividades:

4.2.2.1 Riegos de sello

Un riego de sello es una aplicación ligera de una emulsión asfáltica sutilmente diluida a la superficie de un pavimento, como son el tratamiento superficial y el mortero asfáltico.

Los riegos de sello son actividades muy comunes en la rehabilitación de carreteras. Estas sirven para reparar los daños superficiales del pavimento cuando alcanzan proporciones que no pueden ser tratados con sellos preventivos, pero tienen un efecto pequeño en cuanto a corrección de irregularidad y aporte estructural. Pueden ser útiles para posponer por uno o dos años máximo la ejecución de una acción de rehabilitación como la construcción de una sobrecarpeta.

Esta actividad es económica y puede proporcionar flexibilidad a la estructura existente, por lo que es recomendable para carreteras poco transitadas y que se puedan cerrar por 4 o 6 horas para que la emulsión alcance la resistencia de diseño.

4.2.2.2 Sobrecarpetas

Es la aplicación de una capa asfáltica sobre la capa existente la cual permite cubrir los daños que tenga el pavimento. Las sobrecarpetas se utilizan para aumentar la capacidad estructural de los pavimento y es una

de las principales actividades que mas ayudan para reducir el IRI, por lo tanto suelen considerarse como una acción de rehabilitación.

4.2.2.3 Reconstrucción

Es la reconstrucción normal de un pavimento cuyo estado superficial o capacidad estructural no son adecuados para el nivel de servicio, considerándose como un estándar de mejora.

4.3 MANTENIMIENTO VIAL REALIZADO EN COLOMBIA

Las deficiencias en lo que concierne a la parte constructiva, la carencia de programas de mantenimiento, la falta de recursos económicos y naturales, etc., no ha permitido tener una red vial que satisfaga las necesidades del país.

La afectación por el desempeño de la red vial: urbana, interurbana ó rural es de manera global para cada uno de los usuarios, pero estos solo se preocupan por su estado cuando se ven perjudicados directamente, bien sea por las molestias y retrasos a las actividades cotidianas ó algún deterioro al vehículo que utilizan. El desempeño de las vías que merecen los contribuyentes, no es el adecuado por multiplicidad de razones.

Anteriormente, las entidades viales no tenían en cuenta el rubro de mantenimiento en los grandes proyectos de infraestructura vial, solo se preocuparon por la ampliación de la red nacional. El procedimiento de la MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transporte) para programas de mantenimiento, consistía en recorrer los tramos deteriorados y sugerían las reparaciones de acuerdo a su criterio, con estos datos elaboraban un presupuesto. Desafortunadamente, estos presupuestos eran generalmente

asignados años más tarde cuando el deterioro ya era superior al presupuestado. Esta entidad era la encargada de realizar los mantenimientos en la red nacional pues ella misma contaba con la maquinaria y mano de obra calificada para hacer las reparaciones.

Ahora el INVIAS (Instituto Nacional de Vías) delega el mantenimiento vial a empresas privadas, destinado un determinado presupuesto para este fin.

Debido que ya existen algunas estrategias estándar de mantenimiento para los diferentes tipo de pavimento, se puede lograr una proyección económica del costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil de un proyecto, la cual ha cobrado gran importancia con la incursión de inversionistas privados y concesionarios, los cuales actualmente trabajan en la recuperación de la red vial colombiana.

5. METODOLOGIA

Se desarrolla a continuación el planteamiento utilizado en la evaluación técnica y económica de un proyecto vial, correspondiente a la red nacional, sobre el cual se realiza una simulación de inversión, estado y utilización de ella a lo largo de un período de análisis de 30 años con el fin de optar por la estrategia de inversión y actuación más conveniente con base en índices de rentabilidad económica.

Considerando que actualmente se están realizando proyectos de pavimentos con periodos de diseño estructural de diez (10) años de acuerdo a los manuales de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, se tratara de contemplar si es conveniente aumentar o disminuir este periodo de diseño adoptado para las condiciones colombianas, analizando en el transcurso del tiempo y a la luz de la evolución del tránsito, el comportamiento del pavimento y de las diferentes estrategias de mantenimiento planteadas para tratar de prolongar la vida útil de las calzadas, ofreciendo comportamientos estructurales favorables que garantizan el adecuado desempeño de la estructura en respuesta a la seguridad, comodidad y economía, tanto de los usuarios como de la entidad encargada del manejo de la vía en análisis.

Para esto se considero tres vías como referencias pertenecientes a la red vial nacional planteando que su estado es no pavimentado, las cuales corresponden a tráficos bajos, medios y altos. Cada una de estas vías seleccionadas tendrá características distintas con el fin de poder hacer una comparación de cada una de las alternativas planteadas y así conocer que implicaciones o factores son importantes en el deterioro de la vía.

De acuerdo a la composición del tráfico, se crearon tres proyectos para el análisis de acuerdo a los tráficos antes mencionados, con el fin de modelar cada una de estas situaciones y tratar de referenciar cual será su comportamiento funcional y estructural en cada uno de los tramos seleccionados.

Cada uno de los proyectos planteados se dividió en 12 tramos homogéneos los cuales contaban con características propias de cada una como lo son el tipo de tráfico, estado de la vía, tipo de terreno, clima, pavimento, geometría, etc. De acuerdo a las características climáticas del tipo de vía en estudio, se considero que las condiciones son únicas a lo largo de la totalidad del tramo, razón por la cual se definieron tres zonas climáticas de acuerdo a las vías tomadas como referencia para el análisis.

Las características geométricas fueron asumidas de acuerdo al Manual de Volúmenes de Tránsito del Ministerio de Transporte Nacional, donde se referencian de acuerdo al tipo de terreno que se utiliza .Adicionalmente se consideraron tres tipos de capacidad del suelo (mala, regular, buena), estas se combinaron con cada uno de los periodos de diseño propuestos para este análisis, en este caso fueron de 5, 10, 20 y 30 años.

Los 36 tipos de pavimentos que surgieron de la combinación de las condiciones planteadas, se diseñaron utilizando el Método Tradicional, estos diseños corresponden a las mejoras programadas en el análisis, cada una tendrá un estudio tanto técnico como económico distinto debido al comportamiento funcional y estructural del pavimento a lo largo del periodo de análisis, cada una de estas mejoras tiene su evaluación económica, considerando la cantidad de material utilizado para la construcción del pavimento por km.

La composición vehicular de la flota circulante en cada tramo se tomó de acuerdo a los porcentajes contemplados en el manual de volúmenes de tránsito del

INVIAS con la actualización del 2007. Los diferentes tipos de vehículos tomados se les consideran las características físicas, pesos, dimensiones y costos unitarios de insumos.

También se plantea un estado de conservación el cual consiste en darle a cada tipo de estructura de pavimento un mantenimiento rutinario correctivo o programado, permitiendo que la capa de rodadura se encuentre en buenas condiciones y así lograr aumentar la vida útil del pavimento.

En este caso se planteo estas alternativas de mantenimiento para determinar el efecto que se tenía al plantear formas distintas de ejecución. La primera aplicación tomada fue la correctiva, esta realiza el mantenimiento de acuerdo al porcentaje de de área afectada en la calzada, con consideraciones diferentes para las actividades de bacheo y sello de fisuras. El mantenimiento programado fija un intervalo de tiempo de aplicación para cada una de las actividades de conservación anteriormente dichas, con estas alternativas de conservación se logra determinar el comportamiento del pavimento en lo funcional.

Una vez consideradas todas estas variables planteadas para este estudio usamos la herramienta computacional HDM-4 descrita al inicio de este proyecto, la cual permitirá modelar cada uno de los tramos de las vías en discusión y de esta forma encontrar los indicadores económicos para la evaluación de proyectos viales, referenciados en este documento.

El análisis de los resultados se considerara por proyecto, con esto se pretende determinar cuál es el periodo de diseño más recomendable de acuerdo a cada tipo de suelo en los tres tipos de transito planteados.

6. CONFIGURACIÓN BÁSICA, DESARROLLO Y CALCULO DE COSTOS

La valoración de los costos unitarios para cada uno de los proyectos planteados, se hará con base en condiciones de precios unitarios adecuadas a las condiciones específicas del proyecto.

A continuación se encontrara toda la información requerida en el programa HDM-4, correspondiente tanto a características físicas y geométricas como los costos de inversión involucrados en el análisis, junto con el planteamiento utilizado en la evaluación de las alternativas.

6.1 ORGANIZACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

En este caso se señala brevemente la secuencia de acciones propias del programa para organizar la información de una aplicación, las cuales cubren:

6.1.1 Bases de Datos

La información se organiza en los siguientes cuatro grupos:

6.1.1.1 Configuración preliminar

Se debe especificar una configuración preliminar que cubre el modelo de tránsito, tipo de velocidad/capacidad, zonas climáticas y moneda.

6.1.1.2 Redes de Carreteras

Se debe digitar la información geométrica, las características de la estructura de pavimento y los niveles de tránsito.

6.1.1.3 Parques de Vehículos

Se deben especificar las características de los vehículos y los costos de los principales ítems de costos.

6.1.2 Estándares de Trabajo

6.1.2.1 Estándares de Conservación

Se deben formular las normas o estrategias de mantenimiento que se quieren examinar con el análisis del modelo HDM-4.

6.1.2.2 Estándares de Mejoras

Se deben especificar las obras de mejoramiento.

6.1.2.3 Costos de los Trabajos

Se deben indicar los costos unitarios de las principales tareas de mantenimiento.

6.1.2.4 Proyectos

Esta labor corresponde a la organización de las aplicaciones propiamente: tramos de análisis, configuración de estrategias, evaluación de estrategias y

solicitud de informes.

6.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN EL PROYECTO

Dentro de las variables requeridas en el análisis del proyecto se tienen:

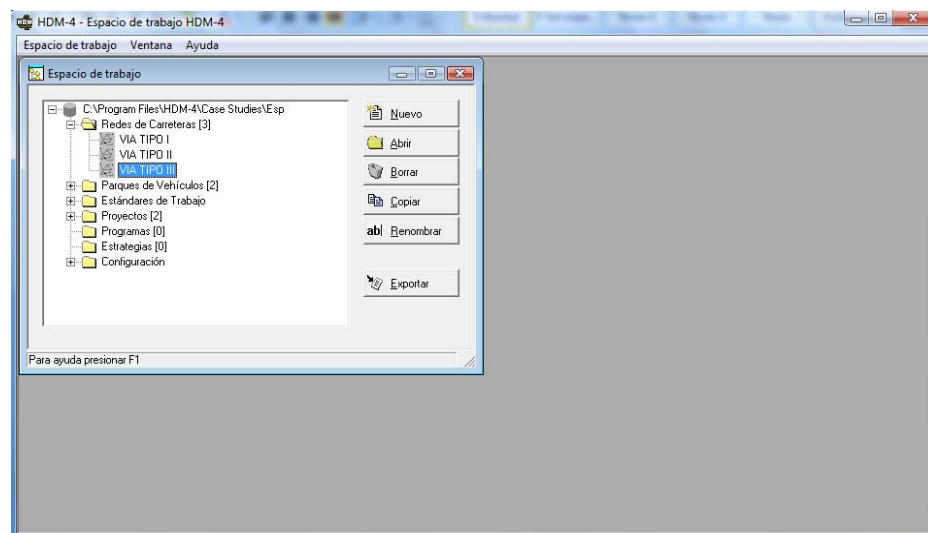
6.2.1 Definición de la red de carretera

De acuerdo a las consideraciones tomadas en este análisis para la red de carretera nacional, los grupos de vías tenidos en cuenta corresponden de la siguiente manera:

- Vía Tipo I: estará planteada para un tránsito bajo.
- Vía Tipo II: estará planteada para un tránsito medio.
- Vía Tipo III: estará planteada para un tránsito alto.

A continuación se muestra la creación de la red de carretera, correspondiente al tráfico alto en el modelo HDM-4:

Figura14. Red de carreteras creadas en el HDM-4



6.2.1.1 Descripción de las vías utilizadas

En la siguiente tabla se muestra en detalle las características generales para cada tipo de vía considerada para este estudio.

Tabla 4. Variables tomadas para cada uno de los tramos

| Descripción de la vía | Vía tipo I | Vía tipo II | Vía tipo III |
|------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Tipo de terreno | Montañoso | Plano | Montañoso |
| Modelo de Trafico | Interurbano | Interurbano | Interurbano |
| Clase de carretera | Terciaria | Secundaria | Primaria |
| Tipo capa rodadura | Sin pavimentar | Sin pavimentar | Sin pavimentar |
| Tipo firme | Tierra | Tierra | Tierra |

6.2.1.2 Clima

En la tabla 5 se muestra las zonas climáticas consideradas en el estudio:

Tabla 5. Variables tomadas para cada uno de los tramos

| Tipo de vía | Vía tipo I | Vía tipo II | Vía tipo III |
|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Zona climática: | Bosque húmedo tropical | Bosque seco tropical | Bosque húmedo tropical |

A continuación se muestra en la figura las características de la vía antes de la mejora, es decir, en su estado sin pavimentar.

Figura 15. Definición de las características del tramo.

6.2.1.3 Sectorización de los tramos de análisis

La sectorización de los tramos en secciones homogéneas planteados dentro del modelo HDM-4 fueron los siguientes como los representa la figura:

Figura 16. Tramos planteados.

| ID | Descripción | Fecha últ. modif. | Tipo de capa de rodadura | Tipo de firme | Long. (k) |
|-----|--------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------|-----------|
| 001 | TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=5 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 002 | TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=10 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 003 | TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=20 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 004 | TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=30 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 005 | TRAMO 3 - TA - CBR=5% - PD=5 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 006 | TRAMO 3 - TA - CBR=5% - PD=10 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 007 | TRAMO 3 - TA - CBR=5% - PD=20 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 008 | TRAMO 3 - TA - CBR=5% - PD=30 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 009 | TRAMO 3 - TA - CBR=10% - PD=5 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 010 | TRAMO 3 - TA - CBR=10% - PD=10 | 20/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 011 | TRAMO 3 - TA - CBR=10% - PD=20 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |
| 012 | TRAMO 3 - TA - CBR=10% - PD=30 | 17/12/2008 | Sin pavimentación | Tierra | |

6.2.1.4 Características geométricas

Las características geométricas fueron asumidas de acuerdo al Manual de Volúmenes de Tránsito del Ministerio de Transporte Nacional, el cual ha sido creado en base a la experiencia en construcción de Colombia, en donde se consideraron cada uno de estas características de acuerdo al grado de importancia que tiene en las propiedades físicas de los pavimentos y se hará una pequeña descripción de cada una de ellas, entre las más importantes tenemos:

- **Promedio de subidas más bajadas**

Variable que representa un valor absoluto de todos los ascensos y descensos de un tramo seguido. Es fundamental conocer la altitud del tramo para que el programa tenga un mejor acierto en sus cálculos.

- **Curvatura horizontal media**

Se define como la suma de todas las deflexiones horizontales del tramo sobre la longitud del mismo, para este caso se usará las planteadas en el Manual de Volúmenes de Tránsito del Ministerio de Transporte Nacional.

- **Velocidad límite**

La velocidad para el diseño de carreteras para vías de tránsito bajo, medio y alto estarán limitadas dependiendo del tipo de terreno, siendo estos los terrenos planos, ondulados y montañosos.

En la siguiente tabla se mostrarán los parámetros utilizados en el análisis:

Tabla 6. Variables tomadas para cada uno de los tramos

| GEOMETRÍA | Vía tipo I | Vía tipo II | Vía tipo III |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Subidas + bajadas | 50 m/km | 5 m/km | 50 m/km |
| Curvatura horizontal media | 300 °/km | 50 °/km | 300 °/km |
| Velocidad limite | 50 Kph | 70 kph | 90 kph |
| Altitud | 1106 Msnm | 132 msnm | 278 msnm |
| Longitud | 30 km | 30 km | 30 km |
| Ancho de calzada | 7.3 m | 7.3 m | 7.3m |
| Tipo de drenaje | Forma de v blando | Forma de v blando | Forma de v blando |
| Ancho de berma | 0 m | 0m | 0 m |
| Número de carriles | 2 | 2 | 2 |

El tramo seleccionado para este ejemplo expone en detalle el ingreso de los datos para un tráfico alto con un TPD de 4898 vehículos, un CBR malo del 3% y un período de diseño de 5 años.

Figura 17. Ingreso de Datos Geométricos.

6.2.1.5 Tipo de firme

Las características del suelo de acuerdo a la capacidad portante del suelo a la estructura del pavimento se representan a continuación:

Tabla 7. Variables utilizadas para los tramos en estudio

| Tipo de suelo | Capacidad subrasante | CBR (%) |
|----------------------------------|----------------------|---------|
| Grava bajo contenido en Arcillas | bueno | 10 |
| Arena Limosa SM | regular | 5 |
| Arcilla CH | malo | 3 |

Figura 18. Pestaña Firme

Tramo: TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=5

Definición | Geometría | **Firme** | Estado

Material rodadura: Grava cuarcítica

Material explanada: Arcillas (no orgánicas) de alta plasticidad, CH

Método compactación: Mecánica

Año último recargo: 2007

Detalles de construcción del firme

6.2.1.6 Índice de rugosidad internacional

La pestaña Estado requiere el valor del IRI (Índice de Rugosidad Internacional) actual del terreno, se puede observar que como no existe mejora el índice es alto.

