

ANÁLISIS TÉCNICO DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO DE LAS
CONCESIONES VIALES DE COLOMBIA CONFORME A LOS
PARÁMETROS DE EVALUACIÓN ESTABLECIDOS EN LOS
CONTRATOS DE CONCESIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE MODELOS
DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS

GUSTAVO ADOLFO GAMBOA BELTRÁN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

2019

ANÁLISIS TÉCNICO DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO DE LAS
CONCESIONES VIALES DE COLOMBIA CONFORME A LOS PARÁMETROS
DE EVALUACIÓN ESTABLECIDOS EN LOS CONTRATOS DE CONCESIÓN
PARA LA EVALUACIÓN DE MODELOS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
PAVIMENTOS

GUSTAVO ADOLFO GAMBOA BELTRÁN

Trabajo de grado para optar al título de:
MAGÍSTER EN INFRAESTRUCTURA VIAL

Director

M.S.C. JUAN PABLO NIETO MORA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA
2019

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 10 de abril de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de antemano el esfuerzo, la dedicación y la paciencia que han tenido cada uno de nuestros mentores durante esta etapa, en especial al ingeniero Juan Pablo Nieto, quien dedicó su tiempo para brindar sus conocimientos en beneficio de este proyecto, y quien con su preparación, sentido de profesionalismo y responsabilidad generó un gran aporte al desarrollo del mismo, fomentando el trabajo en equipo, la perseverancia y el entendimiento mutuo, que fueron factores clave para lograr el cumplimiento de este objetivo.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios y mi familia, quienes siempre han estado conmigo, acompañándome en mi desarrollo como profesional y como persona.

A mis maestros que me transmitieron su conocimiento y que he recibido con agrado y me han apoyado a lo largo de este proceso de formación, al ingeniero Juan Pablo Nieto, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, paciencia y colaboración ha logrado que haya terminado el desarrollo de este trabajo.

Por último, agradecer a todas las personas que de uno u otra forma me han apoyado y dado su mano en esta una de mis metas a cumplir de muchas más que anhelo alcanzar.

GUSTAVO G.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	18
1. TÍTULO DEL PROYECTO	20
2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES.....	21
2.1 INTRODUCCIÓN	21
2.2 ANTECEDENTES GENERALES	22
3. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	31
3.1 DESCRIPCIÓN	31
4. OBJETIVOS Y ALCANCE	33
4.1 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE.....	33
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
5. ESTADO DEL ARTE	34
6. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL.....	47
6.1 ÍNDICE DE ESTADO.....	47
6.2 RUGOSIDAD (R) ÍNDICE DE REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI).....	49
6.3 AHUELLAMIENTOS Y DEFORMACIONES (A)	49
6.4 FISURAS Y GRIETAS (F) % ÁREA AFECTADA	49
6.5 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (D) COEFICIENTE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.....	50
6.6 MODELOS DE DETERIORO	51
6.7 VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	53
6.7.1 Tránsito	54
6.7.2 Subrasante.....	56
6.7.3 Clima	56
6.7.5 Tipos de pavimento	57
7. MARCO METODOLÓGICO.....	59
7.1 PROYECTOS A EVALUAR	63
7.1.1 Consideraciones de los datos evaluados.....	64
7.2 RECOLECCIÓN INFORMACIÓN PARÁMETROS DE DISEÑO	64
7.2.1 Tránsito Promedio Diario – TPD	64
7.2.2 Clima - Temperatura Media Anual Promedio (°C).....	67
7.2.3 Tipo de Pavimento	67
7.3 CONJUNTOS DE TRAMOS VIALES CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES.....	70

7.3.1 Conjuntos de tramos por TMAP:.....	70
7.3.2 Conjuntos de tramos por tipo de pavimento:	71
7.3.2 Conjuntos de tramos por nivel de tránsito:.....	71
7.4 CONVERSIÓN DE DATOS DE ÍNDICE DE ESTADO EN DATOS DE MEDICIÓN.....	73
8. ANÁLISIS Y RESULTADOS	78
8.1 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 2:.....	79
8.2 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 4:.....	81
8.3 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 6.....	84
8.4 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 10:.....	87
8.5 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 12:.....	91
8.6 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 16:.....	94
8.7 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 18.....	98
8.8 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 22.....	101
8.9 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 24.....	105
8.10 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 26.....	108
8.11 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 28.....	112
8.12 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 30.....	115
8.13 ANÁLISIS MODELOS DE DETERIORO.....	119
9. CONCLUSIONES	123
10. RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	126
ANEXOS.....	129

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Flujo del Sistema de Administración de Pavimentos en el estado de Washington	23
Figura 2. Sistema de Gestión de Conservación de Pavimentos de la Dirección de Viabilidad de Chile	27
Figura 3. Comportamiento de la resistencia al deslizamiento según la edad del pavimento	28
Figura 4. Efecto del tránsito bajo en la resistencia al deslizamiento	29
Figura 5. Efecto del tránsito medio en la resistencia al deslizamiento	29
Figura 6. Efecto del tránsito alto en la resistencia al deslizamiento	30
Figura 7. Clasificación Índice de Estado según análisis Sánchez Sabogal	34
Figura 8. Efecto conjunto tráfico y medioambiente sobre la serviciabilidad de un pavimento	42
Figura 9. Esquema de deterioros de pavimentos en la primera y la segunda fase	52
Figura 10. Diferencia entre modelos agregados e incrementales	53
Figura 11. Estructura de Pavimento Flexible	57
Figura 12. Estructura Pavimento Rígido	58
Figura 13. Datos de tráfico del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta. N vs. tiempo	72
Figura 14. Curva de deterioro del grupo 2 - IRI vs. Tiempo	79
Figura 15. Curva de deterioro del grupo 2 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	80
Figura 16. Curva de deterioro del grupo 2 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	80
Figura 17. Curva de deterioro del grupo 2 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	81
Figura 18. Curva de deterioro del grupo 2 - Estado de bermas vs. Tiempo	81
Figura 19. Curva de deterioro del grupo 4 - IRI vs. Tiempo	82
Figura 20. Curva de deterioro del grupo 4 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	83
Figura 21. Curva de deterioro del grupo 4 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	83

Figura 22. Curva de deterioro del grupo 4 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo.....	84
Figura 23. Curva de deterioro del grupo 4 - Estado de bermas vs. Tiempo.....	84
Figura 24. Curva de deterioro del grupo 6 - IRI vs. Tiempo	85
Figura 25. Curva de deterioro del grupo 6 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	85
Figura 26. Curva de deterioro del grupo 6 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	86
Figura 27. Curva de deterioro del grupo 6 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	87
Figura 28. Curva de deterioro del grupo 6 - Estado de bermas vs. Tiempo.....	87
Figura 29. Curva de deterioro del grupo 10 - IRI vs. Tiempo	88
Figura 30. Curva de deterioro del grupo 10 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	89
Figura 31. Curva de deterioro del grupo 10 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	89
Figura 32. Curva de deterioro del grupo 10 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	90
Figura 33. Curva de deterioro del grupo 10 - Estado de bermas vs. Tiempo....	91
Figura 34. Curva de deterioro del grupo 12 - IRI vs. Tiempo	92
Figura 35. Curva de deterioro del grupo 12 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	92
Figura 36. Curva de deterioro del grupo 12 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	93
Figura 37. Curva de deterioro del grupo 12 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	93
Figura 38. Curva de deterioro del grupo 12 - Estado de bermas vs. Tiempo....	94
Figura 39. Curva de deterioro del grupo 16 - IRI vs. Tiempo	95
Figura 40. Curva de deterioro del grupo 16 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	96
Figura 41. Curva de deterioro del grupo 16 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	96
Figura 42. Curva de deterioro del grupo 16 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	97
Figura 43. Curva de deterioro del grupo 16 - Estado de bermas vs. Tiempo....	97
Figura 44. Curva de deterioro del grupo 18 - IRI vs. Tiempo	98
Figura 45. Curva de deterioro del grupo 18 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	99

Figura 46. Curva de deterioro del grupo 18 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	99
Figura 47. Curva de deterioro del grupo 18 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	100
Figura 48. Curva de deterioro del grupo 18 - Estado de bermas vs. Tiempo...	101
Figura 49. Curva de deterioro del grupo 22 - IRI vs. Tiempo	102
Figura 50. Curva de deterioro del grupo 22 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	102
Figura 51. Curva de deterioro del grupo 22 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	103
Figura 52. Curva de deterioro del grupo 22 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	104
Figura 53. Curva de deterioro del grupo 22 - Estado de bermas vs. Tiempo...	105
Figura 54. Curva de deterioro del grupo 24 - IRI vs. Tiempo	105
Figura 55. Curva de deterioro del grupo 24 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	106
Figura 56. Curva de deterioro del grupo 24 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	107
Figura 57. Curva de deterioro del grupo 24 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	107
Figura 58. Curva de deterioro del grupo 24 - Estado de bermas vs. Tiempo..	108
Figura 59. Curva de deterioro del grupo 26 - IRI vs. Tiempo	109
Figura 60. Curva de deterioro del grupo 26 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	109
Figura 61. Curva de deterioro del grupo 26 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	110
Figura 62. Curva de deterioro del grupo 26 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	111
Figura 63. Curva de deterioro del grupo 26 - Estado de bermas vs. Tiempo..	111
Figura 64. Curva de deterioro del grupo 28 - IRI vs. Tiempo	112
Figura 65. Curva de deterioro del grupo 28 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	113
Figura 66. Curva de deterioro del grupo 28 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	113
Figura 67. Curva de deterioro del grupo 28 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	114
Figura 68. Curva de deterioro del grupo 28 - Estado de bermas vs. Tiempo..	115
Figura 69. Curva de deterioro del grupo 30 - IRI vs. Tiempo	116

Figura 70. Curva de deterioro del grupo 30 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo	117
Figura 71. Curva de deterioro del grupo 30 - Fisuras y grietas vs. Tiempo	118
Figura 72. Curva de deterioro del grupo 30 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo	118
Figura 73. Curva de deterioro del grupo 30 - Estado de bermas vs. Tiempo..	119
Figura 74. Reporte de Análisis por regresión curva de deterioro del grupo 2 - IRI vs. Tiempo	121

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros para la evaluación el estado de las carreteras concesionadas en el ámbito nacional e internacional	35
Tabla 2. Diagnóstico de los parámetros del IE en las vías concesionadas de Colombia de las tres primeras generaciones	36
Tabla 3. Comparación de umbrales de asfalto en estados seleccionados	45
Tabla 4. Tabla recomendada de calificación para determinar el Índice de Estado en los proyectos de concesión de tercera generación	48
Tabla 5. Límites aceptables de los parámetros de calificación para un IE superior a 4.0.	48
Tabla 6. Clasificación de las concesiones según TMAP (° C).....	59
Tabla 7. Categoría de tránsito de acuerdo con Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras	61
Tabla 8. Grupos a estudiar	61
Tabla 9. Listado de proyectos de concesión	63
Tabla 10. Datos básicos del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta	64
Tabla 11. Datos de TPD del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta	65
Tabla 12. Datos de TPD por año de los tres primeros proyectos a evaluar	66
Tabla 13. Datos de Temperatura Media Pondera Anual de los tres primeros proyectos a evaluar.....	67
Tabla 14. Tipo de pavimento de los tres primeros proyectos a evaluar	68
Tabla 15. Datos de los dos primeros proyectos a evaluar	69
Tabla 16. Conjuntos de tramos viales con TMAP similares	70
Tabla 17. Clasificación del nivel de tránsito con base al Número de Ejes Equivalentes de 8.2 ton	73
Tabla 18. Clasificación de tramos por nivel de tránsito	73
Tabla 19. Valores de especificación para determinar el índice de estado en los contratos de concesión de 1G, 2G, 3G-1 y 3G-2.....	75
Tabla 20. Datos de medición del tramo 1 Proyecto PY-01 Malla Vial del Meta	77
Tabla 21. Grupos a evaluar	78
Tabla 22. Resumen del comportamiento de los modelos de cada grupo	120

ABREVIATURAS

En el texto

ANI:	Agencia Nacional de Infraestructura.
CRD:	Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento.
IE:	Índice de Estado.
INVÍAS:	Instituto Nacional de Vías.
IRI:	Índice de Rugosidad Internacional.
1G:	Primera Generación de Concesiones en Colombia.
2G:	Segunda Generación de Concesiones en Colombia.
3G-I:	Primera ola de la Tercera Generación de Concesiones en Colombia.
3G-II:	Segunda ola de la Tercera Generación de Concesiones en Colombia.
4G:	Cuarta Generación de Concesiones en Colombia.
°C:	Grados Centígrados.
TMAP:	Temperatura Media Anual Promedio.
NT#:	Nivel de Tránsito.
PF#:	Pavimento Flexible.
PR#:	Pavimento Rígido.

GLOSARIO

En el texto

Abscisa: referencia de posicionamiento en un punto de la vía. Generalmente se menciona el kilómetro (Km) de la vía donde se está ubicado.

ANI: agencia nacional estatal de naturaleza especial adscrita al Ministerio de Transporte. La ANI actúa como entidad pública contratante.

Berma: “Fajas comprendidas entre los bordes de la calzada y las cunetas. Sirven de confinamiento lateral de la superficie de rodadura, controlan la humedad y las posibles erosiones de la calzada”¹.

Calzada: zona de la vía destinada a la circulación de vehículos.

Carretera: vía diseñada para el tránsito de vehículos terrestres automotores.

Carril: parte de la calzada que puede acomodar una sola fila de vehículos de cuatro o más ruedas.

Concesionario: es la sociedad de origen privado que administra una infraestructura pública, conformada por quienes resultaron adjudicatarios en el marco del proceso de selección de un contrato de concesión de dicha infraestructura.

Concesión: es el contrato por medio del cual una entidad estatal obligada a la prestación de un servicio público confía la prestación del mismo a manera de delegación a un concesionario, quien actúa en nombre y a riesgo propio en la operación, explotación, prestación, organización o gestión de un servicio público, bien sea de manera parcial o total.²

Contrato: acuerdo voluntario de dos o más partes que genera derechos y deberes.

Deterioro: es la tendencia al empeoramiento del estado, calidad o valor de los pavimentos evaluados.

Modelo de deterioro: representación de un comportamiento de deterioro de un pavimento bajo la hipótesis de unas variables predeterminadas.

¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS-INVIAS. Glosario de Manual de diseño geométrico de carreteras. Última actualización. Bogotá. 2013.

² COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sala Plena. Sentencia C-068 del 2009. Magistrado Ponente: Mauricio González Cuervo.

Estaciones de peaje: son las instalaciones para el recaudo de las tarifas cobradas a los usuarios por el derecho de uso de la vía.

Indicadores: constituyen instrumentos de control de orden gerencial, necesarios para la evaluación de gestión. Reflejan el comportamiento de las variables que representan el estado actual o la tendencia de los procesos, programas y planes, hacen parte de los sistemas de información y facilitan la toma de decisiones. Son los indicadores de disponibilidad, calidad y nivel de servicio.

Índice de Estado: es el resultado que corresponde a la sumatoria de los productos efectuados entre la calificación ponderada de cada parámetro medido (rugosidad, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento, estado de las bermas, zonas laterales, señalización, ahuellamiento y deformaciones) por su respectivo factor de influencia. El Índice de Estado para la carretera será el promedio ponderado de los Índices de Estado calculados para los diferentes trayectos.³

Infraestructura: es cualquier equipo o construcción útil para prestar algún servicio o realizar determinada actividad (carretera, plantas de tratamiento, drenaje, energía eléctrica, aeropuertos, vías férreas, etc.).