Figura 19. Pestaña Estado

Tramo: TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=5

Definición | Geometría | Firme | **Estado**

| | |
|--------------------------|-------|
| Estado a final de año | 2007 |
| Espesor de grava (mm) | 75.00 |
| Regularidad (IRI - m/km) | 11.00 |

Datos de estado anuales

6.2.2 Información vehicular

El tránsito de una vía está relacionado con el desarrollo y crecimiento general de la zona, donde es importante considerar tanto los aspectos relacionados con la planificación de la movilidad y el transporte así como los relacionados con el contexto político, económico y social.

Como se hizo referencia anteriormente acerca de la consideración de las vías para el análisis de este trabajo de grado, la composición vehicular de la flota circundante en cada una de estas se tomó de acuerdo a los porcentajes contemplados en el manual de volúmenes de tránsito del INVIAS con la actualización del 2007.

La definición de cada tipo de vehículo incluye características físicas, pesos, dimensiones y costos unitarios de insumos.

6.2.2.1 Características del parque automotor colombiano

Las características físicas de la flota vehicular se tomaron a partir de las especificaciones del INVIAS dadas en el manual del volumen de tránsito.

Se considera que en condiciones normales un vehículo realiza sus operaciones durante 24 días, laborando 2 horas diarias (pueden no ser seguidas), lo que arroja como resultado que un Auto en Colombia, dispone para prestar su servicio de 48 horas en el mes y 576 al año.

6.2.2.2 Definición de costos económicos para el parque automotor colombiano

Los costos económicos se deducen de los costos financieros, por tal motivo

es necesario aplicar un factor de conversión para obtenerlos, el cual fue referenciado a los estudios realizados en la Universidad de los Andes. Para la obtención de los costos de operación vehicular nos basamos en la tesis "IMPACTO DE LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN PROGRAMAS COMO EL PLAN 2500" realizada en la Universidad Industrial de Santander en el 2008 y de algunas publicaciones del INVIAS sobre costos de operación de tránsito pesado dadas en el 2004, esta información se ajusto aplicando una actualización de los costos de acuerdo a cotizaciones realizadas.

A continuación se presentan los costos de operación tomados para el análisis:

- **Costos de automóviles**

Tabla 8. Costos Económicos para un automóvil

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 31,650,000.00 | \$ 21,618,852.46 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 166,440.00 | \$ 114,071.04 |
| Combustible (litro) | \$ 1,952.00 | \$ 1,330.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 6,877.00 | \$ 4,697.40 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 5,990.66 | \$ 4,091.98 |
| Tripulación (hora) | 0 | 0 |
| Gastos generales | \$ 13,918,464.00 | \$ 9,507,147.54 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

- **Costos de buses**

Tabla 9. Costos Económicos para buses

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 56,553,333.33 | \$ 38,629,326.05 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 266,000.00 | \$ 181,693.99 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914,00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 1,328.31 | \$ 910.32 |
| Tripulación (hora) | 5967.24 | 4076 |
| Gastos generales | \$ 92,717,568.00 | \$ 63,331,672.13 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

- **Costos de camiones**

Tabla 10. Costos Económicos para un camión C2 pequeño

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 56,553,333.33 | \$ 38,629,326.05 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 1,161,000.00 | \$ 236,338.80 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914,00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 3,156.51 | \$ 2,156.09 |
| Tripulación (hora) | 4977.6 | 3400 |
| Gastos generales | \$ 72,119,430.56 | \$ 49,261,906.12 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0.8 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

Tabla 11. Costos Económicos para un camión C2 grande.

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 104,913,333.33 | \$ 71,662,112.93 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 1,161,000.00 | \$ 793,032.79 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914,00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 3,156.51 | \$ 2,156.09 |
| Tripulación (hora) | 4977.6 | 3400 |
| Gastos generales | \$ 88,228,224.00 | \$ 60,265,180.33 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0.8 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

Tabla 12. Costos Económicos para un camión C3-C4.

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 152,636,000.00 | \$ 104.545.000 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 1,161,000.00 | \$ 774,032.79 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914.00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 2,100.00 | \$ 1,430.09 |
| Tripulación (hora) | 4977.6 | 3400 |
| Gastos generales | \$ 88,228,224.00 | \$ 36,506,000.00 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0.8 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

Tabla 13. Costos Económicos para un camión C5.

| Costos Económicos para un camión C5 | | |
|--|-------------------------|------------------------|
| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 192,720,333.33 | \$ 132,237,000.00 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 1,161,000.00 | \$ 774,032.79 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914,00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 3,156.51 | \$ 10,156.09 |
| Tripulación (hora) | 4977.6 | 3400 |
| Gastos generales | \$ 88,228,224.00 | \$ 43,365,180.33 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0.8 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

Tabla 14. Costos Económicos para un camión >C5.

| Características | Costo Financiero | Costo Económico |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Vehículo nuevo (unidad) | \$ 302,178,333.33 | \$206,971,112.93 |
| Neumático de repuesto (unidad) | \$ 1,161,000.00 | \$ 793,032.79 |
| Combustible (litro) | \$ 2150.00 | \$ 1,650.00 |
| Aceite lubricante (litro) | \$ 11,100.00 | \$ 7.914.00 |
| Mantenimiento (hora) | \$ 14,870.51 | \$ 10,190.09 |
| Tripulación (hora) | 4977.6 | 3400 |
| Gastos generales | \$ 88,228,224.00 | \$ 43,365,180.33 |
| Interés anual | 12% | |
| Retraso carga (hora) | 0.8 | |
| Factor de Conversión | 1.464 | |

Fuente: PROYECTO DE GRADO IMPACTO DE LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN PROGRAMAS COMO EL PLAN 2500, pág. 55-66.

6.2.3 Definición del tráfico utilizado

Los datos de tráfico se presentan como el tránsito promedio diario (TPD) del tramo que se evaluó. Esto quiere decir el promedio de vehículos que transitan por la vía diariamente de acuerdo a conteos realizados por el Instituto Nacional de vías (INVIAS).

Para cuantificar adecuadamente los volúmenes de tránsito en un proyecto vial se deben considerar los siguientes tres componentes:

6.2.3.1 Tránsito Normal

Consiste en el tránsito que existe en la vía bajo condiciones normales de operación, es decir, sin que ningún agente externo lo afecte. Su existencia está influenciada por el desarrollo histórico y las características socioeconómicas de la zona de estudio.

6.2.3.2 Tránsito Atraído

Es considerado como el volumen de vehículos que se extrae de otras vías hacia una vía en estudio, este debe ser analizado con relación a los beneficios que se originen por la puesta en marcha de la vía.

6.2.3.3 Tránsito Generado

Es la componente del tránsito que se observa en una vía por el hecho de

que exista como nueva o se mejore, induciendo la creación de viajes que anteriormente no se hacían, se hacían a un destino diferente o por otro medio. Lo genera la propia vía y puede ser atribuido a cambios en el uso del suelo.

A continuación se muestran los datos de TPD utilizados en el análisis:

Tabla 15. TPD utilizado para transito bajo

| CLASE DE VEHÍCULO | TPD (IMD) |
|-------------------|------------------------|
| Motorizados | 568 |
| No motorizados | No se tienen en cuenta |

Tabla 16. TPD utilizado para transito medio

| CLASE DE VEHÍCULO | TPD (IMD) |
|-------------------|------------------------|
| Motorizados | 1.748 |
| No motorizados | No se tienen en cuenta |

Tabla 17. TPD utilizado para transito alto

| CLASE DE VEHÍCULO | TPD (IMD) |
|-------------------|------------------------|
| Motorizados | 4.898 |
| No motorizados | No se tienen en cuenta |

Para la valoración del tránsito y poder desarrollar el procedimiento de modelación de la vía en HDM-4, se utilizaron los siguientes datos:

Tabla 18. Composición del tráfico bajo

| TIPO DE VEHÍCULO | DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL | FACTOR DE EQUIVALENCIA | CRECIMIENTO ANUAL |
|------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| Autos | 48,00% | 0 | 3% |
| Buses | 15,00% | 1 | 3% |
| C2-P | 15,24% | 1,1 | 3% |
| C2-G | 21,03% | 2,34 | 3% |
| C3-C4 | 0,73% | 3,42 | 3% |
| C5 | 0,00% | 4,16 | 3% |
| > C5 | 0,00% | 4,5 | 3% |

Tabla 19. Composición del tráfico medio

| TIPO DE VEHÍCULO | DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL | FACTOR DE EQUIVALENCIA | CRECIMIENTO ANUAL |
|------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| Autos | 32,00% | 0 | 3% |
| Buses | 4,00% | 1 | 3% |
| C2-P | 3,47% | 1,1 | 3% |
| C2-G | 9,35% | 2,34 | 3% |
| C3-C4 | 5,62% | 3,42 | 3% |
| C5 | 4,70% | 4,16 | 3% |
| > C5 | 13,85% | 4,5 | 3% |

Tabla 20. Composición del tráfico alto

| TIPO DE VEHÍCULO | DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL | FACTOR DE EQUIVALENCIA | CRECIMIENTO ANUAL |
|------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| Autos | 32,00% | 0 | 3% |
| Buses | 12,00% | 1 | 3% |

| TIPO DE VEHÍCULO | DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL | FACTOR DE EQUIVALENCIA | CRECIMIENTO ANUAL |
|------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| C2-P | 11,57% | 1,1 | 3% |
| C2-G | 14,59% | 2,34 | 3% |
| C3-C4 | 8,28% | 3,42 | 3% |
| C5 | 4,67% | 4,16 | 3% |
| > C5 | 16,89% | 4,5 | 3% |

De acuerdo a las características del parque automotor y el TPD del tramo seleccionado las condiciones utilizadas en el modelo HDM-4 son:

Figura 20. Parque automotor seleccionado

| Nombre | Clase | Fecha últ. modif. | Tipo base | Categoría |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|------------|
| Autos | Coche de pasajero | 20/12/2008 | Coche grande | Motorizado |
| Buses | Autobuses | 20/12/2008 | Autobús de largo recor | Motorizado |
| Camión C2 Grande | Camiones | 20/12/2008 | Camión mediano | Motorizado |
| Camión C2 Pequeño | Camiones | 20/12/2008 | Camión ligero | Motorizado |
| Camión C3 y C4 | Camiones | 20/12/2008 | Camión pesado | Motorizado |
| Camión C5 | Camiones | 20/12/2008 | Camión articulado | Motorizado |
| Camión Mayor a C5 | Camiones | 20/12/2008 | Camión articulado | Motorizado |

6.3 ESTÁNDARES DE MEJORAS Y DE CONSERVACION

En esta parte se plantean las mejoras que se le realizarán a los diferentes tipos de vías tomadas para el estudio de manera programada.

También se plantea un estado de conservación, este consiste en darle a cada tipo de estructura de pavimento un mantenimiento correctivo o programado, permitiendo que la capa de rodadura se encuentre en buenas condiciones y así lograr aumentar la vida útil del pavimento.

6.3.1 Estándares de Mejoras

El dimensionamiento propuesto para cada estructura fue calculado por el método AASHTO 93, en donde este método tiene como finalidad determinar el número estructural de cada material, es decir la capacidad estructural de la subrasante, la Subbase y la base granular. Para esto es necesario la consideración de variables como el tránsito (n), Serviciabilidad de la vía (ΔPSI), confiabilidad (Z_r), resistencia de la subrasante (m_r), propiedades de los materiales, drenaje, número estructural (s_n) en pulgadas y los efectos ambientales.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los valores utilizados en la ecuación para el cálculo del número estructural de cada estructura:

Tabla 21. Valores para desarrollo de ecuación

| | | | |
|--------|--------|------------------|-----|
| Zr 90% | -1,645 | PSI _o | 4,2 |
| So | 0,45 | PSI _f | 2 |

6.3.1.1 Número de ejes equivalentes para los tráficos en análisis

El cálculo de ejes equivalentes se define como el número total de aplicaciones de un eje sencillo dual estándar de 80 KN, que provocarían el mismo daño al camino, durante un año, que los ejes del vehículo considerado. De acuerdo a la composición del tráfico y sus porcentajes

planteados, se calcula el número de ejes equivalentes para cada una de las alternativas propuestas:

Tabla 22. Número de ejes equivalentes para tráfico Bajo- Medio –Alto

| Año | Tráfico Bajo | | Tráfico Medio | | Tráfico Alto | |
|------------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|-----------------|
| | F. Equiv. | Nro Ejes Equiv. | F. Equiv. | Nro Ejes Equiv. | F- Equiv. | Nro Ejes Equiv. |
| 2007 | 474,2 | 86536,3 | 3905,0 | 712663,6 | 8945,0 | 1632466,3 |
| 2008 | 488,4 | 89132,4 | 4022,2 | 734043,5 | 9213,4 | 1681440,3 |
| 2009 | 503,0 | 91806,3 | 4142,8 | 756064,8 | 9489,8 | 1731883,5 |
| 2010 | 518,1 | 94560,5 | 4267,1 | 778746,7 | 9774,5 | 1783840,0 |
| 2011 | 533,7 | 97397,3 | 4395,1 | 802109,1 | 10067,7 | 1837355,2 |
| 2012 | 549,7 | 100319,3 | 4527,0 | 826172,4 | 10369,7 | 1892475,9 |
| Total (5años)= | | 559752,1 | | 4609800,2 | | 10559461,2 |
| 2013 | 566,2 | 103328,8 | 4662,8 | 850957,6 | 10680,8 | 1949250,1 |
| 2014 | 583,2 | 106428,7 | 4802,7 | 876486,3 | 11001,2 | 2007727,6 |
| 2015 | 600,7 | 109621,6 | 4946,7 | 902780,9 | 11331,3 | 2067959,5 |
| 2016 | 618,7 | 112910,2 | 5095,1 | 929864,3 | 11671,2 | 2129998,3 |
| 2017 | 637,2 | 116297,5 | 5248,0 | 957760,3 | 12021,4 | 2193898,2 |
| Total (10 años)= | | 1108338,9 | | 9127649,6 | | 20908294,9 |
| 2018 | 656,4 | 119786,4 | 5405,4 | 986493,1 | 12382,0 | 2259715,2 |
| 2019 | 676,1 | 123380,0 | 5567,6 | 1016087,9 | 12753,5 | 2327506,6 |
| 2020 | 696,3 | 127081,4 | 5734,6 | 1046570,5 | 13136,1 | 2397331,8 |
| 2021 | 717,2 | 130893,9 | 5906,7 | 1077967,6 | 13530,1 | 2469251,8 |
| 2022 | 738,7 | 134820,7 | 6083,9 | 1110306,6 | 13936,1 | 2543329,3 |
| 2023 | 760,9 | 138865,3 | 6266,4 | 1143615,8 | 14354,1 | 2619629,2 |
| 2024 | 783,7 | 143031,3 | 6454,4 | 1177924,3 | 14784,8 | 2698218,1 |
| 2025 | 807,2 | 147322,2 | 6648,0 | 1213262,1 | 15228,3 | 2779164,6 |
| 2026 | 831,5 | 151741,9 | 6847,5 | 1249659,9 | 15685,1 | 2862539,5 |
| 2027 | 856,4 | 156294,1 | 7052,9 | 1287149,7 | 16155,7 | 2948415,7 |

| | | | | | | |
|------------------|--------|-----------|--------|------------|---------|------------|
| Total (20 años)= | | 2481556,3 | | 20436687,2 | | 46813396,7 |
| 2028 | 882,1 | 160983,0 | 7264,5 | 1325764,2 | 16640,4 | 3036868,2 |
| 2029 | 908,6 | 165812,5 | 7482,4 | 1365537,1 | 17139,6 | 3127974,3 |
| 2030 | 935,8 | 170786,8 | 7706,9 | 1406503,2 | 17653,8 | 3221813,5 |
| 2031 | 963,9 | 175910,4 | 7938,1 | 1448698,3 | 18183,4 | 3318467,9 |
| 2032 | 992,8 | 181187,7 | 8176,2 | 1492159,3 | 18728,9 | 3418021,9 |
| 2033 | 1022,6 | 186623,4 | 8421,5 | 1536924,1 | 19290,8 | 3520562,6 |
| 2034 | 1053,3 | 192222,1 | 8674,1 | 1583031,8 | 19869,5 | 3626179,5 |
| 2035 | 1084,9 | 197988,7 | 8934,4 | 1630522,7 | 20465,6 | 3734964,8 |
| 2036 | 1117,4 | 203928,4 | 9202,4 | 1679438,4 | 21079,5 | 3847013,8 |
| 2037 | 1150,9 | 210046,3 | 9478,5 | 1729821,6 | 21711,9 | 3962424,2 |
| Total (30 años)= | | 4327045,5 | | 35635088,0 | | 81627687,3 |