Mantenimiento: son las actividades de mantenimiento que deberá desarrollar el concesionario sobre el proyecto durante las diferentes etapas de un contrato.

Mantenimiento periódico: “Conjunto de actividades que deben realizarse a instalaciones y equipos, con el fin de corregir o prevenir fallas, buscando que estos continúen prestando el servicio para el cual fueron diseñados”.⁴

Mantenimiento rutinario: es el conjunto de actividades que se ejecutan permanentemente a lo largo del camino y que se realizan diariamente en los diferentes tramos de la vía. Tiene como finalidad principal la preservación de todos los elementos del camino con la mínima cantidad de alteraciones o de daños y en lo posible, conservando las condiciones que tenía después de la construcción o la rehabilitación.⁵

Nivel de servicio: “Refleja las condiciones operativas del tránsito vehicular en relación con variables tales como velocidad y tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, la comodidad, los deseos de los usuarios y la seguridad vial”.⁶

³ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Términos que empiezan con I. s.f. Recuperado de https://www.ani.gov.co/glosario/letter_i

⁴ CUARTAS PÉREZ, Luis Alberto. ¿Qué es el mantenimiento? 2008. Recuperado de https://www.academia.edu/8615299/Documento_elaborado_por_I_QU%C3%89_ES_EL_MANTENIMIENTO

⁵ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Mantenimiento rutinario. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/mantenimiento-rutinario>

⁶ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Términos que comienzan con N. s.f. Recuperado de https://www.ani.gov.co/glosario/letter_n

Parámetros: hace referencia al conjunto de elementos que son objetos de medición del Índice de Estado como la rugosidad, las fisuras y grietas, la resistencia al deslizamiento, el estado de las bermas, las zonas laterales, la señalización, el ahuellamiento y deformaciones.

Probabilidad: una medida (expresada como porcentaje o medida valorativa) para estimar el grado posible de ocurrencia de un incidente o evento. Contacto con registros de la frecuencia histórica de la causa raíz de un fenómeno y su incidencia probable sobre un evento, su estimación puede realizarse mediante modelos estadísticos o matemáticos.⁷

Proyecto: se entiende como el conjunto compuesto, entre otras, por todas las actividades, servicios, bienes, obligaciones y derechos necesarios para la ejecución de un contrato.

Riesgo: “La posibilidad de que ocurra un acontecimiento que tenga un impacto en el alcance de los objetivos. El riesgo se mide en términos de impacto y probabilidad”.⁸

Tramo: longitud del trazado de una carretera al que por características topográficas se le asigna una determinada velocidad de diseño.

Tránsito: acción de desplazamiento de personas, animales y vehículos por la vía.

Unidad funcional: se refiere a cada una de las divisiones del proyecto, que corresponden cada una a un conjunto de estructuras de ingeniería e instalaciones indispensables para la prestación de servicios con independencia funcional, la cual le permitirá funcionar y operar de forma individual.⁹

Usuario: persona o conjunto de personas que hacen uso de la infraestructura de transporte.

Valores de medición: hace referencia al valor medido en campo en las unidades de medida que indique el parámetro a medir en el pavimento.

Valores de calificación: hacen referencia a la ponderación dada a los valores de medición, para otorgar una calificación en una escala de 0 a 5, según lo estipulan los diferentes tipos de contratos de concesión del modo carretero.

⁷ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Probabilidad. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/probabilidad>

⁸ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE LA FUNCIÓN PÚBLICA. Manual Técnico del Modelo Estándar de Control Interno para el Estado Colombiano MECI – DAFP – Bogotá D. C. 2014.

⁹ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Unidad funcional. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/unidad-funcional>

Vía: zona de uso público o privado destinada al tránsito de personas y/o animales.

RESUMEN

El presente trabajo de grado se desarrolla con el fin de establecer unas curvas de deterioro a partir de los valores de los parámetros del Índice de Estado (IE) de los proyectos de concesión pertenecientes a las tres primeras generaciones de concesiones viales de Colombia a cargo de la Agencia Nacional de infraestructura (ANI), así analizar, evaluar y predecir el comportamiento de los pavimentos que tienen características similares a las curvas planteadas en este proyecto.

Las curvas de deterioro se desarrollaron a través de la clasificación de los tramos de las concesiones, a partir de la calibración* del modelo agregado por el método de “Ventanas” tomando los factores de Clima (Temperatura Media Anual Promedio - TMAP), Tránsito Promedio Diario – TPD y Tipo de pavimento, como criterio de agrupación para las curvas de deterioro.

El Índice de Estado es un indicador que se establece a partir de un método de evaluación cuantitativo y cualitativo del estado físico de los pavimentos flexibles o rígidos, que es medido en un tiempo determinado (en determinado periodo de operación de una vía), y plasma las condiciones de comodidad y nivel de aceptación de la misma. Los parámetros que conforman la ecuación del IE son rugosidad - IRI, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento, ahuellamiento y deformaciones, estado de las bermas y zonas laterales y señalización.

La caracterización del tipo tráfico de cada tramo evaluado se realiza mediante la identificación del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circulan en el carril y el periodo de diseño (N) que pasa por el mismo, a su vez el clima se identifica mediante la Temperatura Media Anual Promedio (TMAP) de la región y el tipo de pavimento de los tramos depende de si el mismo es rígido o flexible.

Se establecieron como características comunes el tráfico, el clima y el tipo de pavimento por ser variables directas que influyen en el diseño del pavimento y características aplicables en un modelo agregado bajo el cual se desarrolló el trabajo. Con el fin de clasificar los tramos, las características comunes mencionadas, se establecieron teniendo las siguientes condiciones: 1. La caracterización del tipo de tráfico se realizó mediante la identificación del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circulan en el carril y el periodo de diseño (N) que pasa por el mismo; 2. La variable clima se delimitó a partir de la Temperatura Media Anual Promedio (TMAP) de la región en la que se encuentra el tramo evaluado y 3. El tipo de pavimento de los tramos depende de si el mismo es rígido o flexible.

Como resultado del trabajo se obtuvieron unos modelos que representan el comportamiento del pavimento con base a los factores del IE en un periodo de tiempo cualquiera, para tramos con características similares, evidenciándose para algunos modelos el comportamiento puede mostrar un mejoramiento y para otros de deterioro notorio, de igual manera se obtuvieron de estas curvas las ecuaciones que representa en el comportamiento de cada parámetro, obtenidas bajo un análisis de regresión lineal.

1. TÍTULO DEL PROYECTO

Análisis técnico del deterioro del pavimento de las concesiones viales de Colombia conforme a los parámetros de evaluación establecidos en los contratos de concesión para la evaluación de modelos del comportamiento de los pavimentos.

2. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES

2.1 INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de la infraestructura vial en Colombia los proyectos de concesión de primera, segunda y tercera generación (1G, 2G y 3G) son evaluados mediante el Índice de Estado (IE) con el fin de garantizar las condiciones técnicas y de seguridad vial según la normatividad colombiana, las Especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y lo establecido en los Contratos de Concesión en su parte especial.

En concordancia con lo anterior, para garantizar un adecuado nivel de servicio es necesario contar con una estructura de gestión de pavimentos propia o local que permita un seguimiento y toma de decisiones oportunas. Es por ello que en este trabajo se tienen en cuenta los parámetros de evaluación del Índice de Estado (IE) establecidos para las Concesiones viales de Colombia (1G, 2G y 3G), esto es, Índice de Rugosidad - IRI, ahuellamiento y deformaciones, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento y estado de bermas, los cuales se agruparán en grupos o familias con base en los parámetros de diseño de los pavimentos como el Clima (Temperatura Media Anual Promedio - TMAP), el Tránsito Promedio Diario – TPD y el Tipo de pavimento.

El estudio realizado por Gustavo Gamboa¹⁰ titulado “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, concluyó que parámetros como el IRI en algunos proyectos no cumplía con un nivel aceptable para la agencia, y esto se reflejaba en la afectación del nivel de servicio de las vías o IE.

Por lo anterior, la presente propuesta de trabajo de grado busca plantear un modelo de deterioro y su eventual calibración a partir de los datos recopilados de Índice de Rugosidad - IRI, ahuellamiento y deformaciones, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento y estado de bermas de la red vial de las concesiones de primera, segunda y tercera generación realizada recientemente en el marco de un proyecto de investigación desarrollado en la Escuela de Ingenieros Militares en el año 2017, que permita analizar las condiciones de una red vial y a su vez sirva de insumo para crear políticas de mantenimiento vial a quien pueda interesar.

El modelo de deterioro se desarrollará bajo la técnica de la distribución de probabilidad planteada por Solminihac y se considera un modelo de segunda fase toda vez que los datos obtenidos corresponden a los periodos en los que las carreteras han sufrido previamente intervenciones. Para el análisis del deterioro futuro se aplicará un modelo agregado que necesita ser alimentado

¹⁰ GAMBOA BELTRÁN, Gustavo. Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia,” Escuela de Ingenieros Militares. Colombia. 2017.

con la condición actual del pavimento medida en el terreno, las características climáticas existentes y el tránsito que circula en el año de evaluación del pavimento. Una vez obtenido el modelo, este se ajustará a partir del método de “ventanas”, ya que las concesiones (red vial) pueden ser agrupadas por tramos que contengan características similares y edades diferentes. De cada agrupación se reconstruirán las curvas de deterioro que serán las representativas de la red vial¹¹ y reflejarán el comportamiento del pavimento, lo que permitirá realizar proyecciones de dicho comportamiento tras conocer las condiciones de un proyecto similar, al que se le puede aplicar alguna de las curvas de deterioro que arroje esta investigación.

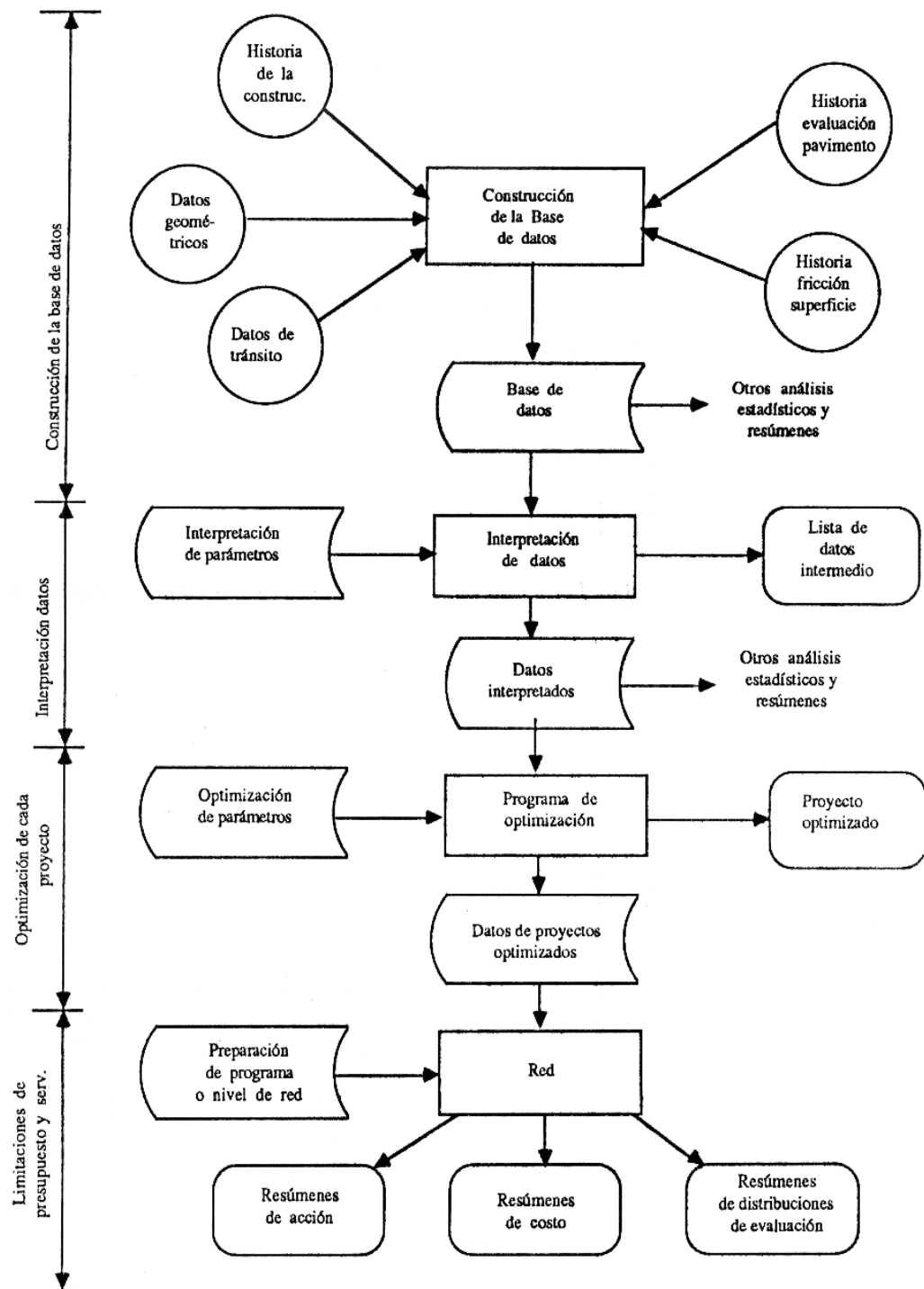
2.2 ANTECEDENTES GENERALES

El profesor Ronald Hudson¹² de la Universidad de Texas en Austin realizó un artículo en el que indicó que con la planificación sistemática de la administración de caminos se logra la disponibilidad de estos en buenas condiciones. La planificación incluye las actividades de mantenimiento, rehabilitación, nuevas construcciones, diseño de detalles de proyectos individuales y seguimiento periódico de pavimentos existentes. Esta planificación es denominada como un Sistema de Administración de Pavimentos (PMS-Pavement Management System) que consiste en la combinación de procedimientos de análisis, formularios detallados, mediciones, criterios de decisión y herramienta. Así mismo, señaló que los sistemas de administración de pavimentos constan de dos subsistemas, uno para la red y otro para el proyecto. El subsistema a nivel de la red tiene que ver con la red pavimentada como un todo, y generalmente está relacionada con las decisiones de mantenimiento y rehabilitación, mientras que el subsistema a nivel de proyecto corresponde a las decisiones de reconstrucción o de una construcción nueva. Los niveles que conforman el sistema se producen a partir de una base de datos y están conformadas por cinco componentes, que son 1) la historia de la construcción, 2) el inventario, 3) el tránsito, 4) la resistencia al deslizamiento y 5) la condición del pavimento. A través de la Figura 1 se ilustra el diagrama de flujo correspondiente al Sistema de Administración de Pavimentos en el estado de Washington:

¹¹ SOLMINIHAC TAMPIER, Hernán de. Gestión de Infraestructura Vial. Universidad Católica de Chile. 3ra Edición, 2003; p. 230.

¹² HUDSON, Ronald. Una revisión de las experiencias en la administración de pavimentos urbanos en los Estados Unidos. En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 3 (1987); p. 15.

Figura 1. Flujo del Sistema de Administración de Pavimentos en el estado de Washington



Fuente: Ibíd.