6.3.1.2 Estructuras planteadas para las mejoras

A continuación se presentan los diseños de la estructura de los pavimentos, para cada uno de los tramos tenidos en cuenta en el desarrollo de este trabajo:

- **Estructuras planteadas para tránsito bajo**

Tabla 23. Estructuras planteadas para tránsito bajo con periodos de 5-10 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 5 AÑOS | | | | | | PERIODO DE DISEÑO DE 10 AÑOS | | | | | |
|-----------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD BAJO | | | | | | CBR 3% -TPD BAJO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | Pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 120 | 4,7 | 0,4 | 1,88 | Asfalto | | 130 | 5,3 | 0,4 | 2,1 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,39 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,42 |
| Sub Base | 17000 | 310 | 12,36 | 0,11 | 1,36 | Sub Base | 17000 | 360 | 14,36 | 0,11 | 1,58 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 3,63 | Sub rasante | 4500 | | | SN | 4,1 |

| CBR 5% -TPD BAJO | | | | | |
|------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | Pulg | | |
| Asfalto | | 120 | 4,7 | 0,4 | 1,88 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,39 |
| Sub Base | 17000 | 190 | 7,55 | 0,11 | 0,83 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 3,1 |

| CBR 10% -TPD BAJO | | | | | |
|-------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | Pulg | | |
| Asfalto | | 120 | 4,7 | 0,4 | 1,88 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,39 |
| Sub Base | 17000 | 150 | 6 | 0,11 | 0,46 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 2,73 |

| CBR 5% -TPD BAJO | | | | | |
|------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 130 | 5,3 | 0,4 | 2,1 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,42 |
| Sub Base | 17000 | 200 | 7,82 | 0,11 | 0,86 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 3,38 |

| CBR 10% -TPD BAJO | | | | | |
|-------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 130 | 5,3 | 0,4 | 2,1 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,42 |
| Sub Base | 17000 | 150 | 6 | 0,11 | 0,5 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 3,02 |

Tabla 24. Estructuras planteadas para transito bajo con periodos de 20-30 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD BAJO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 150 | 6 | 0,4 | 2,39 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,47 |
| Sub Base | 17000 | 380 | 14,91 | 0,11 | 1,64 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 4,5 |

| PERIODO DE DISEÑO DE 30 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD BAJO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 170 | 6,6 | 0,4 | 2,61 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,5 |
| Sub Base | 17000 | 400 | 15,82 | 0,11 | 1,74 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 4,85 |

| PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| CBR 5% -TPD BAJO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 150 | 6 | 0,4 | 2,39 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,47 |
| Sub Base | 17000 | 220 | 8,55 | 0,11 | 0,94 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 3,8 |

| PERIODO DE DISEÑO DE 30 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| CBR 5% -TPD BAJO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 170 | 6,6 | 0,4 | 2,61 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,5 |
| Sub Base | 17000 | 230 | 9,18 | 0,11 | 1,01 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 4,12 |

| CBR 10% -TPD BAJO | | | | | | CBR 10% -TPD BAJO | | | | | |
|-------------------|----------|---------|------|-----------|------|-------------------|----------|---------|------|-----------|------|
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 130 | 5,3 | 0,4 | 2,1 | Asfalto | | 170 | 6,6 | 0,4 | 2,61 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,42 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,5 |
| Sub Base | 17000 | 210 | 8,27 | 0,11 | 0,91 | Sub Base | 17000 | 150 | 6 | 0,11 | 0,61 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 3,43 | Sub rasante | 10202 | | | SN | 3,72 |

- Estructuras planteadas para tránsito medio

Tabla 25. Estructuras planteadas para tránsito medio con periodos de 5-10 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 5 AÑOS | | | | | | PERIODO DE DISEÑO DE 10 AÑOS | | | | | |
|-----------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 3% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 170 | 6,7 | 0,4 | 2,65 | Asfalto | | 190 | 7,4 | 0,4 | 2,94 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,49 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,55 |
| Sub Base | 17000 | 390 | 15,36 | 0,11 | 1,69 | Sub Base | 17000 | 420 | 16,45 | 0,11 | 1,81 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 4,83 | Sub rasante | 4500 | | | SN | 5,3 |
| CBR 5% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 5% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 170 | 6,7 | 0,4 | 2,65 | Asfalto | | 190 | 7,4 | 0,4 | 2,94 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,49 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,55 |
| Sub Base | 17000 | 230 | 8,91 | 0,11 | 0,98 | Sub Base | 17000 | 240 | 9,27 | 0,11 | 1,02 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 4,12 | Sub rasante | 7500 | | | SN | 4,51 |
| CBR 10% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 10% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 170 | 6,7 | 0,4 | 2,65 | Asfalto | | 190 | 7,4 | 0,4 | 2,94 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,49 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,55 |
| Sub Base | 17000 | 150 | 6 | 0,11 | 0,58 | Sub Base | 17000 | 150 | 6 | 0,11 | 0,61 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 3,72 | Sub rasante | 10202 | | | SN | 4,1 |

Tabla 26. Estructuras planteadas para tránsito medio con periodos de 20-30 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS | | | | | | PERIODO DE DISEÑO DE 30 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 3% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 210 | 8,3 | 0,4 | 3,29 | Asfalto | | 230 | 9 | 0,4 | 3,57 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,61 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,63 |
| Sub Base | 17000 | 450 | 17,64 | 0,11 | 1,94 | Sub Base | 17000 | 470 | 18,64 | 0,11 | 2,05 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 5,84 | Sub rasante | 4500 | | | SN | 6,25 |
| CBR 5% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 5% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 210 | 8,3 | 0,4 | 3,29 | Asfalto | | 230 | 9 | 0,4 | 3,57 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,61 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,63 |
| Sub Base | 17000 | 280 | 10,91 | 0,11 | 1,2 | Sub Base | 17000 | 270 | 10,82 | 0,11 | 1,19 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 5,1 | Sub rasante | 7500 | | | SN | 5,39 |
| CBR 10% -TPD MEDIO | | | | | | CBR 10% -TPD MEDIO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 210 | 8,3 | 0,4 | 3,29 | Asfalto | | 230 | 9 | 0,4 | 3,57 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,61 | Base Granular | 28000 | 150 | 6 | 0,13 | 0,63 |
| Sub Base | 17000 | 150 | 6,09 | 0,11 | 0,67 | Sub Base | 17000 | 170 | 6,55 | 0,11 | 0,72 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 4,57 | Sub rasante | 10202 | | | SN | 4,92 |

- Estructuras planteadas para transito alto

Tabla 27. Estructuras planteadas para transito alto con periodos de 5-10 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 5 AÑOS | | | | | | PERIODO DE DISEÑO DE 10 AÑOS | | | | | |
|-----------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD ALTO | | | | | | CBR 3% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 190 | 7,50 | 0,4 | 2,99 | Asfalto | | 210 | 8,30 | 0,4 | 3,32 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,57 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,61 |
| Sub Base | 17000 | 440 | 17,27 | 0,11 | 1,9 | Sub Base | 17000 | 470 | 18,45 | 0,11 | 2,03 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 5,46 | Sub rasante | 4500 | | | SN | 5,96 |
| CBR 5% -TPD ALTO | | | | | | CBR 5% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 190 | 7,50 | 0,4 | 2,99 | Asfalto | | 210 | 8,30 | 0,4 | 3,32 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,57 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,61 |
| Sub Base | 17000 | 250 | 10,00 | 0,11 | 1,1 | Sub Base | 17000 | 270 | 10,82 | 0,11 | 1,19 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 4,66 | Sub rasante | 7500 | | | SN | 5,12 |
| CBR 10% -TPD ALTO | | | | | | CBR 10% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 190 | 7,50 | 0,4 | 2,99 | Asfalto | | 210 | 8,30 | 0,4 | 3,32 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,57 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,61 |
| Sub Base | 17000 | 150 | 6,00 | 0,11 | 0,66 | Sub Base | 17000 | 160 | 6,45 | 0,11 | 0,71 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 4,22 | Sub rasante | 10202 | | | SN | 4,64 |

Tabla 28. Estructuras planteadas para tránsito alto con periodos de 20-30 años

| PERIODO DE DISEÑO DE 20 AÑOS | | | | | | PERIODO DE DISEÑO DE 30 AÑOS | | | | | |
|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|------------------------------|----------|---------|-------|-----------|------|
| CBR 3% -TPD ALTO | | | | | | CBR 3% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 240 | 9,40 | 0,4 | 3,74 | Asfalto | | 260 | 10,10 | 0,4 | 4,04 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,66 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,72 |
| Sub Base | 17000 | 510 | 20,00 | 0,11 | 2,2 | Sub Base | 17000 | 540 | 21,27 | 0,11 | 2,34 |
| Sub rasante | 4500 | | | SN | 6,6 | Sub rasante | 4500 | | | SN | 7,1 |
| CBR 5% -TPD ALTO | | | | | | CBR 5% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 240 | 9,40 | 0,4 | 3,74 | Asfalto | | 260 | 10,10 | 0,4 | 4,04 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,66 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,72 |
| Sub Base | 17000 | 300 | 11,64 | 0,11 | 1,28 | Sub Base | 17000 | 310 | 12,18 | 0,11 | 1,34 |
| Sub rasante | 7500 | | | SN | 5,68 | Sub rasante | 7500 | | | SN | 6,1 |
| CBR 10% -TPD ALTO | | | | | | CBR 10% -TPD ALTO | | | | | |
| Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN | Material | Mr (PSI) | ESPESOR | | Coef. | SN |
| | | mm | pulg | | | | | mm | pulg | | |
| Asfalto | | 240 | 9,40 | 0,4 | 3,74 | Asfalto | | 260 | 10,10 | 0,4 | 4,04 |
| Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,66 | Base Granular | 28000 | 150 | 6,00 | 0,13 | 0,72 |
| Sub Base | 17000 | 180 | 7,09 | 0,11 | 0,78 | Sub Base | 17000 | 190 | 7,36 | 0,11 | 0,81 |
| Sub rasante | 10202 | | | SN | 5,18 | Sub rasante | 10202 | | | SN | 5,57 |

6.3.1.3 Costos directos para las estructuras de pavimento planteadas

Los costos tomados para cada una de las estructuras fueron referenciados de cotizaciones realizadas y por medio del ministerio de vías mediante el portal único de contratación, en el cual se presentan diferentes APU de construcción vial realizada en diferentes partes del país y actualizada en el 2008.

El precio por kilometro es obtenido con los materiales de base granular, Subbase y mezcla densa en caliente, para cada opción de construcción.

A continuación se muestra el costo por kilometro de cada tramo.

El precio obtenido es el costo financiero, para llevarlo a costo económico se multiplica por 0.8 que se corresponde al factor de conversión para Colombia.

Fuente: "IMPACTO DE LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN PROGRAMAS COMO EL PLAN 2500", pág78.

- **Costos los materiales**

Tabla 29. Costos de construcción del pavimento

| | |
|-----------------------|---------------|
| MEZCLA MDC-2 (M3) | \$ 441.226.00 |
| BASE GRANULAR (M3) | \$ 96.504 .00 |
| SUBBASE GRANULAR (M3) | \$ 88.379.00 |

- **Costos de los pavimentos para tráfico bajo**

Tabla 30. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD bajo

| CBR 3% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 386.513.976 | \$ 309.211.180,80 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 200.001.677 | \$ 160.001.341,60 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 692.187,53 | \$ 553.750,03 |

| CBR 5% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 386.513.976 | \$ 309.211.181 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 122.581.673 | \$ 98.065.338 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 614.767,53 | \$ 491.814,02 |
| CBR 10% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 386.513.976 | \$ 309.211.181 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 588.960,86 | \$ 471.168,69 |

Tabla 31. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD bajo

| CBR 3% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 418.723.474 | \$ 334.978.779,20 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 232.260.012 | \$ 185.808.009,60 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 756.655,37 | \$ 605.324,29 |
| CBR 5% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 418.723.474 | \$ 334.978.779 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 129.033.340 | \$ 103.226.672 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 653.428,69 | \$ 522.742,96 |

| CBR 10% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 418.723.474 | \$ 334.978.779 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 621.170,36 | \$ 496.936,29 |

Tabla 32. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD bajo

| CBR 3% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 483.142.470 | \$ 386.513.976,00 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 245.163.346 | \$ 196.130.676,80 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos= | \$ 833.977,70 | \$ 667.182,16 |
| CBR 5% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 483.142.470 | \$ 386.513.976 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 141.936.674 | \$ 113.549.339 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 730.751,02 | \$ 584.600,82 |
| CBR 10% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 418.723.474 | \$ 334.978.779 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 135.485.007 | \$ 108.388.006 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 659.880,36 | \$ 527.904,29 |

Tabla 33. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD bajo

| CBR 3% -TPD BAJO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.172,80 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 258.066.680 | \$ 206.453.344,00 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 911.300,03 | \$ 729.040,02 |
| CBR 5% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.173 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 148.388.341 | \$ 118.710.673 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 801.621,69 | \$ 641.297,35 |
| CBR 10% -TPD BAJO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.173 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 750.008,35 | \$ 600.006,68 |

- **Costos de los pavimentos para tráfico medio**

Tabla 34. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD medio

| CBR 3% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.172,80 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 251.615.013 | \$ 201.292.010,40 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 904.848,36 | \$ 723.878,69 |

| CBR 5% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.173 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 148.388.341 | \$ 118.710.673 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 801.621,69 | \$ 641.297,35 |
| CBR 10% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 547.561.466 | \$ 438.049.173 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 750.008,35 | \$ 600.006,68 |

Tabla 35. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD medio

| CBR 3% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.369,60 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 270.970.014 | \$ 216.776.011,20 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 988.622,36 | \$ 790.897,88 |
| CBR 5% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.370 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 154.840.008 | \$ 123.872.006 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 872.492,35 | \$ 697.993,88 |

| CBR 10% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.370 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 814.427,35 | \$ 651.541,88 |

Tabla 36. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD medio

| CBR 3% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566,40 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 290.325.015 | \$ 232.260.012,00 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.072.396,35 | \$ 857.917,08 |
| CBR 5% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 180.646.676 | \$ 144.517.341 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 962.718,01 | \$ 770.174,41 |
| CBR 10% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 878.846,34 | \$ 703.077,07 |

Tabla 37. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD medio

| CBR 3% -TPD MEDIO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 740.818.454 | \$ 592.654.763,20 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 303.228.349 | \$ 242.582.679,20 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.149.718,68 | \$ 919.774,95 |
| CBR 5% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 740.818.454 | \$ 592.654.763 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 174.195.009 | \$ 139.356.007 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.020.685,34 | \$ 816.548,27 |
| CBR 10% -TPD MEDIO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 740.818.454 | \$ 592.654.763 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 109.678.339 | \$ 87.742.671 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 956.168,67 | \$ 764.934,94 |

- **Costos de los pavimentos para tráfico alto**

Tabla 38. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 5 años con TPD alto.

| CBR 3% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.369,60 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 283.873.348 | \$ 227.098.678,40 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.001.525,69 | \$ 801.220,55 |

| CBR 5% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.370 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 161.291.675 | \$ 129.033.340 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 878.944,02 | \$ 703.155,21 |
| CBR 10% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 611.980.462 | \$ 489.584.370 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 96.775.005 | \$ 77.420.004 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 814.427,35 | \$ 651.541,88 |

Tabla 39. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 10 años con TPD alto.

| CBR 3% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566,40 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 303.228.349 | \$ 242.582.679,20 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.085.299,69 | \$ 868.239,75 |
| CBR 5% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 174.195.009 | \$ 139.356.007 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 956.266,35 | \$ 765.013,08 |

| CBR 10% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 676.399.458 | \$ 541.119.566 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 103.226.672 | \$ 82.581.338 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 885.298,01 | \$ 708.238,41 |

Tabla 40. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 20 años con TPD alto.

| CBR 3% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 773.027.952 | \$ 618.422.361,60 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 329.035.017 | \$ 263.228.013,60 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.207.734,85 | \$ 966.187,88 |
| CBR 5% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 773.027.952 | \$ 618.422.362 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 193.550.010 | \$ 154.840.008 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.072.249,84 | \$ 857.799,87 |
| CBR 10% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 773.027.952 | \$ 618.422.362 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 116.130.006 | \$ 92.904.005 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 994.829,84 | \$ 795.863,87 |

Tabla 41. Costos de construcción del pavimento para periodo de diseño de 30 años con TPD alto.

| CBR 3% -TPD ALTO | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 837.446.948 | \$ 669.957.558,40 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 348.390.018 | \$ 278.712.014,40 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.291.508,85 | \$ 1.033.207,08 |
| CBR 5% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 837.446.948 | \$ 669.957.558 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 200.001.677 | \$ 160.001.342 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.143.120,51 | \$ 914.496,40 |
| CBR 10% -TPD ALTO | | |
| | COSTO FINANCIERO | COSTO ECONOMICO |
| DE LA MEZCLA MDC-2 (Km) | \$ 837.446.948 | \$ 669.957.558 |
| BASE GRANULAR (Km) | \$ 105.671.880 | \$ 84.537.504 |
| SUBBASE GRANULAR (Km) | \$ 122.581.673 | \$ 98.065.338 |
| COSTO TOTAL (Miles de pesos) | \$ 1.065.700,50 | \$ 852.560,40 |

Luego de haber definido el precio por kilometro, se procede a llenar las características de dicha mejora.