Es así como algunos sistemas de administración de pavimentos pueden combinar rugosidad, deterioro de pavimento, capacidad estructural, resistencia al deslizamiento y evaluación estructural no destructiva de ensayos de deflexión. El autor en cuestión aclaró además que al aumentar el número de aspectos considerados aumenta también la dificultad para asignar factores adecuados de ponderación, sin embargo, esto se ha hecho cuando se consideró necesario. Ahora bien, la combinación de datos se puede utilizar para 1) establecer prioridades, 2) resumir la condición total de los pavimentos en la red, por ejemplo "salud " del sistema, 3) desarrollar curvas de comportamiento (predicciones) en el tiempo, y 4) proporcionar tendencias de comportamiento a nivel de presupuesto. Dentro de los factores que hacen parte de la planificación de un Sistema de Administración de Pavimentos, según el autor se cuentan los siguientes:

1. Disponibilidad de recursos.
2. Requisitos de información.
3. Nivel de sofisticación (terminaciones).
4. Manejo de datos.
5. Informes.
6. Administración.

Asimismo, el factor 2 "Requisitos de información" tiene tres archivos de datos considerados por las instituciones, estos son I) diseño y construcción, II) historia del mantenimiento y III) condición del pavimento. En el primer archivo de datos (diseño y construcción) se puede incluir información relativa a los parámetros relacionados con la construcción o reconstrucción, por ejemplo, fechas, tránsito, soporte del suelo, materiales y espesor de capas. El segundo archivo de datos (la historia del mantenimiento) puede incluir información relativa a lo que fue hecho para mantener un tramo, así como su tiempo y costo. También se pueden tener en cuenta los recubrimientos, los tratamientos superficiales, las reparaciones de base y sellado de grietas, como ejemplos específicos de actividades de mantención. Y para el último archivo de datos, correspondiente a la información de la condición de pavimento, este puede variar dependiendo de la experiencia local. Así, se divide de acuerdo con el tipo de pavimento, para los flexibles incluye 1) tipo de superficie, 2) agrietamiento transversal, 3) fatiga, 4) deformación, 5) deterioro de bordes (agrietamientos, levantamiento de bermas), 6) agrietamiento en bloque, 7) parche, 8) cortes para servicios, 9) rodado y 10) desgaste. Por otra parte, para pavimentos rígidos muchos de los tipos de deterioro son iguales a los de los flexibles, sin embargo, se incluyen 1) deterioro de juntas, 2) escalonamiento, 3) daño en el sello de juntas y 4) agrietamiento de tipo "D".

De igual manera, el autor¹³ resaltó que el establecimiento de la base de datos es probablemente el paso inicial de mayor importancia en el desarrollo de un sistema PMS. Así pues, una vez que se ha recogido el dato y el sistema decide continuar esta recolección, se pueden definir los procedimientos para estimar necesidades, priorizar mantención, desarrollar programas para obtener otras importantes salidas del PMS.

Acerca del desarrollo de modelos predictivos, que es el tema del presente trabajo, el autor manifestó que una vez se hayan obtenido los datos, los mismos pueden ser analizados con el propósito de observar si los modelos predictivos se pueden realizar para estimar la vida del pavimento que se obtendría con diferentes tipos de nueva construcción, diferentes acciones de rehabilitación y mantención para distintos niveles de tránsito y tipos de suelo. De acuerdo con él, mediante tales modelos predictivos se pueden desarrollar estrategias de optimización que sean más precisas, de manera que las prioridades de mantención y rehabilitación estén definidas en forma más clara y precisa. Por este motivo, recomendó desarrollar modelos predictivos y estrategias de optimización basados en la experiencia y condición de los pavimentos en una ciudad específica, pues esta es una opción más eficaz que atenerse a modelos predictivos que se fundamentan en experiencias de otros lugares.

Siguiendo el Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos elaborado por la Dirección de Viabilidad de Chile¹⁴ a raíz de que la Red Básica hacia el año 1975 requería importantes intervenciones, estableciéndose mediante estudios la necesidad de ejecutar la conservación, la rehabilitación y el refuerzo de los pavimentos de aproximadamente 4.000 Km, con una suma de 95 millones de dólares anuales entre el periodo de 1980-1990. El desarrollo de dicho plan se realizó con el objeto de que se cumpliera lo siguiente:

1. El pavimento puede requerir actuaciones que lo protejan de futuros daños que demanden acciones más costosas, aunque su serviciabilidad presente sea satisfactoria.
2. Establecer umbrales indicativos a partir de los cuales se precisa determinada intervención sobre el pavimento.
3. Establecer políticas de conservación a nivel de la carretera y de la red.
4. Presupuestar la conservación necesaria y suficiente.
5. Verificar los parámetros de diseño que caracterizan el entorno propio del territorio.

¹³ Ibíd.

¹⁴ GUTIÉRREZ, Pablo; ROMERO, Francisco y SALGADO, Jorge. Sistema de gestión y seguimiento de pavimentos. En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 2 (1987); p. 34.

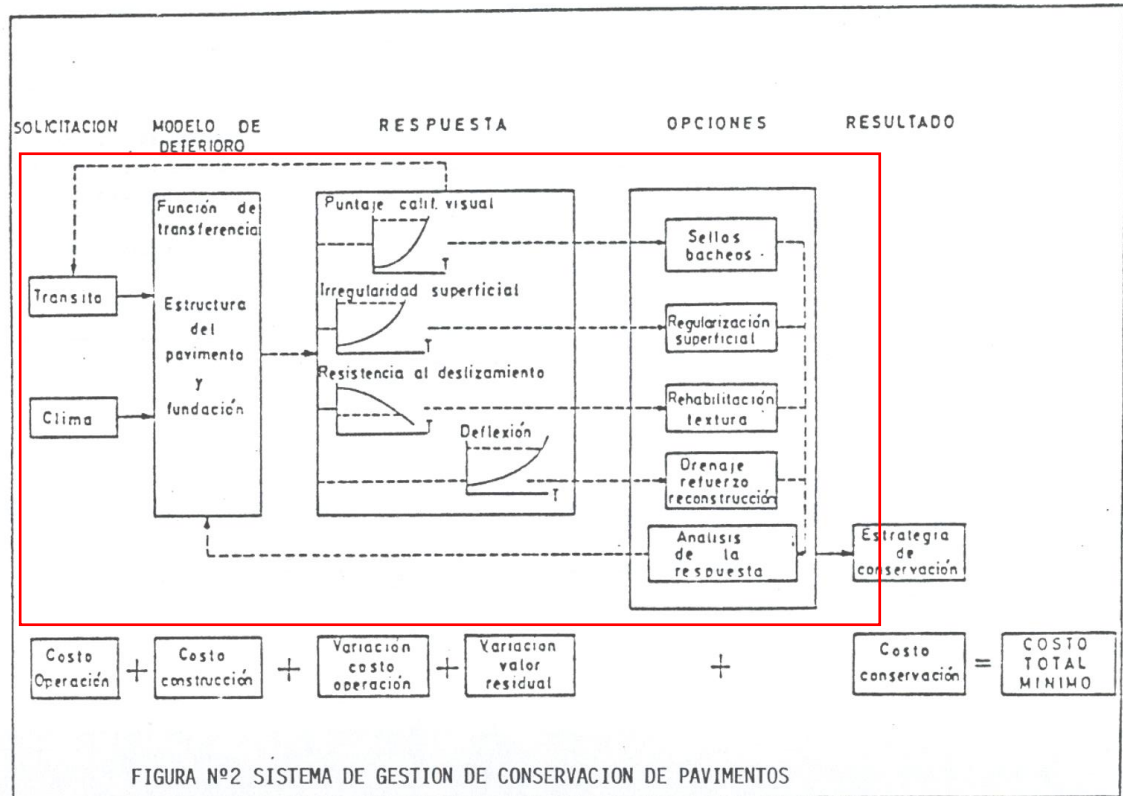
6. Actualizar las hipótesis de diseño (tránsito, clima y estructuración).

La meta de dicho plan es implantar un “Sistema de Gestión para la Conservación de Pavimentos” que minimice el costo total del transporte por carretera, sobre los costos del usuario y el valor residual del pavimento. Lo anterior es posible mediante los siguientes aspectos:

- Evaluar los efectos de la calidad de construcción sobre el comportamiento real del pavimento, comparándolo con el método de diseño empleado en el proyecto.
- Evaluar las causas del deterioro local, identificando aquellos provenientes de vicios y omisiones del proyecto y/o de la ejecución, con el fin de tomar las medidas precautorias.
- Evaluar los efectos del entorno, temperatura, humedad y calidad de la fundación (subrasante) sobre la evolución del pavimento, y el efecto del tránsito acumulado.
- Determinar la conservación requerida para mantener un rendimiento funcional adecuado.
- Evaluar los costos de conservación, construcción, operación y valor residual de los pavimentos.

En la Figura 2 se muestra la relación entre la sollicitación y la evolución del pavimento, en la que las “sollicitaciones” del sistema son el tránsito (cuantificado por los ejes equivalentes) y el clima (efectos de la temperatura e intensidad y duración de las precipitaciones), y a cada una de estas le corresponde una “respuesta” determinada por la función de la estructura del pavimento y su fundación. Dentro de las respuestas identificadas están la Irregularidad Superficial (medida por la magnitud de las deformaciones, longitudinal y transversal de la rasante del pavimento), la resistencia al deslizamiento (medida por el coeficiente de fricción entre la superficie del pavimento y los neumáticos de los vehículos), la luminosidad (que afecta la visibilidad cuando la superficie mojada es muy lisa o no provee facilidad de escurrimiento superficial), el Deterioro Superficial (índice que refleja la intensidad del daño del pavimento ponderando fisuras, grietas, pérdidas de material y baches) y el Comportamiento Estructural (la variación de la condición estructural en el tiempo, medida a partir de la respuesta del pavimento sometido a una carga).

Figura 2. Sistema de Gestión de Conservación de Pavimentos de la Dirección de Viabilidad de Chile



Fuente: Ibíd.

De igual manera, es posible observar en la anterior figura que se presentan dos modelos de deterioro superficial y estructural para establecer estrategias de intervenciones oportunas, que conlleven a la conservación de los pavimentos. Es importante mencionar que el modelo de deterioro superficial pretende predecir las condiciones futuras del pavimento, teniendo en cuenta los parámetros de ahuellamiento, la resistencia al deslizamiento, la rugosidad (IRI) y el deterioro superficial, que se realiza mediante una inspección visual.

Igualmente, es de resaltar que el modelo de deterioro estructural se basa en un análisis elástico multicapa; la Pontificia Universidad Católica de Chile desarrolló un software que permite la resolución numérica de las ecuaciones que definen el estado tensional de las distintas capas de pavimento; para el modelo de deterioro estructural se emplean los software desarrollados en las universidades de Texas y California, utilizados para estimar los módulos elásticos y las tensiones y deformaciones de las capas de pavimento; para ello se basan en módulos elásticos iniciales supuestos. Por consiguiente, con estos programas se podrá predecir el comportamiento de la estructura de pavimento a través de la evaluación de las tensiones y deformaciones presentes.

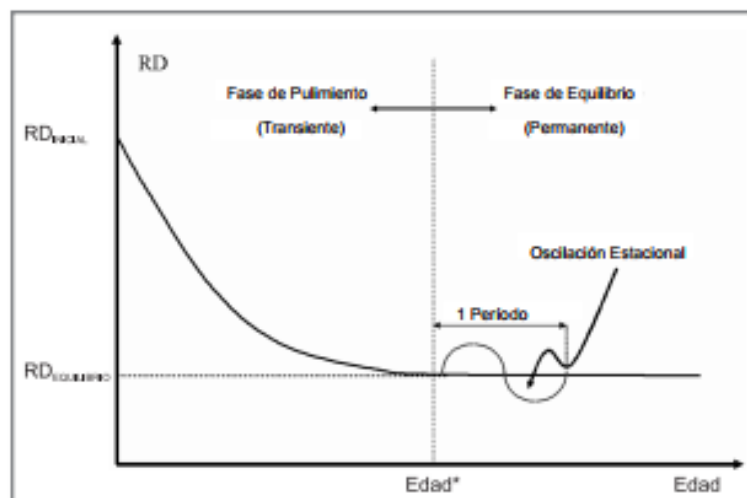
Respecto a ello, los autores recalcaron que posterior a la obtención de estos modelos corresponde la determinación de las leyes de fatiga de los materiales, que facilitan la estimación de la vida remanente del pavimento.

Por otra parte, el objetivo del artículo realizado por Hernán de Solminihac, Tomás Echaveguren y Marcelo Bustos fue el que sigue:

Realizar un análisis de los modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento tanto desde el punto de vista de su conceptualización como desde su formalización matemática [...] reúnen características de modelos variacionales (efecto de la temperatura, presencia de polvo en la superficie del pavimento, profundidad y tipo del dibujo del neumático) y [...] de modelación estática (dinámica del automóvil, sus maniobras y la interacción neumático – pavimento) para explicar los cambios en el tiempo de la resistencia al deslizamiento.¹⁵

En cuanto al comportamiento en el tiempo de la resistencia al deslizamiento, tal y como se evidencia en la Figura 3, se produce un decaimiento desde el momento mismo en que se habilita al tránsito un pavimento hasta estabilizarse:

Figura 3. Comportamiento de la resistencia al deslizamiento según la edad del pavimento



Fuente: Ibíd.

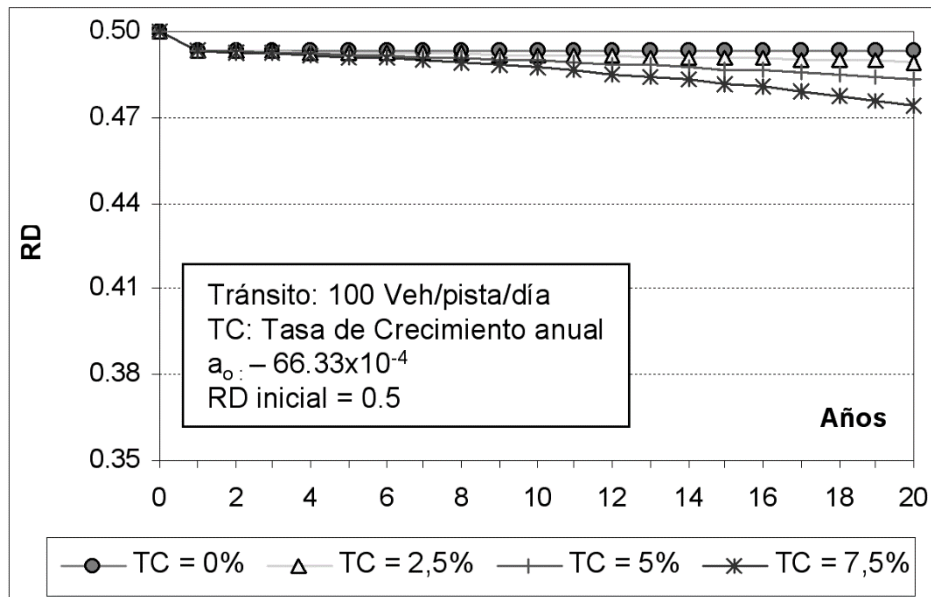
Esto indica que los factores ambientales tienen tres efectos, a saber, el térmico, el efecto de las precipitaciones y el efecto del intemperismo. El efecto de las precipitaciones sobre el pavimento reduce en corto tiempo la resistencia al deslizamiento, pero en cambio, produce a largo plazo las precipitaciones, de tal manera que de acuerdo con la estación del año la resistencia al deslizamiento oscila. La temperatura del pavimento aumenta conforme a la temperatura

¹⁵ SOLMINIHAC, Hernán de; ECHAVEGUREN, Tomás y BUSTOS, Marcelo. Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos, En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 21, No. 3 (2006), p. 158.

ambiental, así mismo los valores de resistencia al deslizamiento, debido a que se presenta una transferencia de calor hacia el neumático, que lo deforma y aumenta los puntos de contacto en el pavimento como tal.