En esta ventana se llenan los datos de cómo se encuentra el tramo de carretera y qué tipo de mejora se va a realizar, para nuestro caso, de Aumento (Upgrading), además de seleccionar la casilla de intervención programada.

Figura 21. Composición Actual del Suelo sin mejora

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Nombre: Pavimento 7
Código: 00700
Tipo de entidad: Calzada
Tipo capa de rodadura: Sin pavimentar
Tipo de mejora: Upgrading
Duración: 1 años
Tipo de Intervención: Programada
 Correctiva

Aceptar Cancelar

Nombre de este estándar de mejora

Para el diseño se establece una construcción de manera tradicional, pavimento con mezcla bituminosa sobre base granular, con su respectivo tipo de tráfico y de carretera, propio del análisis.

Figura 22. Diseño propuesto como mejora

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Nuevos atributos:

Tipo de tráfico: Dos carriles estándar
Tipo de carretera: Primaria - Alto
Nuevo tipo de pavimento: Mezcla bituminosa sobre base granular
Factor ajuste de longitud: 1
Incremento en anchura: 0 m
Número carriles adicional: 0
Proporción nueva construcción: 0.5 $0 < P_{conue} < 1$

Aceptar Cancelar

El número adicional de carriles del tramo después de la mejora

Ahora se define el año en el que se desea que empiece la mejora, y un límite terminación del método de la obra.

Figura 23. Duración del proceso constructivo

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Programación
Empezar en año: 2009

Límites
Último año aplicable: 2009

Aceptar Cancelar

Ultimo año para el que se debe considerar la implementación del estándar

Los costos se ponen en miles de pesos colombianos, pues fue configurado de esta forma.

Figura 24. Costos totales de construcción

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Económico Financiero
Coste unitario: 801221 1,00153e+00 por km

Coste anual: tráfico 100 0 0 0 0 %

Valor residual: 0 %

Costes unitarios de los trabajos preparatorio:
Económico Financiero
Renov. superficial carretera existente: 0 0 por m²
Bacheo: 0 0 por m²
Rep. de bordes: 0 0 por m²
Sellado de fisuras: 0 0 por m²

Aceptar Cancelar

Valor residual, en % del valor total

Se planteo el siguiente tipo de pavimento y sus características estructurales como el número estructural y el espesor de la capa de rodadura.

Figura 25. Tipo de mezcla asfáltica utilizada

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Material capa rodadura: Mezcla bituminosa en caliente

Número estructural estación seca: 5,46

Espesor de capa rodadura: 190 mm

Compactación relativa: 97 %

Base (sólo para base estabilizada)

Espesor base: 25 mm

Módulo Resiliente: 15 GPa

Aceptar Cancelar

Compactación relativa media del firme

Los factores de reducción de la velocidad fueron tomados por defecto del programa.

Figura 26. Características geométricas

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Clase geometría: Seleccionar una clase de geometría para obtener los valores geométri

Detalles

Rampa + pendiente: 50 m/km

Nº rampas + pendientes: 4 n°/km

Curvatura horizontal media: 300 m/km

Peralte: 7 %

adral: 0,1 m/s²

Límite de velocidad: 90 km/h

Cumplimiento de vel. límite: 1,1

Factores de reducción de velocidad

XTNM: 1 0.4 <= XTNM <= 1

XTM: 1 0.4 <= XTM <= 1

Fricción lateral: 1 0.4 <= XFRI <= 1

Aceptar Cancelar

Relación entre la velocidad media y el límite legal de velocidad (valor típico 1,1 - los usuarios superan el límite)

Por último se selecciona el IRI que se desea obtener con esta mejora. Para un buen estado, es decir en un estado sin uso de la capa de rodadura, este valor debe ser de 2 m/km.

Figura 27. Índice de regularidad (IRI) inicial

Estándar de mejora: Pavimento 7

General | Diseño | Intervención | Costes | Pavimento | Geometría | Efectos

Estado después de las actuaciones:

Modelo de tráfico: Interurbano Editar calibración detallada...

Regularidad y rodera definida por usuario

Regularidad: 2 IRI (m/km)

Profundidad media de rodada: 0 mm

Caract. superficiales definidas por usuario

Resistencia de deslizamiento: 0.55 SCRIM (at 50km/h)

Textura superficial: 0.7 mm

Aceptar Cancelar

Profundidad media de roderas en ambas roderas medida con regla de 2 m

6.3.2 Alternativas de conservación

A continuación se procede a la evaluación de las alternativas de conservación que se estudiarán en el proyecto. Se hará una definición de las acciones de conservación que integran alternativas planteadas.

La valoración de los costos unitarios para cada una de las actividades estipuladas en las posibles estrategias planteadas, se hará con base en condiciones de precios unitarios adecuadas a las condiciones específicas del proyecto; para la cuantificación se hizo la estimación de precios unitarios totales basados en APU suministrados por algunas empresas encargadas de hacer mantenimiento vial en Santander, tal como ESGAMO S.A y la UNION TEMPORAL DE MANTENIMIENTO 2005 y en el portal en internet de INVIAS, por medio del portal único de contratación.

6.3.2.1 Formulación de la Alternativas con las siguientes actividades de conservación

Las alternativas de mantenimiento se diferencian entre sí en la forma de intervenir el pavimento, la primera referencia el mantenimiento rutinario de

manera correctiva, es decir, es propuesto para ciertos parámetros de afectación como lo es el porcentaje de área dañada y la cantidad de grietas presentes en la capa de rodadura; la segunda considera el mantenimiento rutinario de manera programada, en la cual se le asigna estas actividades de conservación en un lapso de tiempo, para este caso se realizara cada 2 años. Estas tareas son las más comúnmente ejecutadas como mantenimiento de rutina de los pavimentos asfálticos.

Enseguida se mencionaran cada una de las actividades realizadas en cada una de las alternativas de mantenimiento propuestas.

Figura 28. Actividades propuestas en el mantenimiento rutinario.



- **Sellado de grietas**

El HDM-4 incluye una tarea que es el equivalente al sellado de grietas, a la cual denomina "crack sealing". Los parámetros en la definición de la alternativa base se exponen a continuación en las tablas propuestas:

Tabla 42. Mantenimiento Rutinario Correctivo

| CARACTERISTICAS | ALTERNATIVA TRAFICO BAJO | ALTERNATIVA TRAFICO MEDIO | ALTERNATIVA TRAFICO ALTO |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Tipo de Intervención: | Correctiva | Correctiva | Correctiva |
| Grietas estructurales a lo ancho (%) | $\geq 10\%$ del área del pavimento | $\geq 10\%$ del área del pavimento | $\geq 10\%$ del área del pavimento |
| Regularidad máxima: | 16 IRI | 16 IRI | 16 IRI |

Figura 29. Sello de fisuras correctivo.

Elemento de trabajo de conservación: Sello de Fisuras

General | Intervención | Costes | Efectos

Nombre: Sello de Fisuras
 Código: S-F
 Capa de rodadura: Bituminosa
 Tipo de entidad: Calzada
 Actuación: Crack Sealing
 Tipo de intervención: Programada Correctiva

Aceptar Cancelar Aplicar

Usar criterios de intervención correctiva

Para las grietas estructurales a lo ancho, la reparación se debe aplicar cuando el agrietamiento estructural alcance el 10% del área del pavimento.

Figura 30. Tipo de intervención planteada en el Sello de fisuras.

Elemento de trabajo de conservación: Sello de Fisuras

General | Intervención | Costes | Efectos

Criterio correctivo

Wide Structural Cracking >= 10 %

Nuevo criterio...
Borrar
Editar...

Límites

Último año: 2099 Mínimo Máximo
Regularidad max: 16 IRI (m/km) Intervalo: 9999 año(s)
Max. cantidad: 5000 m²/km/año IMD: 0 100000

Aceptar Cancelar Aplicar

Añadir un criterio de intervención al estándar de mejora

Tabla 43. Mantenimiento Rutinario Programado

| CARACTERISTICAS | ALTERNATIVA TRAFICO BAJO | ALTERNATIVA TRAFICO MEDIO | ALTERNATIVA TRAFICO ALTO |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Tipo de Intervención: | Programada | Programada | Programada |
| Clase de intervención | Sello de fisuras | Sello de fisuras | Sello de fisuras |
| Tiempo de Intervención | Cada 2 años | Cada 2 años | Cada 1 años |

Figura 31. Sello de fisuras programado.

Elemento de trabajo de conservación: Sello de Fisuras

General | Intervención | Costes | Efectos

Nombre: Sello de Fisuras
Código: S-F
Capa de rodadura: Bituminosa
Tipo de entidad: Calzada
Actuación: Crack Sealing
Tipo de intervención: Programada Correctiva

Aceptar Cancelar Aplicar

Usar criterios de intervención programados

Para la intervención del sellado de fisuras se realizará cada año de acuerdo a lo planteado en la alternativa de tráfico alto.

Figura 32 Intervalo de tiempo estimado para la aplicación.

En referencia a los costos económicos tenemos:

Tabla 44. Costos correspondientes al sello de fisuras

| ACTIVIDAD | UND | COSTO UNITARIO ECONÓMICO | COSTO UNITARIO FINANCIERO |
|------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Sello de fisuras | m ² | \$ 2.080 | \$ 2.600 |

Figura 33. Costos unitarios del sellado de grietas

Se considera una reparación total de la fisuración tanto térmica como estructural.

Figura 34. Porcentaje de daño a reparar



- **Bacheo**

El HDM-4 incluye una tarea equivalente al bacheo, la cual se denomina "Patching". Para el caso analizado, los parámetros de esta tarea se definieron como sigue:

Tabla 45. Bacheo para mantenimiento rutinario correctivo

| CARACTERISTICAS | ALTERNATIVA TRAFICO BAJO | ALTERNATIVA TRAFICO MEDIO | ALTERNATIVA TRAFICO ALTO |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Tipo de Intervención: | Correctiva | Correctiva | Correctiva |
| Intervención de Baches | 100 por Km | 40 por Km | 40 por Km |
| Regularidad máxima: | 16 IRI | 16 IRI | 16 IRI |

Figura 35. Tipo de intervención para el bacheo tipo I

The screenshot shows a dialog box titled "Elemento de trabajo de conservación: Bacheo" with a close button (X) in the top right corner. It has four tabs: "General", "Intervención", "Costes", and "Efectos". The "Intervención" tab is active. The form contains the following fields and options:

- Nombre: Bacheo
- Código: B-1
- Capa de rodadura: Bituminosa
- Tipo de entidad: Calzada
- Actuación: Patching
- Tipo de intervención: Programada, Correctiva

At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar". A status bar at the very bottom reads "Usar criterios de intervención correctiva".

La intervención se llevara a cabo cuando el número de baches sea mayor o igual a cuarenta por kilómetro en el tramo de la alternativa para tráfico alto.

Figura 36. Criterio aplicado para la realización del bacheo

The screenshot shows the same dialog box as Figure 35, but with the "Intervención" tab showing correction criteria. The "Criterio correctivo" section contains a text box with the text "Potholing >= 40 no./km". To the right of this text box are three buttons: "Nuevo criterio...", "Borrar", and "Editar...".

Below the criteria section is the "Límites" section, which includes the following fields:

- Último año: 2099
- Regularidad max: 16
- Max. cantidad: 5000
- IRI (m/km)
- Intervalo: [empty]
- IMD: 0
- Mínimo: [empty]
- Máximo: 9999
- añó(s)
- Unit: m²/km/año (selected in a dropdown menu)

At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar". A status bar at the very bottom reads "Valor de regularidad máxima aplicable, por encima del cual la operación no se realizará".

Tabla 46. Bacheo para mantenimiento rutinario programado

| CARACTERISTICAS | ALTERNATIVA TRAFICO BAJO | ALTERNATIVA TRAFICO MEDIO | ALTERNATIVA TRAFICO ALTO |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Tipo de Intervención: | Programada | Programada | Programada |
| Clase de Intervención | Bacheo | Bacheo | Bacheo |
| Tiempo de Intervención | Cada 2 años | Cada 2 años | Cada 1 años |

Figura 37. Tipo de intervención para el bacheo tipo II

Elemento de trabajo de conservación: Bacheo

General | Intervención | Costes | Efectos

Nombre: Bacheo
 Código: B-1
 Capa de rodadura: Bituminosa
 Tipo de entidad: Calzada
 Actuación: Patching
 Tipo de intervención: Programada Correctiva

Aceptar Cancelar Aplicar

Usar criterios de intervención programados

El intervalo de tiempo en el cual se presentara la actuación del bacheo será cada año, esto corresponde a la alternativa planteada para el tráfico alto.

Figura 38. Intervalo de tiempo estimado para la aplicación de esta actividad

Elemento de trabajo de conservación: Bacheo

General | Intervención | Costes | Efectos

Criterio de intervención:
 Intervalo de tiempo: 1 Años

Límites:
 Último año: 2099
 Regularidad max.: 16 IRI (m/km) Intervalo: 1 Máximo: 9999 año(s)
 Cantidad max.: 5000 m²/km/año IMD: 0 Máximo: 100000

Aceptar Cancelar Aplicar

IMD mínima

Tabla 47. Costos unitarios del bacheo

| ACTIVIDAD | UND | COSTO UNITARIO ECONÓMICO | COSTO UNITARIO FINANCIERO |
|-----------|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Bacheo | m ² | \$ 34,400.00 | \$ 43,000.00 |

Figura 39. Costos asignados para esta actividad

The screenshot shows a software dialog box titled "Elemento de trabajo de conservación: Bacheo" with a "Costes" tab selected. The dialog is divided into sections for "Económico" and "Financiero" costs. The "Coste unitario" is set to 34.4 for the economic cost and 43 for the financial cost, with a unit of "por m²". Below this, there are fields for "Costes unitarios de trabajos preparatorios" including "Recargo puntual", "Bacheo", "Repar. de bordes", and "Sellado de fisuras", all currently set to 0. A "Drenaje" section includes a "Factor coste mantenimiento drenaje" set to 1. At the bottom, there are "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar" buttons, and a status bar indicating "Coste financiero unitario de los trabajos".

En cuanto a los efectos del bacheo se espera con la tarea reparar totalmente el daño sobre la estructura.

Figura 40. Porcentaje de daño y tipo intervención a considerar

The screenshot shows the same dialog box but with the "Efectos" tab selected. It displays "Porcentaje de daño reparado" with four radio button options, each with a value of 100%: "Area muy dañada", "Sólo baches" (which is selected), "Sólo fisuras estructurales anchas", and "Sólo desprend. de áridos". At the bottom, there are "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar" buttons, and a status bar indicating "Reparar los baches solamente".

- **Limpieza**

El HDM-4 incluye una tarea equivalente a la limpieza, la cual se denomina “Misceláneos”. Para el caso analizado, los parámetros de esta tarea se definieron como sigue:

Figura 41. Tipo de Intervención asignada a la limpieza

Elemento de trabajo de conservación: Limpieza

General | **Intervención** | Costes

Nombre: Limpieza
 Código: LP
 Capa de rodadura: Bituminosa
 Tipo de entidad: Arcenes
 Actuación: Shoulder repair
 Tipo de intervención: Programada
 Correctiva

Aceptar Cancelar Aplicar

Usar criterios de intervención programados

- Intervención: Se aplicara cada año, constituye acciones como el control de vegetación, señalización, etc.; además no se consideran límites de tiempo en este caso.

Figura 42. Intervalo de tiempo estimado para la aplicación de la actividad de limpieza

Elemento de trabajo de conservación: Limpieza

General | **Intervención** | Costes

Criterio de intervención
 Intervalo de tiempo: 1 Años

Límites
 Último año: 2099
 Regularidad max: 15 IRI (m/km)
 Cantidad max: 5000 m²/km/año
 Intervalo: 1 Mínimo Máximo
 IMD: 0 9999 año(s) 100000

Aceptar Cancelar Aplicar

Intervalo mínimo aplicable, por debajo del cual la operación no se realizará

Tabla 48. Costos asignados a la limpieza cada año.

| ACTIVIDAD | UND | COSTO UNITARIO ECONÓMICO | COSTO UNITARIO FINANCIERO |
|-----------|--------|-----------------------------|------------------------------|
| Limpieza | km-año | \$ 3.608.000 | \$ 4.600.000 |

Figura 43. Costos unitarios para la limpieza

6.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

6.4.1 Definición del proyecto

Los detalles de proyecto son sostenidos bajo cuatro Etiquetas:

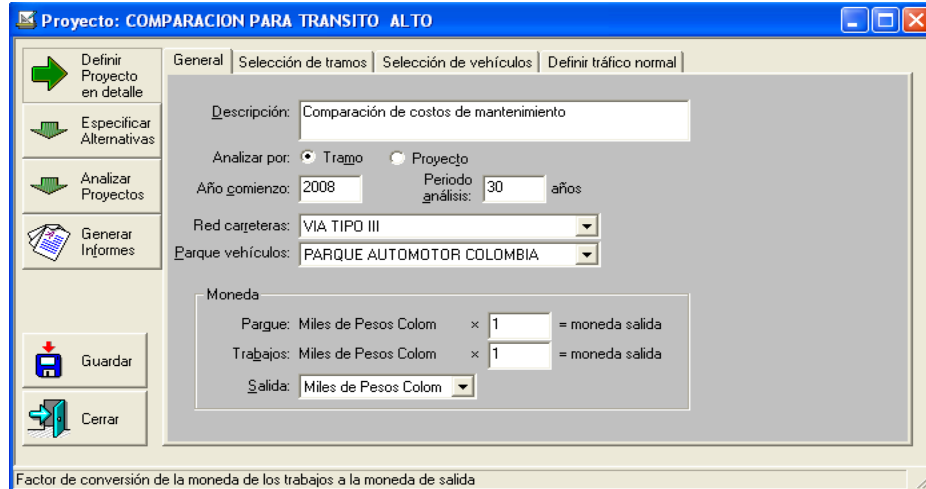
General/Selección de tramos/Selección de vehículos/Definir tráfico normal.

- **General**

Como primera instancia en la evaluación de las alternativas se realiza la descripción de las principales características que contiene el proyecto, como lo son el nombre, tipo de análisis, el período de análisis, la red de carreteras predefinida y parque de vehículos. Otro parámetro definido por el

usuario es el tipo de moneda que se va a trabajar en el estudio, en este caso los resultados económicos generados en el modelos HDM-4 serán en miles de pesos colombianos.

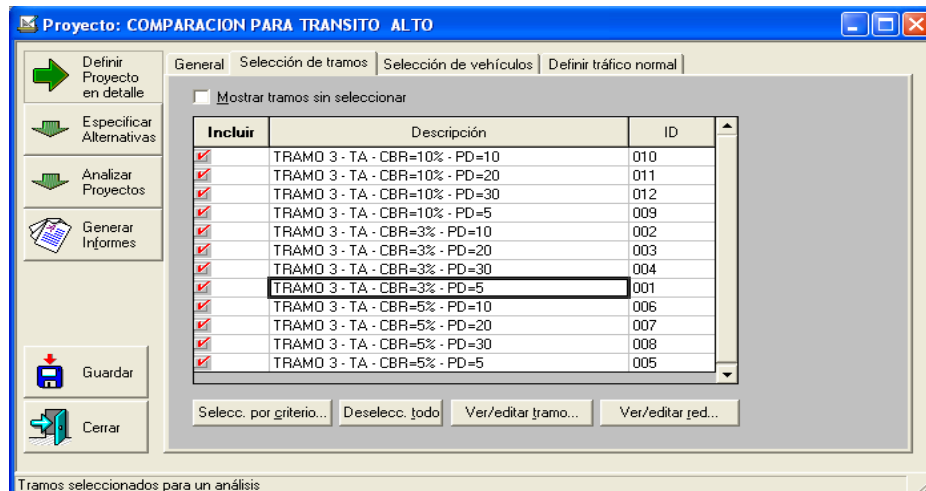
Figura 44. Definición proyecto.



- **Selección de tramos**

Los tramos tenidos en cuenta en la evaluación de este proyecto son 12 los cuales corresponden a las diferentes combinaciones de tipo de suelo y el período de diseño.

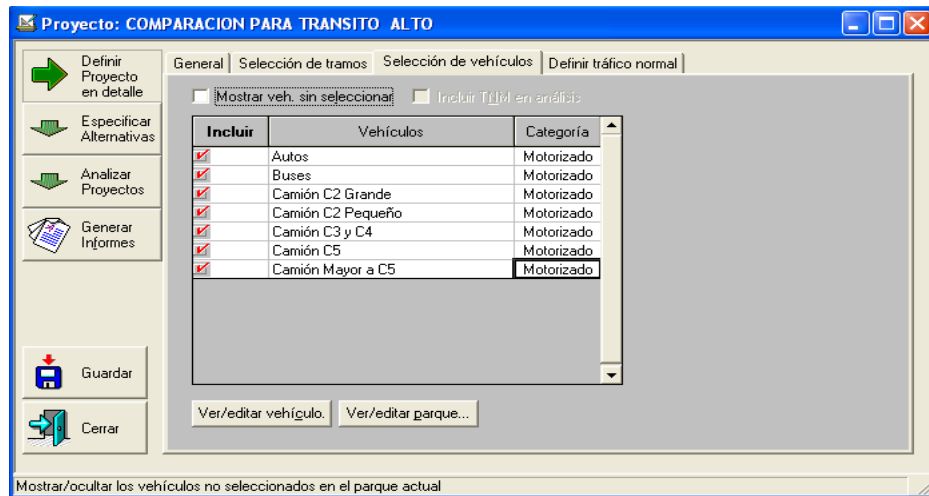
Figura 45. Selección de tramos



- **Selección de vehículos**

En esta pestaña se escogen los tipos de vehículo que son asignados a los diferentes tramos para el análisis.

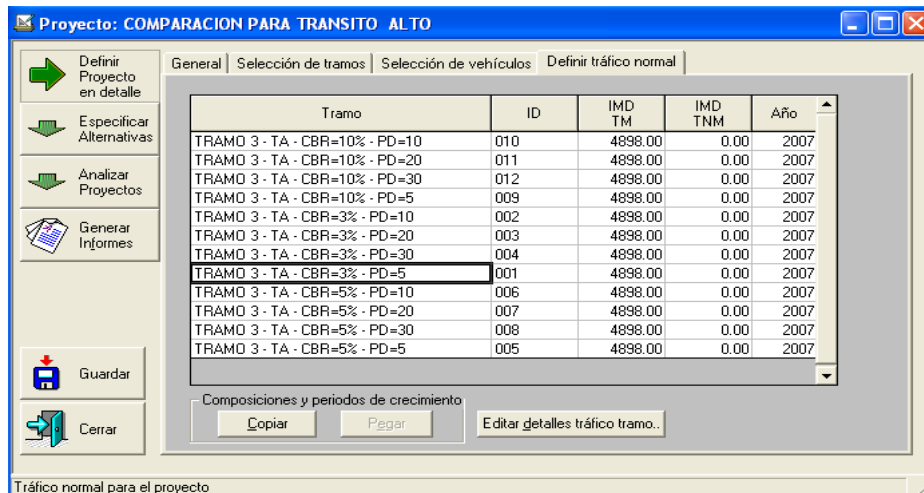
Figura 46. Selección de vehículos



- **Definir tráfico normal**

En este parámetro se realiza la definición de los datos de tráfico de acuerdo a su composición e índices de crecimiento.

Figura 47. Definición de tramos a analizar



- **Composición del tráfico**

De acuerdo a los datos suministrados por el INVIAS la composición y porcentaje de crecimiento del tráfico promedio diario para este tipo de carretera son:

Figura 48. Detalle del tráfico normal

The screenshot shows a software window titled "Detalles del tráfico normal" with a "Motorizado" tab. It contains a form for "Detalles del tramo" with fields for "Nombre" (TRAMO 3 - TA - CBR=3% - PD=5), "IMD" (4898), and "Año" (2007). Below is a table for "Periodos de crecimiento" with columns for "Vehículos", "Composición Inicial (%)", and "% Crec. anual a partir de 2008". The table lists various vehicle types and their respective percentages. To the right of the table are buttons for "Añadir periodo", "Borrar periodo", and "Editar periodo...". At the bottom of the window are "Aceptar" and "Cancelar" buttons.

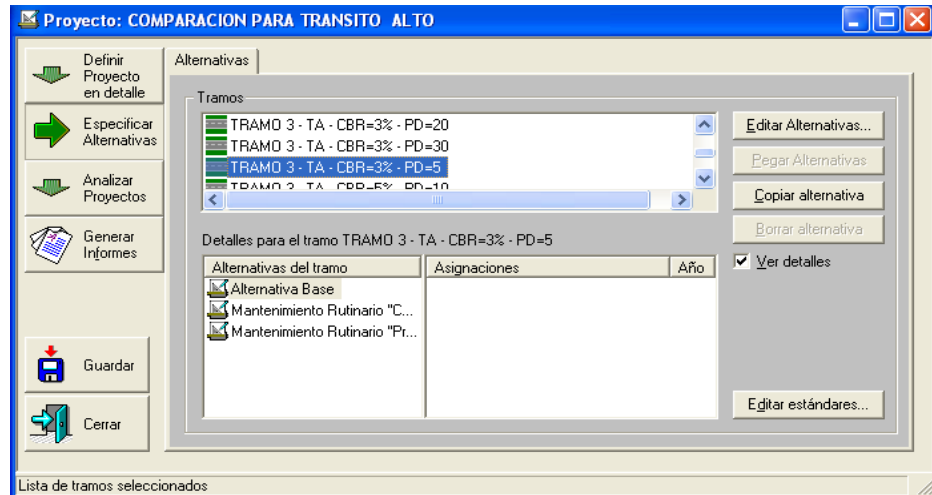
| Vehículos | Composición Inicial (%) | % Crec. anual a partir de 2008 |
|-------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Buses | 12.00 | 3.00 |
| Camión C2 Pequeño | 11.57 | 3.00 |
| Camión C2 Grande | 14.59 | 3.00 |
| Camión C3 y C4 | 8.28 | 3.00 |
| Camión C5 | 4.67 | 3.00 |
| Camión Mayor a C5 | 16.89 | 3.00 |
| Autos | 32.00 | 3.00 |

6.4.2 Especificación de alternativas

- **Alternativas**

Las alternativas previamente definidas en este estudio son mostradas a continuación, esto se realiza con el fin de hacer la comparación beneficio costo entre ellas.

Figura 49. Definición de alternativas



6.4.3 Análisis del proyecto

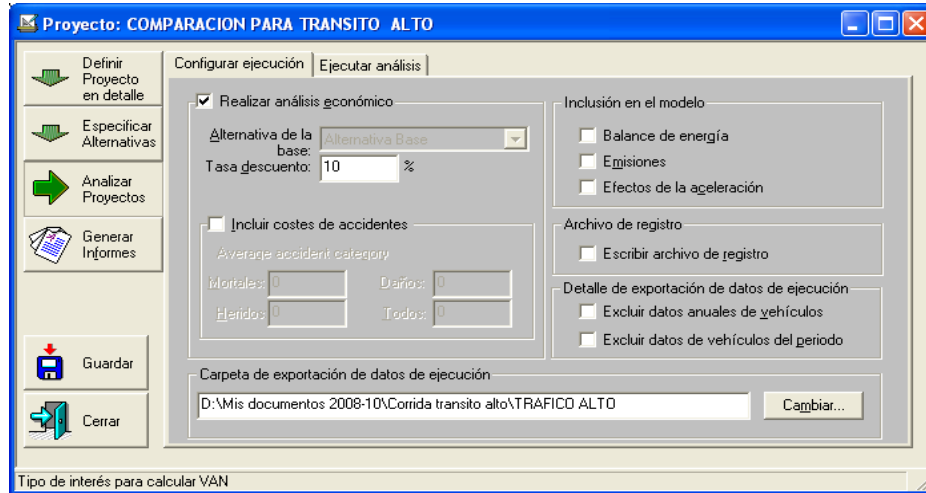
En el análisis del proyecto los datos se configuran en dos Etiquetas:

Configurar ejecución/Ejecutar análisis.

- Configuración ejecución

En esta pantalla se confirma la alternativa del análisis económico tomando una tasa de descuento igual al diez por ciento (10%), ajuste realizado para cualquier cambio económico que se produzca en el proyecto. Para este caso, los gastos de accidente, las emisiones, balance de energía y efectos de aceleración no son incluidos en el estudio.

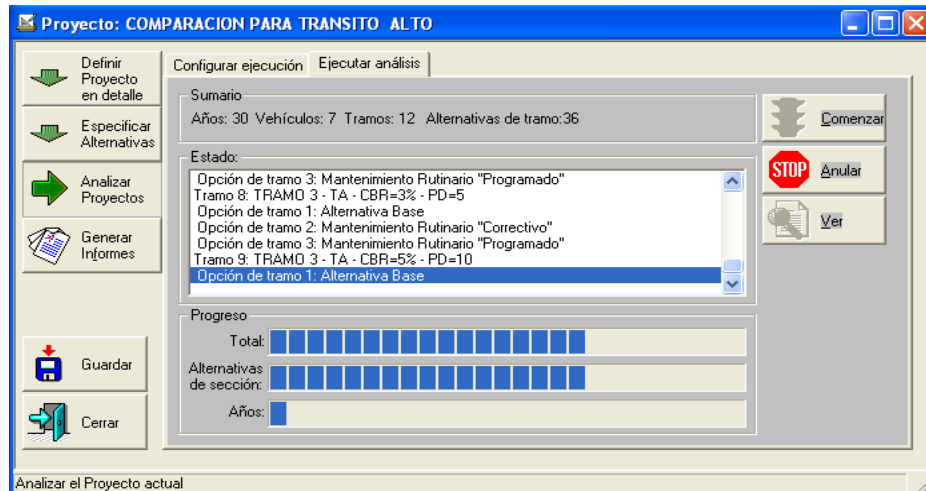
Figura 50. Configuración de ejecución



- **Ejecución del análisis.**

Una vez escogido el sitio en donde se guardará la información en el computador hace el análisis, donde posteriormente se generará los informes del estudio ejecutado.

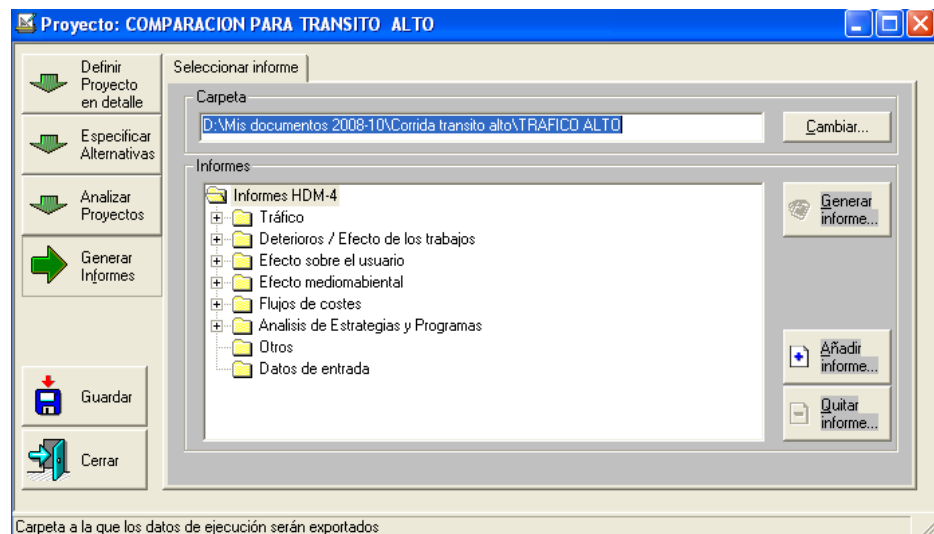
Figura 51. Ejecución del análisis



7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE INDICADORES DE COSTOS

Una vez ingresados los datos al software se procederá a obtener los resultados.

Figura 52. Informes generados



7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En referencia para el análisis técnico económico de selección de la mejor estrategia para cada uno de los tramos de las vías en discusión, se tomará como criterio de evaluación el comportamiento y desempeño de la regularidad superficial del pavimento, evaluado mediante los modelos internos del HDM-4 en términos de IRI. En ese orden de ideas, la selección de la estrategia de mejora (tipo de pavimento a utilizar) y de conservación (mantenimiento a realizar) más adecuada para cada uno de los tramos de análisis planteados para el proyecto, será aquella que represente el mejor balance entre los

aspectos técnicos, representados por el comportamiento de la estructura, tanto en términos de fatiga, como en términos del IRI a lo largo del período de análisis adoptado y los aspectos económicos, calificados para cada una de las posibles estrategias, en función de los índices de evaluación de rentabilidad económica anteriormente explicados (TIR, VPN) y costos por tramo.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con HDM-4, para los diferentes tráficos seleccionados en este análisis. Por último es importante recordar que cada una de las estructuras planteadas tendrá un IRI inicial de 2 m/km, que corresponde al valor de la capa asfáltica sin uso.

7.2 COSTOS ECONÓMICOS POR TRAMO PARA CADA UNA DE LAS DE LAS ALTERNATIVAS DE MEJORA Y CONSERVACIÓN.

A continuación se muestran las tablas resumen que exponen los resultados en costos económicos de los diferentes tramos y se muestran los ahorros obtenidos en cuanto a los costos de mantenimiento y de operación.