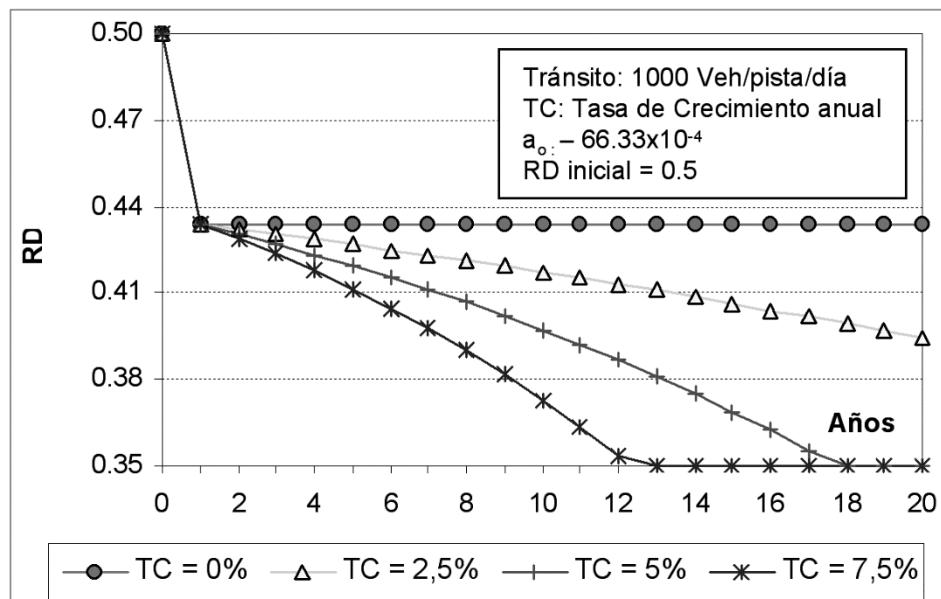
Cabe decir que el efecto del tráfico en pavimentos asfálticos contribuye a la pérdida de resistencia al deslizamiento (ver Figura 4), ya que la relación de vacíos favorece la compactación que reduce la macrotextura hasta su máxima compactación; dicho proceso puede observarse en la figura a continuación:

Figura 4. Efecto del tránsito bajo en la resistencia al deslizamiento



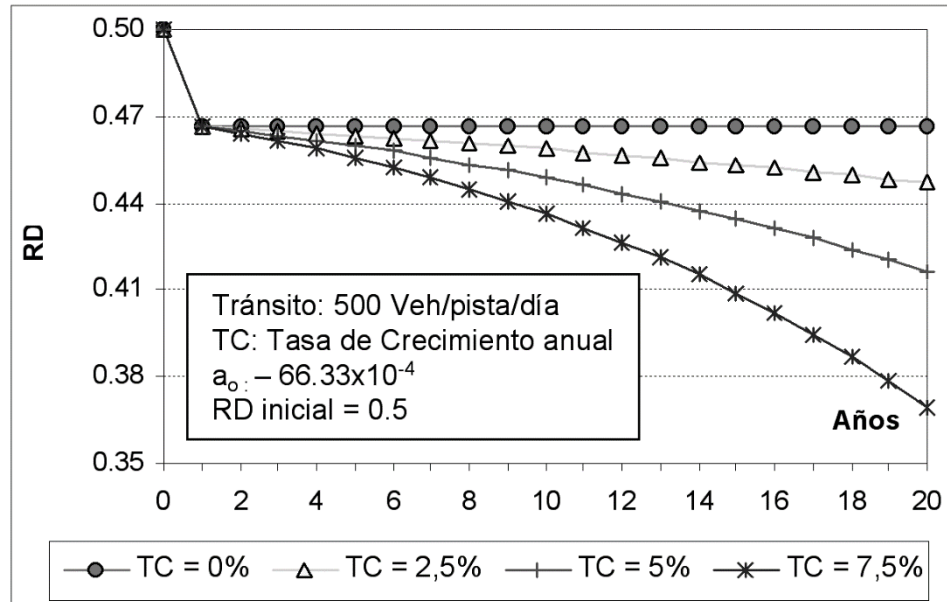
Fuente: Ibíd.

Figura 5. Efecto del tránsito medio en la resistencia al deslizamiento



Fuente: Ibíd.

Figura 6. Efecto del tránsito alto en la resistencia al deslizamiento



Fuente: Ibíd.

Así las cosas, los factores asociados al pavimento, que son las características de los materiales empleados, la terminación de la superficie, la condición de la superficie y la geometría del trazado vial, determinan la susceptibilidad del pavimento ante las condiciones ambientales y de tráfico.

3. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN

En el estudio realizado por Gustavo Gamboa¹⁶, titulado “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, se evidenció que a raíz de la no ejecución oportuna existieron periodos en los que no se daba cumplimiento a los indicadores de Índice de Rugosidad - IRI, ahuellamiento y deformaciones, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento y estado de bermas, que son parámetros establecidos en los Contratos de Concesión, por eso se afectaba de manera directa la vida útil del pavimento y su desempeño. En esa medida, se formula en esta investigación un análisis del deterioro de las vías Concesionadas a partir de los parámetros de diseño que son Clima (Temperatura Media Anual Promedio - TMAP), Tránsito Promedio Diario – TPD así como del tipo de pavimento, en relación con los parámetros de evaluación ya mencionados; tal como lo expresaron Hernán de Solminihaç, Tomás Echaveguren y Marcelo Bustos, “la resistencia al deslizamiento (RD) [...] está influida por las características del pavimento, por condiciones ambientales, de tráfico y geométricas, [...] se manifiestan con diversa intensidad en el tiempo”¹⁷.

En ese orden de ideas, con la realización de esta investigación se propone construir curvas de deterioro obtenidas a partir de la información del proyecto anterior, en la medida en que con dicha información se tendrán elementos de juicio locales teniendo en cuenta los límites establecidos por la especificación técnica colombiana; cobran relevancia en este punto Carlos Videla y Gerardo Echeverría, cuando señalaron que “el conocimiento del estado de los pavimentos y la predicción de su deterioro en el tiempo, permiten definir el tipo de falla y asignar las acciones de conservación técnicamente adecuadas y lo que es más importante, con la anticipación suficiente para que su programación física y financiera asegure su ejecución en el momento oportuno”¹⁸.

Entonces, con esta investigación se pretende comparar, evaluar y analizar el comportamiento y deterioro de las vías del territorio colombiano, en aras de generar una herramienta que permita la toma de decisiones oportunas en cuanto al mantenimiento y la conservación de dichas vías; para estos efectos, se deben destinar los recursos técnicos y financieros con la debida antelación y programación de intervenciones en los tiempos estimados por la metodología; de tales procedimientos se espera lograr el normal y continuo funcionamiento

¹⁶ GAMBOA BELTRÁN, Op. Cit.

¹⁷ SOLMINIHAC, Hernán de; ECHAVEGUREN, Tomás y BUSTOS, Marcelo, Op. cit., p. 157.

¹⁸ VIDELA, Carlos y ECHEVERRÍA, Gerardo. Administración de la conservación de pavimentos: un caso de transferencia y adaptación tecnológica. En: Revista de Ingeniería de Construcción. No. 10. Chile (1991), p. 92.

de las vías concesionadas, por ende, los principales beneficiarios de este estudio serán las concesiones viales futuras y los usuarios de las mismas.

Así pues, en la presente investigación la metodología se establece en aras de obtener una mejor gestión de las carreteras en los corredores viales concesionados. La propuesta comprende la implementación de curvas de deterioro para indicadores que se pueden obtener de las mediciones de algunos parámetros de las carreteras, como es el caso del IRI.