7.2.1 Costos por tramo para el tránsito bajo

Cada tramo se dividirá dependiendo del CBR que tenga y de acuerdo al período de diseño que tenga su estructura, donde tenemos:

Tabla 49. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 1 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% - PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 379,41 | \$ 90,41 | \$ 469,83 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 16,61 | \$ 3,19 | \$ 322,92 | \$ 80,15 | \$ 422,87 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 16,61 | \$ 3,23 | \$ 323,36 | \$ 80,72 | \$ 423,93 |

Tabla 50. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 2 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% - PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 379,41 | \$ 90,41 | \$ 469,83 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 18,16 | \$ 3,17 | \$ 318,65 | \$ 79,30 | \$ 419,36 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 18,16 | \$ 3,19 | \$ 319,75 | \$ 79,70 | \$ 420,80 |

Tabla 51. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 3 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% - PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 379,41 | \$ 90,41 | \$ 469,83 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 20,02 | \$ 3,16 | \$ 316,93 | \$ 79,13 | \$ 419,30 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 20,02 | \$ 3,17 | \$ 317,05 | \$ 79,22 | \$ 419,46 |

Tabla 52. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 4 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% - PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 379,41 | \$ 90,41 | \$ 469,83 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,87 | \$ 3,14 | \$ 315,28 | \$ 78,98 | \$ 419,28 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,87 | \$ 3,16 | \$ 315,38 | \$ 79,03 | \$ 419,44 |

En este caso podemos observar que entre los costos de inversión y mantenimiento no se refleja una diferencia económica considerable entre los periodos de diseño tomados, sin embargo el costo más económico por tramo para la capacidad del suelo mala se da en periodos largos, y cuyo valor total obtenido en cuanto a construcción, operación vehicular y mantenimiento es de cuatrocientos diecinueve mil doscientos ochenta millones de pesos (\$ 419.280'.000.000).

Realizando una comparación entre este valor y el periodo de diseño utilizado en Colombia de diez años me representa un ahorro de 0.02%.

Tabla 53. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 6 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% - PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 442,03 | \$ 123,13 | \$ 565,17 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 14,75 | \$ 3,20 | \$ 333,25 | \$ 83,88 | \$ 435,09 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 14,75 | \$ 3,21 | \$ 337,30 | \$ 85,99 | \$ 441,26 |

Tabla 54. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 6 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% - PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 442,03 | \$ 123,13 | \$ 565,17 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 15,68 | \$ 3,18 | \$ 326,99 | \$ 81,53 | \$ 427,39 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 15,68 | \$ 3,22 | \$ 326,76 | \$ 81,88 | \$ 427,55 |

Tabla 55. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 7 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% - PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 442,03 | \$ 123,13 | \$ 565,17 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 17,54 | \$ 3,17 | \$ 322,62 | \$ 80,28 | \$ 423,59 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 17,54 | \$ 3,20 | \$ 321,63 | \$ 80,24 | \$ 422,60 |

Tabla 56. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 8 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% - PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 442,03 | \$ 123,13 | \$ 565,17 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 19,24 | \$ 3,14 | \$ 319,55 | \$ 79,61 | \$ 421,54 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 19,24 | \$ 3,16 | \$ 319,52 | \$ 79,70 | \$ 421,62 |

En este caso donde la capacidad del suelo es regular vemos que en periodos de diseños altos los costos por tramo son bajos en comparación con los otros. Por tanto los costos obtenidos en cuanto a construcción, operación vehicular y manteniendo más convenientes para esta segunda situación fueron de cuatrocientos veintiún mil quinientos cuarenta millones de pesos (\$ 421.540'000.000).

El ahorro presentado en este caso tomando como base los costos por tramo del periodo de diseño de diez años fueron de 1.37%.

Tabla 57. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 9 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 445,36 | \$ 124,94 | \$ 570,30 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 14,14 | \$ 3,20 | \$ 344,73 | \$ 89,02 | \$ 451,09 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 14,14 | \$ 3,21 | \$ 346,83 | \$ 90,17 | \$ 454,35 |

Tabla 58. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 10 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 445,36 | \$ 124,94 | \$ 570,30 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 14,91 | \$ 3,19 | \$ 337,48 | \$ 85,87 | \$ 441,46 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 14,91 | \$ 3,20 | \$ 340,08 | \$ 87,26 | \$ 445,45 |

Tabla 59. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 11 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 445,36 | \$ 124,94 | \$ 570,30 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 15,84 | \$ 3,18 | \$ 326,01 | \$ 81,20 | \$ 426,22 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 15,84 | \$ 3,22 | \$ 325,78 | \$ 81,55 | \$ 426,39 |

Tabla 60. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 12 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 445,36 | \$ 124,94 | \$ 570,30 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 18,00 | \$ 3,14 | \$ 323,64 | \$ 80,60 | \$ 425,37 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 18,00 | \$ 3,19 | \$ 322,50 | \$ 80,48 | \$ 424,17 |

Para el caso donde la capacidad del suelo es buena el comportamiento sigue siendo el mismo que en las situaciones anteriores, por tanto los costos obtenidos en cuanto a construcción, operación vehicular y mantenimiento más convenientes para esta situación fueron cuatrocientos veinticinco mil trescientos setenta millones de pesos (\$ 425.370'000.000). Presentando un ahorro comparado con el periodo de diez años de 3.65%.

De esta manera se percibe que los costos por tramo disminuyen a medida que aumentan los periodos de diseño, debido a que el deterioro presentado en cada una de las alternativas tiene tiempos de inicio y progresión diferentes.

7.2.2 Costos por tramo para el transito medio

Para este proyecto los resultados obtenidos en el análisis fueron:

Tabla 61. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 13 | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 4.870,46 | \$ 120,46 | \$ 4.990,92 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,72 | \$ 3,58 | \$ 3.203,79 | \$ 57,17 | \$ 3.286,25 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,72 | \$ 3,58 | \$ 3.203,79 | \$ 57,17 | \$ 3.286,25 |

Tabla 62. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 14 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 4.870,46 | \$ 120,46 | \$ 4.990,92 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 23,73 | \$ 3,53 | \$ 3.165,69 | \$ 57,04 | \$ 3.249,99 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 23,73 | \$ 3,55 | \$ 3.167,63 | \$ 57,05 | \$ 3.251,95 |

Tabla 63. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 15 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 4.870,46 | \$ 120,46 | \$ 4.990,92 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 25,74 | \$ 3,53 | \$ 3.131,34 | \$ 57,00 | \$ 3.217,61 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 25,74 | \$ 3,53 | \$ 3.131,34 | \$ 57,00 | \$ 3.217,61 |

Tabla 64. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 16 | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% - PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 4.870,46 | \$ 120,46 | \$ 4.990,92 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 27,59 | \$ 3,48 | \$ 3.117,58 | \$ 56,98 | \$ 3.205,64 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 27,59 | \$ 3,50 | \$ 3.118,63 | \$ 56,98 | \$ 3.206,71 |

En este caso también sigue manteniendo la misma proporción de costos económicos a periodos de diseño largos. Los costos totales obtenidos para un CBR=3% en el tráfico medio es de \$ 3.205,640.000.000 millones de pesos

teniendo un ahorro de un 1.37% con respecto al diseño que actualmente se realiza.

Tabla 65. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 17 | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.554,29 | \$ 156,07 | \$ 5.710,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 19,24 | \$ 3,58 | \$ 3.338,23 | \$ 59,66 | \$ 3.420,71 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 19,24 | \$ 3,60 | \$ 3.341,60 | \$ 59,73 | \$ 3.424,17 |

Tabla 66. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 18 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.554,29 | \$ 156,07 | \$ 5.710,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,72 | \$ 3,58 | \$ 3.221,41 | \$ 58,07 | \$ 3.304,78 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,72 | \$ 3,58 | \$ 3.221,41 | \$ 58,07 | \$ 3.304,78 |

Tabla 67. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 19 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.554,29 | \$ 156,07 | \$ 5.710,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 23,11 | \$ 3,53 | \$ 3.206,49 | \$ 58,01 | \$ 3.291,14 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 23,11 | \$ 3,55 | \$ 3.208,41 | \$ 58,02 | \$ 3.293,08 |

Tabla 68. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 20 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.554,29 | \$ 156,07 | \$ 5.710,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 24,50 | \$ 3,53 | \$ 3.178,92 | \$ 57,95 | \$ 3.264,89 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 24,50 | \$ 3,55 | \$ 3.181,09 | \$ 57,95 | \$ 3.267,08 |

Al igual que en las situaciones anteriores, diseñar a periodos largos es más

conveniente en cuanto a costos totales de construcción, operación vehicular y mantenimiento. Los costos totales obtenidos para un CBR=5% en el tráfico medio es de \$ 3.264,890.000.000 millones de pesos. Presentando un ahorro de 1.2% con respecto al diseño de diez años.

Tabla 69. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 21 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.585,77 | \$ 157,83 | \$ 5.743,61 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 18,00 | \$ 3,58 | \$ 3.480,92 | \$ 64,34 | \$ 3.566,84 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 18,00 | \$ 3,60 | \$ 3.484,26 | \$ 64,45 | \$ 3.570,31 |

Tabla 70. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 22 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.585,77 | \$ 157,83 | \$ 5.743,61 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 19,55 | \$ 3,58 | \$ 3.351,14 | \$ 60,05 | \$ 3.434,31 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 19,55 | \$ 3,60 | \$ 3.355,17 | \$ 60,14 | \$ 3.438,45 |

Tabla 71. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 23 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.585,77 | \$ 157,83 | \$ 5.743,61 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,09 | \$ 3,58 | \$ 3.269,08 | \$ 58,41 | \$ 3.352,16 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,09 | \$ 3,58 | \$ 3.269,08 | \$ 58,41 | \$ 3.352,16 |

Tabla 72. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 24 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|-------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 5.585,77 | \$ 157,83 | \$ 5.743,61 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 22,95 | \$ 3,53 | \$ 3.236,77 | \$ 58,08 | \$ 3.321,33 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 22,95 | \$ 3,55 | \$ 3.238,49 | \$ 58,09 | \$ 3.323,07 |

Par esta tipo de subbase se puede apreciar que se sigue teniendo la misma tendencia a tener costos totales por tramo más bajos a periodos de 30 años. El costo referenciado será de \$ 3.321,33 miles de millones de pesos con una ahorro de 3.3% con base al de diez años.

7.2.3 Costos por tramo para el tránsito alto

Para este proyecto los resultados obtenidos en el análisis fueron:

Tabla 73. CBR=3% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 25 | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.793,26 | \$ 656,59 | \$ 11.449,85 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 24,04 | \$ 3,58 | \$ 9.384,74 | \$ 555,85 | \$ 9.968,20 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 24,04 | \$ 3,45 | \$ 9.459,67 | \$ 566,25 | \$ 10.053,40 |

Tabla 74. CBR=3% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 26 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.793,26 | \$ 656,59 | \$ 11.449,85 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 26,05 | \$ 3,58 | \$ 9.013,06 | \$ 510,56 | \$ 9.553,25 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 26,05 | \$ 3,45 | \$ 9.095,18 | \$ 520,60 | \$ 9.645,28 |

Tabla 75. CBR=3% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 27 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.793,26 | \$ 656,59 | \$ 11.449,85 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 28,99 | \$ 3,58 | \$ 8.772,65 | \$ 486,36 | \$ 9.291,58 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 28,99 | \$ 3,43 | \$ 8.828,51 | \$ 491,63 | \$ 9.352,56 |

Tabla 76. CBR=3% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 28 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=3% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.793,26 | \$ 656,59 | \$ 11.449,85 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 31,00 | \$ 3,53 | \$ 8.688,76 | \$ 479,57 | \$ 9.202,85 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 31,00 | \$ 3,41 | \$ 8.729,12 | \$ 482,82 | \$ 9.246,35 |

Para este tipo de soporte encontramos que el valor más conveniente en cuanto a los costos por tramo es el generado para los diseños a 30 años y posee un valor de \$ 9.3202,850.000 millones de pesos presentando un ahorro de 3.67% con respecto al diseño en 10 años.

Tabla 77. CBR=5% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 29 | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.787,62 | \$ 655,74 | \$ 11.443,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,09 | \$ 3,63 | \$ 9.974,37 | \$ 631,99 | \$ 10.631,08 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,09 | \$ 3,47 | \$ 10.035,36 | \$ 640,79 | \$ 10.700,72 |

Tabla 78. CBR=5% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 30 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.787,62 | \$ 655,74 | \$ 11.443,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 22,95 | \$ 3,63 | \$ 9.622,47 | \$ 588,51 | \$ 10.237,57 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 22,95 | \$ 3,47 | \$ 9.712,54 | \$ 600,87 | \$ 10.339,82 |

Tabla 79. CBR=5% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 31 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.787,62 | \$ 655,74 | \$ 11.443,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 25,73 | \$ 3,58 | \$ 9.278,90 | \$ 544,85 | \$ 9.853,06 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 25,73 | \$ 3,45 | \$ 9.378,08 | \$ 558,41 | \$ 9.965,67 |

Tabla 80. CBR=5% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 32 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=5% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.787,62 | \$ 655,74 | \$ 11.443,36 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 27,43 | \$ 3,58 | \$ 9.097,30 | \$ 520,79 | \$ 9.649,11 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 27,43 | \$ 3,43 | \$ 9.172,82 | \$ 530,94 | \$ 9.734,63 |

Los costos más bajos para este tipo de suelo fueron de \$ 9.649,110.000.000 millones de pesos perteneciente al periodo de diseño más alto con un ahorro de 5.75% con respecto a los costos de diez años.

Tabla 81. CBR=10% y Periodo de diseño de 5 años

| TRAMO 33 | | | | | | |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=5 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.783,55 | \$ 655,16 | \$ 11.438,71 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 19,55 | \$ 3,67 | \$ 10.247,47 | \$ 665,80 | \$ 10.936,48 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 19,55 | \$ 3,48 | \$ 10.314,47 | \$ 675,50 | \$ 11.013,00 |

Tabla 82. CBR=10% y Periodo de diseño de 10 años

| TRAMO 34 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=10 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.783,55 | \$ 655,16 | \$ 11.438,71 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 21,25 | \$ 3,63 | \$ 10.029,64 | \$ 639,78 | \$ 10.694,29 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 21,25 | \$ 3,47 | \$ 10.084,82 | \$ 647,67 | \$ 10.757,20 |

Tabla 83. CBR=10% y Periodo de diseño de 20 años

| TRAMO 35 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=20 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.783,55 | \$ 655,16 | \$ 11.438,71 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 23,88 | \$ 3,63 | \$ 9.659,70 | \$ 594,37 | \$ 10.281,57 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 23,88 | \$ 3,47 | \$ 9.747,49 | \$ 606,39 | \$ 10.381,22 |

Tabla 84. CBR=10% y Periodo de diseño de 30 años

| TRAMO 36 | | | | | | |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| TRAMO | TIPO DE MANTENIMIENTO | Inversión | Mantenimiento | TM VOC | TM Viaje | Costo Total |
| CBR=10% PD=30 | Alternativa Base | \$ 0,00 | \$ 0,00 | \$ 10.783,55 | \$ 655,16 | \$ 11.438,71 |
| | Mant. Rutinario "Correctivo" | \$ 25,58 | \$ 3,58 | \$ 9.437,36 | \$ 566,06 | \$ 10.032,57 |
| | Mant. Rutinario "Programado" | \$ 25,58 | \$ 3,45 | \$ 9.528,02 | \$ 578,58 | \$ 10.135,63 |

Para este tipo de suelo con un CBR de 10% se tiene un costo total por tramo de \$ 10.032,570.000.000 millones de pesos con un ahorro de 6.20% comparado con los costos que tiene un diseño a diez años.

En general los costos totales que involucran diferentes factores de inversión en el tiempo, produjeron una tendencia a los diseños a largo plazo ,en este caso los periodos de diseño de 30 años, donde se reflejaron durante cada uno de los análisis planteados costos bajos en comparación con las demás alternativas, sin embargo este no me permite definir aun cual sea la mejor alternativa que represente los mayores ahorros en un futuro, ya que falta analizar otros índices económicos para poder garantizar si esta será la alternativa más adecuada de inversión.

7.3 INDICADORES ECONÓMICOS

El software HDM-4 realiza un análisis económico en un periodo determinado, comparando las diferentes alternativas definidas por el usuario, de esta forma se encuentran los resultados para las alternativas propuestas en las vías del territorio nacional. Con el programa, se calculan los flujos y beneficios de costos a lo largo del periodo establecido a partir de la puesta en servicio de la carretera. El Valor Actual Neto (VAN) que es igual al valor presente neto (VPN) del proyecto se calcula con la tasa de descuento oficial de 10 %.

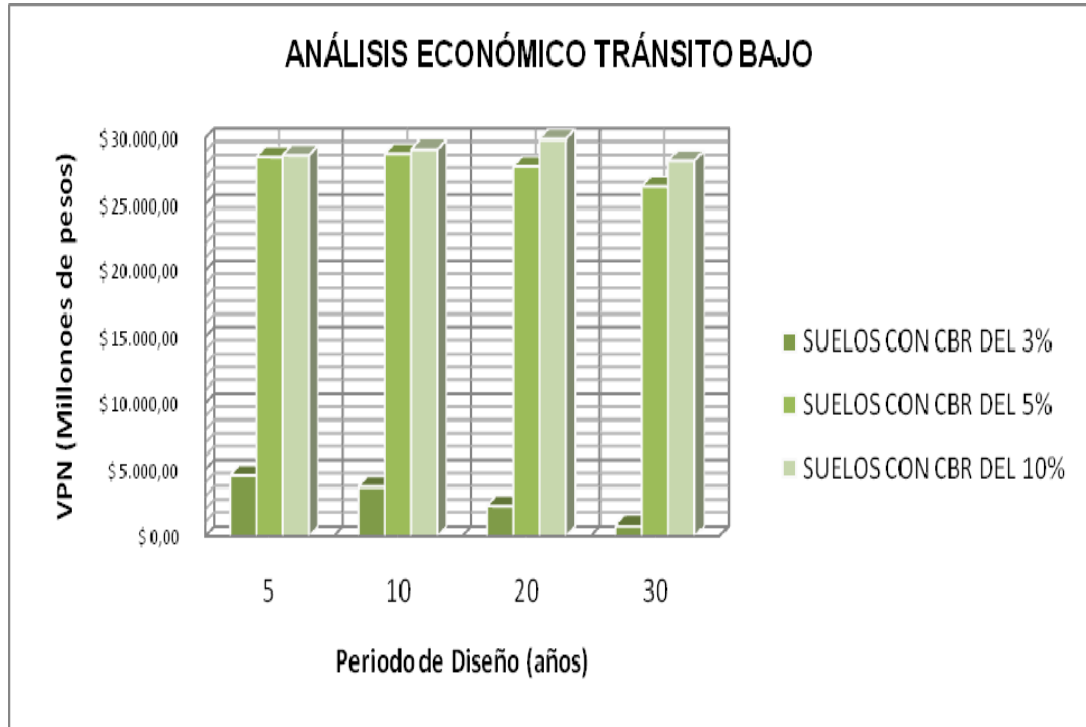
A continuación se presenta de manera ordenada los indicadores económicos pertenecientes a cada uno de los tramos analizados, además se verá cuales son los benéficos generados con cada alternativa y por medio del la evaluación del VPN considerar cual de las estructuras tendrá mayor efecto para los inversionistas.

7.3.1 Tránsito bajo

Tabla 85. VPN-TIR Tránsito bajo.

| TIPO DE SUELO | PERIODO DE DISEÑO | VIAS CON MANT. RUTINARIO "CORRECTIVO" | | VIAS CON MANT. RUTINARIO "PROGRAMADO" | |
|---------------|-------------------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| | | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) |
| CBR=3% | 5 | \$ 4.549,00 | 13,5 | \$ 4.560,00 | 13,6 |
| | 10 | \$ 3.696,00 | 12,6 | \$ 3.616,00 | 12,5 |
| | 20 | \$ 2.249,00 | 11,4 | \$ 2.264,00 | 11,4 |
| | 30 | \$ 764,00 | 10,5 | \$ 778,00 | 10,5 |
| CBR=5% | 5 | \$ 28.597,00 | 30,6 | \$ 28.099,00 | 30,6 |
| | 10 | \$ 28.835,00 | 29,1 | \$ 28.719,00 | 29,1 |
| | 20 | \$ 27.846,00 | 26,3 | \$ 27.702,00 | 26,3 |
| | 30 | \$ 26.399,00 | 24,3 | \$ 26.423,00 | 24,3 |
| CBR=10% | 5 | \$ 28.723,00 | 32,4 | \$ 28.405,00 | 32,4 |
| | 10 | \$ 29.166,00 | 31 | \$ 28.830,00 | 31 |
| | 20 | \$ 29.915,00 | 29,5 | \$ 29.997,00 | 29,5 |
| | 30 | \$ 28.299,00 | 26,3 | \$ 28.469,00 | 26,3 |

Figura 53. Tránsito bajo CBR=3% - CBR=5% - CBR=10%



- Para una subrasante de una capacidad mala, se observa que los indicadores económicos me están arrojando que la alternativa a seleccionar es la del periodo de diseño bajo, su VPN es el más Alto entre todos las alternativas, lo mismo ocurre con su tasa interna de retorno, por esta razón la alternativa que tiene un periodo de 5 años es la más recomendable desde los puntos de vista económico.
- En la situación donde la capacidad del suelo es regular podemos observar que la alternativa que está ofreciendo los indicadores económicos más altos, es la del periodo de diseño correspondiente a 10 años.
- Podemos observar que en el periodo de diseño de 20 años es la alternativa más rentable, para un suelo con buena capacidad en la subrasante.

En los aspectos técnicos, para el comportamiento de la estructura uno de los factores que representa es la regularidad media de los tramos, a continuación se mostrará gráficamente los tramos optados como los más convenientes para cada tipo de suelo:

Figura 54. Regularidad media Tramo 1 CBR=3% PD=5 años

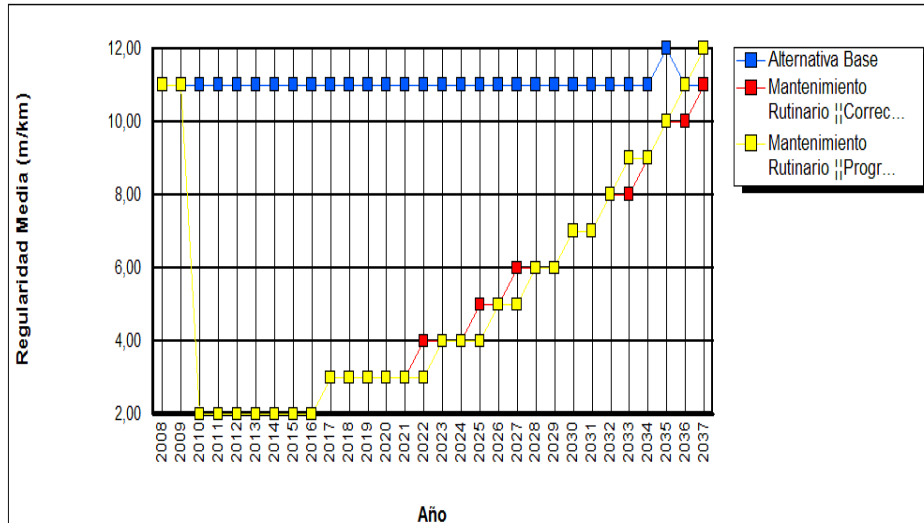


Figura 55. Regularidad media Tramo 1 CBR=5% PD=10 años

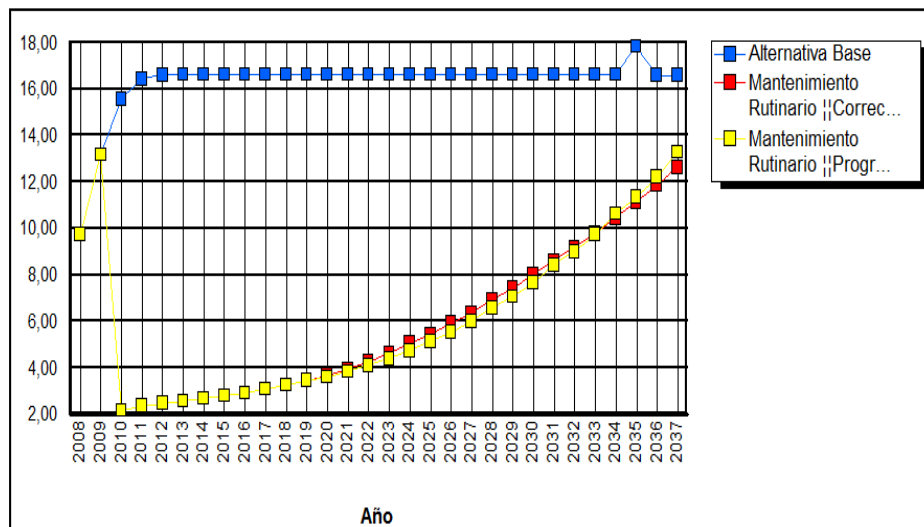
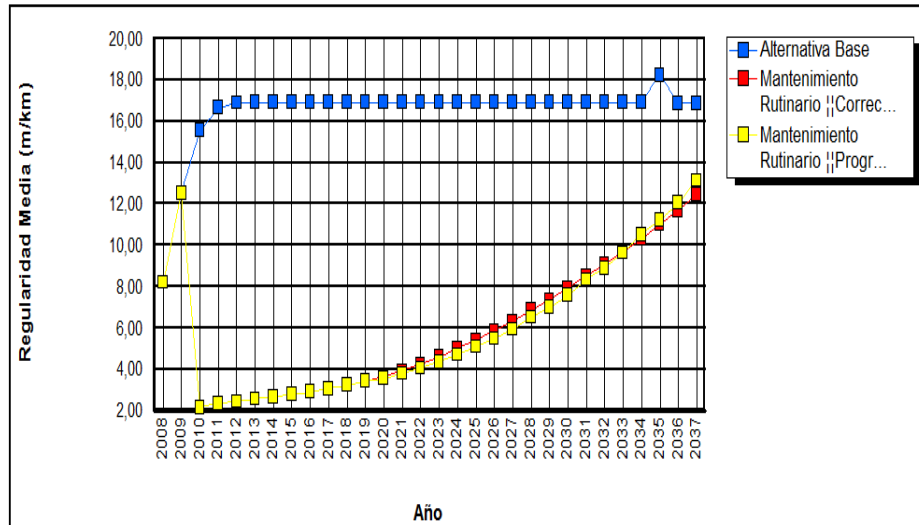


Figura 56. Regularidad media Tramo 1 CBR=10% PD=20 años

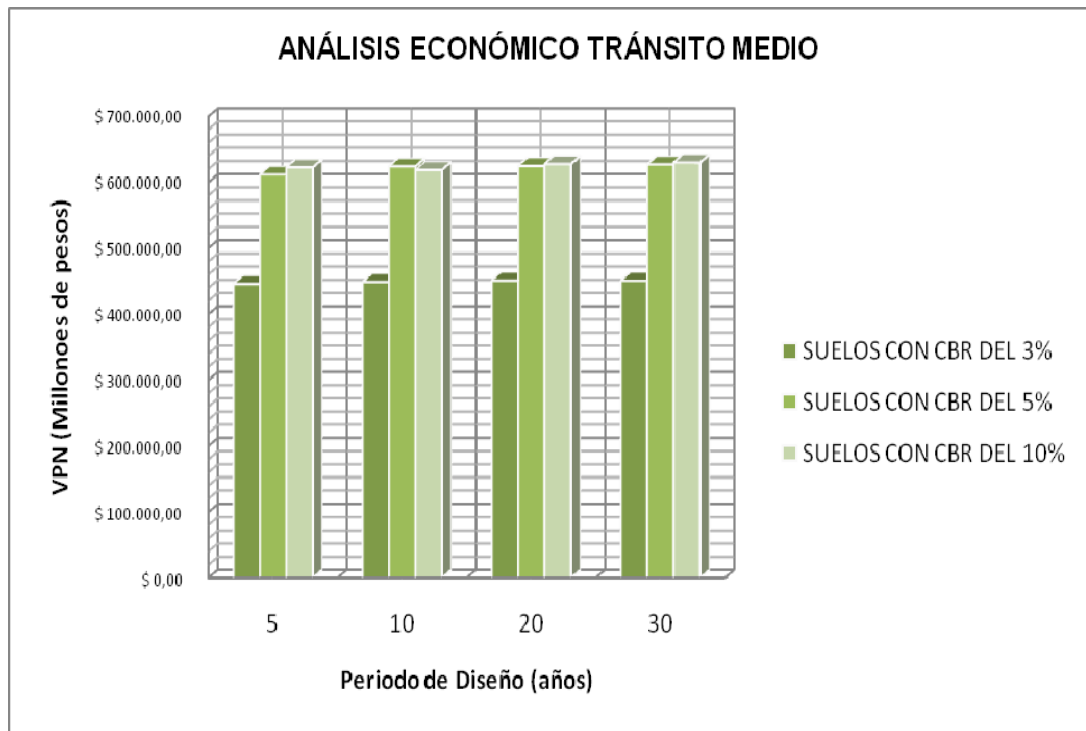


7.3.2 Tránsito medio

Tabla 86. VPN-TIR Tránsito medio.

| TIPO DE SUELO | PERIODO DE DISEÑO | VIAS CON MANT. RUTINARIO "CORRECTIVO" | | VIAS CON MANT. RUTINARIO "PROGRAMADO" | |
|---------------|-------------------|--|---------|--|---------|
| | | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) |
| CBR=3% | 5 | \$ 445.914,00 | 207,7 | \$ 445.914,00 | 207,7 |
| | 10 | \$ 448.743,00 | 190,4 | \$ 448.776,00 | 190,4 |
| | 20 | \$ 451.045,00 | 175,7 | \$ 451.045,00 | 175,7 |
| | 30 | \$ 450.683,00 | 164,1 | \$ 450.570,00 | 164,1 |
| CBR=5% | 5 | \$ 611.540,00 | 318,7 | \$ 610.967,00 | 318,7 |
| | 10 | \$ 624.139,00 | 282,7 | \$ 624.139,00 | 282,7 |
| | 20 | \$ 624.804,00 | 265,9 | \$ 624.544,00 | 265,9 |
| | 30 | \$ 627.007,00 | 251 | \$ 626.721,00 | 251 |
| CBR=10% | 5 | \$ 622.545,00 | 344,9 | \$ 622.067,00 | 32,4 |
| | 10 | \$ 618.595,00 | 317,9 | \$ 618.020,00 | 31 |
| | 20 | \$ 627.743,00 | 294,9 | \$ 627.743,00 | 29,5 |
| | 30 | \$ 629.953,00 | 271,3 | \$ 629.712,00 | 26,3 |

Figura 57. Tránsito medio CBR=3% - CBR=5% - CBR=10%



- En el suelo con capacidad mala podemos apreciar que la tasa interna de retorno al tomarla como factor de evaluación económica de un proyecto, no brinda la certeza necesaria para poder decidir entre una serie de alternativas, en este caso en donde la capacidad del suelo es mala, la tasa interna de retorno más alta la posee el periodo de diseño bajo, pero los VPN mas altos se muestran en el periodo de diseño de 20 años, por tal razón se toma la alternativa que tenga el mayor VPN como la alternativa más conveniente en el proyecto.
- Cuando la capacidad de la subrasante es regular, los periodos de diseño largos vuelven a tener la mayor tendencia a ser la alternativa que tenga los indicadores económicos más altos.

- Para el suelo con capacidad buena se encontró que la mejor alternativa de diseño era la de 30 años.

En los aspectos técnicos tenemos:

Figura 58. Regularidad media Tramo 2 CBR=3% PD=20 años

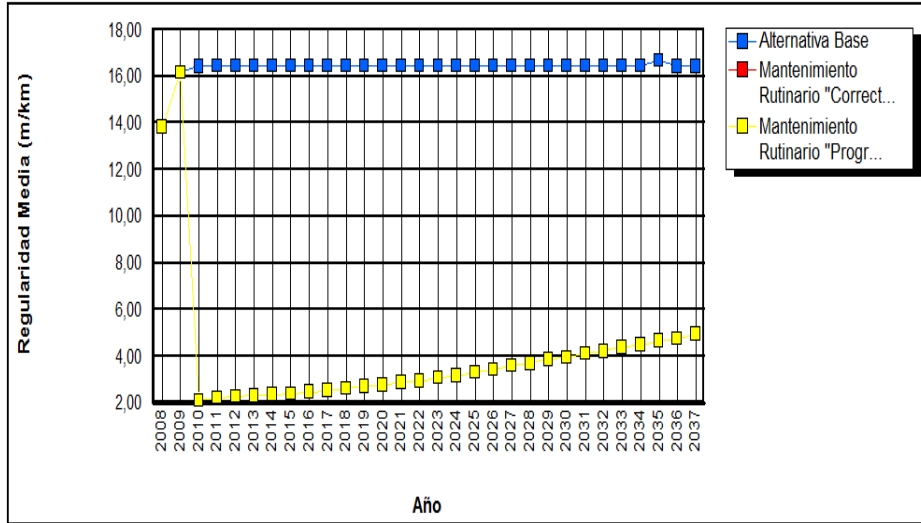


Figura 59. Regularidad media Tramo 2 CBR=5% PD=30años

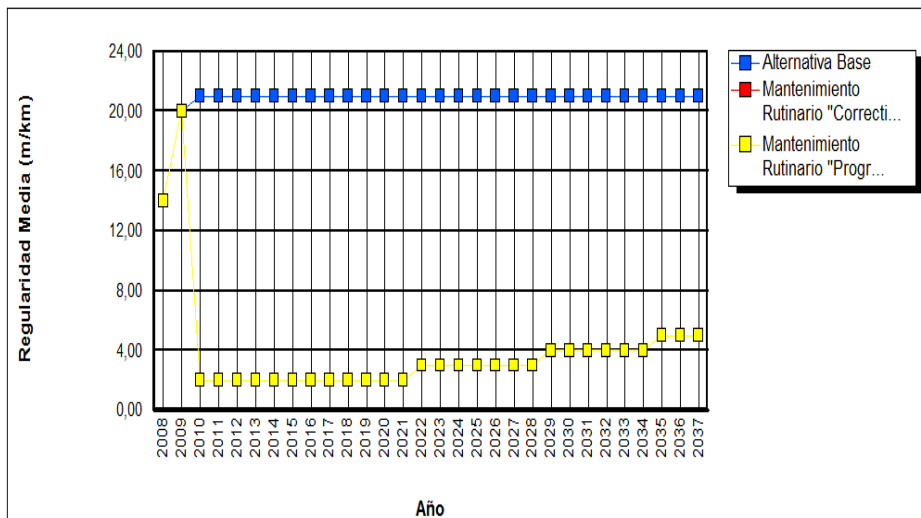
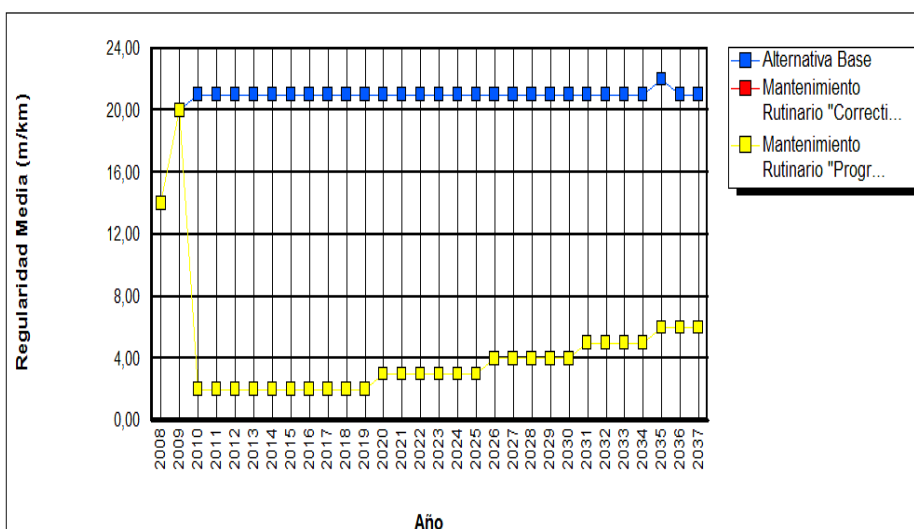


Figura 60. Regularidad media Tramo 2 CBR=10% PD=30 años

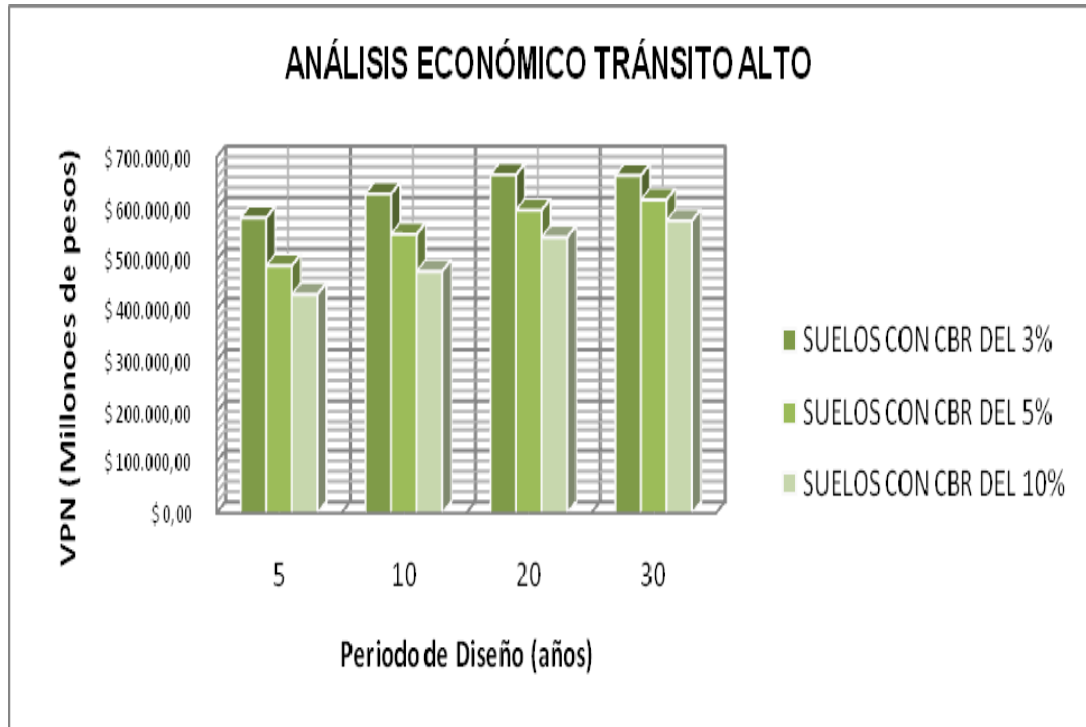


7.3.3 Tránsito alto

Tabla 87. VPN-TIR Transito alto.

| TIPO DE SUELO | PERIODO DE DISEÑO | VIAS CON MANT. RUTINARIO "CORRECTIVO" | | VIAS CON MANT. RUTINARIO "PROGRAMADO" | |
|---------------|-------------------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| | | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) | VPN (10 ⁶ pesos) (i=10%) | TIR (%) |
| CBR=3% | 5 | \$ 582.382,00 | 301,2 | \$ 573.175,00 | 301,2 |
| | 10 | \$ 628.664,00 | 278,2 | \$ 619.307,00 | 278,2 |
| | 20 | \$ 666.078,00 | 250,4 | \$ 649.838,00 | 250,4 |
| | 30 | \$ 664.507,00 | 234,1 | \$ 660.149,00 | 234,1 |
| CBR=5% | 5 | \$ 488.792,00 | 342,8 | \$ 478.151,00 | 342,8 |
| | 10 | \$ 550.315,00 | 315,3 | \$ 537.166,00 | 315,3 |
| | 20 | \$ 596.916,00 | 281,6 | \$ 585.153,00 | 281,6 |
| | 30 | \$ 617.072,00 | 264,3 | \$ 608.850,00 | 264,3 |
| CBR=10% | 5 | \$ 429.129,00 | 369,6 | \$ 414.738,00 | 369,6 |
| | 10 | \$ 477.883,00 | 340,3 | \$ 467.652,00 | 340,3 |
| | 20 | \$ 544.358,00 | 303,2 | \$ 531.115,00 | 303,2 |
| | 30 | \$ 576.427,00 | 283,3 | \$ 564.679,00 | 283,3 |

Figura 61. Tránsito alto CBR=3% - CBR=5% - CBR=10%



- Para el suelo con capacidad baja la alternativa más conveniente para este proyecto, es a 20 años.
- En este caso con un CBR de 5%, los periodos largos se sobreponen sobre los pequeños ya que los indicadores económicos me determinan que la alternativa con las mejores garantías de inversión es la de periodo de 30 años.
- Por último para este caso con un CBR del 10% el periodo de diseño más óptimo es el de 30 años, de acuerdo a los indicadores económicos obtenidos.

En los aspectos económicos se obtuvo:

Figura 62. Regularidad media Tramo 3 CBR=3% PD=20 años

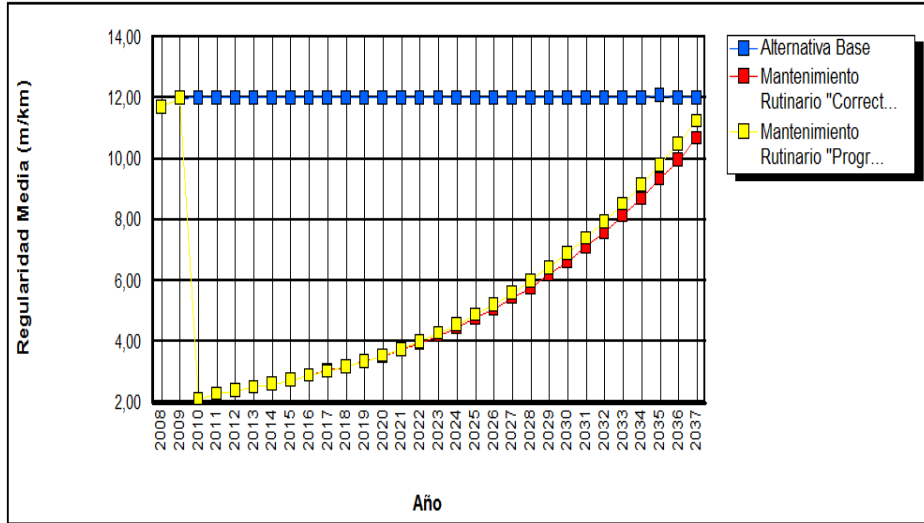


Figura 63. Regularidad media Tramo 3 CBR=5% PD=30 años

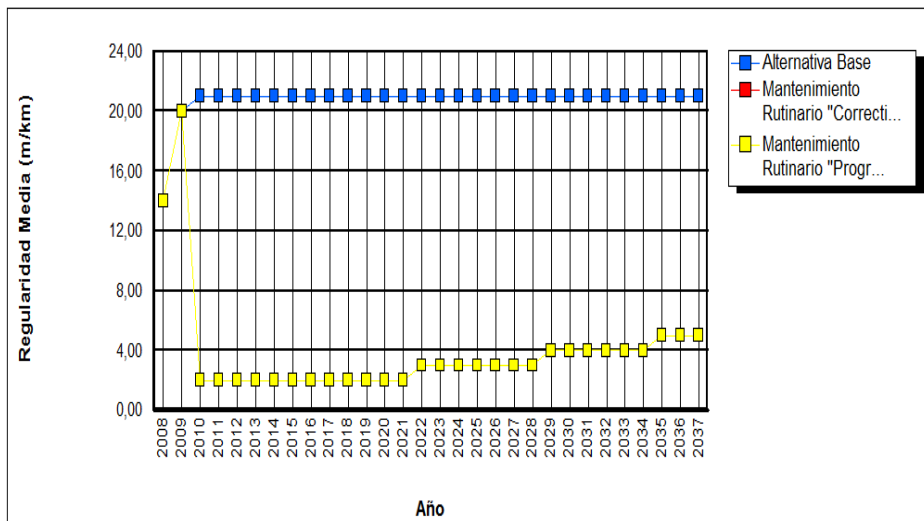
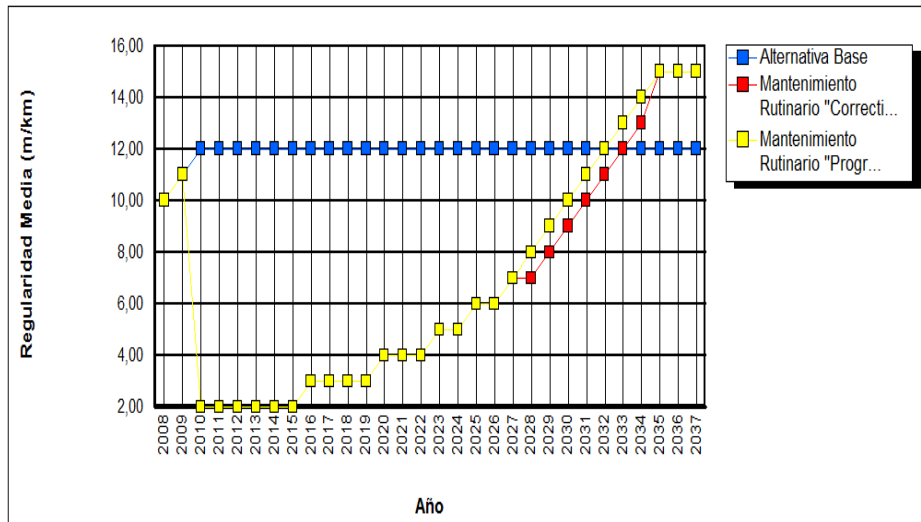


Figura 64. Regularidad media Tramo 3 CBR=10% PD=30 años



CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de costos realizados para cada una de las alternativas planteadas, se determinó que si es conveniente diseñar los pavimentos flexibles a periodos largos de diseño. En la primera parte del análisis de los resultados económicos se estableció que los costos por tramo generados durante el periodo de análisis son más económicos a periodos de diseños de 30 años, donde los costos de inversión son más altos, pero los cuales son compensados con los ahorros producidos para las entidades encargadas del mantenimiento y para los usuarios que se benefician en los tiempo de viaje y costos operación. En la segunda parte tomamos como referencia los indicadores económicos para la evaluación de alternativas, siendo el Valor Presente Neto (VPN) uno de los factores más representativos para la selección de la alternativa más favorable, en el análisis se determinó que en general los VPN mas altos se presentaron en periodos de diseño largos, lo que representa que teniendo en cuenta el costo del dinero en el tiempo, el retorno que se obtendrá en el proyecto, será mayor que la inversión requerida para llevarlo a cabo, también la Tasa Interna de Retorno (TIR) genero rentabilidad en los proyectos planteados puesto que las tasas obtenidas en el estudio eran mayores a la tasa de actualización propuesta para la evaluación del proyecto.

En vías de bajo tránsito sería más conveniente realizar los diseño a periodos cortos, puesto que los resultados en el análisis arrojaron que para un CBR del 3 y 5% el proyecto más conveniente diseñar para 5 y 10 años respectivamente, los cuales tienen el VPN y TIR mas altos de las alternativas en comparación, esto se debe a que no hay mucha diferencia entre los costos totales por tramo y a que beneficios generados para esta alternativa son mucho más altos. Pero en cuanto a la parte funcional ofrece una regularidad aceptable comparada con la del periodo

de 30 años. En cuanto a un CBR del 10% la tendencia continua hacia optar por periodos largos, en donde el periodo de diseño optimo es a 20 años.

Al comparar cada uno de los proyectos planteados con el periodo actualmente utilizado en el diseño de pavimentos flexibles el cual corresponde a 10 años, se estableció que para el transito bajo con un CBR del 3% tenemos un ahorro de 0.02%, en el CBR del 5% un ahorro de 1.37% y para un CBR del 10% tendremos un ahorro de 3.65%. En un tráfico medio se presentaron ahorros para los CBR de 3, 5 y 10% de 1.37%, 1.20% y 3.30% respectivamente. Por último para el transito alto se apreciaron los ahorros económicos más considerables donde para el suelo con capacidad baja se produjo un ahorro de 3.67%, para un suelo regular de 5.75% y para el de capacidad buena se tiene un ahorro de 6.20%. Como podemos ver los costos ahorrados al considerar periodos de diseño largos son elevados, manera por la cual se sugiere optar por considerar ampliar estos periodos de diseño.

BIBLIOGRAFIA

- CRESPO DEL RIO R., & YARZA P. “El HDM-4 como herramienta de ayuda para la conservación de carreteras”, Comunicación Libre, VIII Jornadas Nacionales sobre Conservación de Carreteras, Vitoria, 2002

- INGERROUTE, MISIÓN FRANCESA, “El análisis económico en los estudios de factibilidad vial”. Ministerio de Obras Públicas. Bogotá, 1973.

- KERALI Henry, “Visión General de HDM-4”, Manual de usuario software, ISBN: 2-84060-059-5

- MONTEJO FONSECA, Alfonso; Ingeniería de pavimentos para carreteras, Universidad Católica de Colombia, segunda edición, Bogotá, 2001.

- TELLEZ LUNA Miguel, Finanzas de la construcción, Bhandar Editores Ltda, Segunda edición, Bogotá, 1993. 178 p.

- SOLANO EFRAIN, “Ejercicio académico”, Universidad Pontificia Bolivariana. Instituto de Postgrado en Ingeniería Civil, Bucaramanga, Diciembre de 2008

- CARDENAS Norma Carolina, RODRIGUEZ Mariana. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LA HERRAMIENTA DE GESTIÓN HDM-4 PARA EL CASO DE LA SIMULACIÓN DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS DEL TIPO JPCP PARA LAS CONDICIONES COLOMBIANAS. Bogotá 2006. Trabajo de grado (Ingeniero civil), Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

- COTES NAVARRO, Leonardo Rafael. GUALDRON SILVA, Angélica María. GESTIÓN PARA EL MANTENIMIENTO DE VÍAS NO PAVIMENTADAS DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER CON BASE EN EL MODELO HDM-3. Proyecto de grado. Universidad Industrial De Santander 1992.

- MANTILLA ROSAS Julio Enrique, SÁNCHEZ MÁRQUEZ José Miguel. PROYECTO DE GRADO IMPACTO DE LA TÉCNICA DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS CON TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN PROGRAMAS COMO EL PLAN 2500, Bucaramanga, 2008, Trabajo de grado (Ingeniero civil), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.
<http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec>. Publicación Técnica No. 253 Sanfandila, Qro.2004

- EVALUACION ECONÓMICA DETALLADA DE PROYECTOS VIALES.
http://www.mtc.gob.pe/portal/logypro/plan_intermodal. Publicado en junio del 2005.