4. OBJETIVOS Y ALCANCE

4.1 OBJETIVO GENERAL Y ALCANCE

Obtener curvas de deterioro de los parámetros de Índice de Rugosidad – IRI, ahuellamiento, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento y estado de bermas a partir de un modelo de deterioro agregado de las vías Concesionadas de Colombia (1G, 2G y 3G), que sirvan a las partes interesadas (Estado, concesionarios, diseñadores u usuarios de las vías) en la toma de decisiones para la proyección de mantenimientos o rehabilitaciones futuras, sobre un corredor vial determinado, nuevo o existente.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los factores Clima (Temperatura Media Anual Promedio - TMAP), Tránsito Promedio Diario – TPD, así como el tipo de pavimento, de 22 Concesiones Viales de Colombia a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI.
- Desarrollar un modelo agregado a partir de los parámetros de Índice de Rugosidad - IRI, ahuellamiento y deformaciones, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento y estado de bermas a partir del proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales De Colombia” encaminadas a un análisis de red*.
- Elaborar las curvas de deterioro de cada grupo de la red vial (Concesiones de Colombia de primera, segunda y tercera generación) a partir de la calibración* del modelo agregado por el método de “Ventanas” tomando los factores de Clima (Temperatura Media Anual Promedio - TMAP), Tránsito Promedio Diario – TPD y Tipo de pavimento, como criterio de agrupación para las curvas de deterioro.
- Analizar el comportamiento de cada grupo de curvas de deterioro identificando la incidencia de estos comportamientos en el nivel de servicio que recibe el usuario de la vía.

5. ESTADO DEL ARTE

Según el estudio realizado por Fernando Sánchez Sabogal⁹, ante la preocupación que causa la imposibilidad de alcanzar un Índice de Estado (IE) mínimo de 4.5 en los proyectos de 3G en la etapa de operación de la vía, es recomendable llevar a cabo una clasificación a partir de la cual sea posible determinar dicho Índice de Estado en los proyectos de concesión de tercera generación, como se muestra a continuación (ver Figura 7):

Figura 7. Clasificación Índice de Estado según análisis Sánchez Sabogal

Elemento	Unidad de medida de calificación	Rango de calificación			
		Muy bueno 5 - 4	Bueno 4 - 3	Regular 3 - 2	Malo 2 - 0
Rugosidad (R)	IRI	1 – 2.5	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
Ahuellamientos y otras deformaciones (A)	mm	0 – 10	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
Fisuras (F)	% área afectada	0 – 0.5	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
Resistencia al deslizamiento (D)	Coefficiente resistencia al deslizamiento (CDR)	100 – 55	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable

Fuente: Ibíd.

Por otro lado, conforme a la investigación realizada por Felipe Sánchez¹⁹ que lleva por nombre “Análisis de la Evolución de los Criterios de Evaluación Técnica y su Influencia en el Estado de las Carreteras Concesionadas en Colombia”, se compararon las mediciones de los parámetros de evaluación que tienen en común cada generación de concesiones en Colombia, como conclusión se indicó que los modelos de deterioro pueden ser una gran herramienta de control para las entidades estatales y los concesionarios. Así mismo, se encontró que las exigencias en Colombia son similares a las de otros países latinoamericanos pero es evidente que son más exigentes para los parámetros de ahuellamiento y rugosidad, lo cual se puede apreciar en la Tabla 1 que a continuación se va a presentar, en la que el autor comparó los parámetros de evaluación en países como Argentina, Chile, Ecuador, México y Perú, y las cuatro generaciones de concesiones viales que existen en Colombia.

⁹ SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Sobre el Índice de Estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales [en línea]. Bogotá D.C.: Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2014.

¹⁹ SÁNCHEZ MEJÍA, Felipe. Análisis de la Evolución de los Criterios de Evaluación Técnica y su Influencia en el Estado de las Carreteras Concesionadas en Colombia. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil – Infraestructura Vial. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, 2016. p. 49

Tabla 1. Parámetros para la evaluación el estado de las carreteras concesionadas en el ámbito nacional e internacional

Criterio	Parámetro	Medida	Muy bueno		Bueno		Regular		Malo		
			superior	inferior	superior	inferior	superior	inferior	superior	inferior	
			5	4	4	3	3	2	2	0	
1G	Rugosidad	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12	
	Ah y Def	mm	0	25	25	40	40	60	60	100	
	Fis y Gri	% area afect	0	6	6	8	8	9	9	10	
	R. Deslizamiento	Coeficiente	100	45	45	0	45	0	45	0	
2G	Rugosidad	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12	
	Ah y Def	mm	0	15	15	25	25	40	40	100	
	Fis y Gri	% area afect	0	1	1	5	5	10	10	15	
	R. Deslizamiento	Coeficiente	100	55	55	45	45	35	35	0	
3G-I	Rugosidad	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12	
	Ah y Def	mm	0	6	6	13	13	25	25	40	
	Fis y Gri	% area afect	0	1	1	5	5	10	10	15	
	R. Deslizamiento	Coeficiente	100	55	55	45	45	35	35	0	
3G-II	Rugosidad	m/km	1	2,5	2,5	3,5	3,5	5,5	5,5	12	
	Ah y Def	mm	0	10	10	20	20	35	35	50	
	Fis y Gri	% area afect	0	0,5	0,5	3	3,1	5	5	10	
	R. Deslizamiento	Coeficiente	100	55	55	45	45	35	35	0	
4G	Rugosidad	m/km	3	(ANI, 2015)							
	Ah y Def	mm	15								
	Fis y Gri	% area afect	1								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	45								
Argentina	Rugosidad	m/km	3,2	(Dirección Nacional de Vialidad de Argentina, 2010)							
	Ah y Def	mm	12								
	Fis y Gri	% area afect	5								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	N/A								
Chile	Rugosidad	m/km	3,5	(Coordinación de Concesiones de Obras Públicas Gobierno de Chile, 2010)							
	Ah y Def	mm	15								
	Fis y Gri	% area afect	10								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	N/A								
Ecuador	Rugosidad	m/km	3,5	(Gobierno Provincial de Las Guayas Unidad de Concesiones de Ecuador, 1997)							
	Ah y Def	mm	6								
	Fis y Gri	% area afect	N/A								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	55								
México	Rugosidad	m/km	2,81	(Dirección General de Desarrollo Carretero de México, 2015)							
	Ah y Def	mm	15								
	Fis y Gri	% area afect	N/A								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	60								
Perú	Rugosidad	m/km	3,5	(Ministerio de Comunicaciones y Transporte del Perú, 2009)							
	Ah y Def	mm	12								
	Fis y Gri	% area afect	15								
	R. Deslizamiento	Coeficiente	N/A								

Fuente: Ibíd.

En tal investigación el autor concluyó que las exigencias en los parámetros de medición son similares a las de otros países de Latinoamérica, sin embargo, el ahuellamiento y la rugosidad son más exigentes en Colombia.

Por otra parte, Felipe Sánchez²⁰ identificó que no existe una relación directa entre la mayor exigencia en los parámetros del IE y una mejor gestión de los

²⁰ Ibíd. p. 49.

concesionarios, y que lo mismo tampoco se refleja en mejoras en las mediciones de los parámetros del IE.

Otro estudio que es relevante para los fines del aquí expuesto, es el realizado por Gustavo Gamboa²¹, titulado “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, pues allí se realizó la recolección de datos del Índice de Estado (IE) de 23 proyectos de las diferentes generaciones de concesiones viales 1G a 4G, con lo cual se logró identificar cuáles son los parámetros críticos que presentan un mayor grado de incumplimiento dentro del Índice de Estado (IE) de estas concesiones, mostrando un diagnóstico general de las vías colombianas concesionadas.

Tabla 2. Diagnóstico de los parámetros del IE en las vías concesionadas de Colombia de las tres primeras generaciones

	RESULTADO GENERAL DE LAS TRES GENERACIONES DE CONCESIONES															
	Rugosidad IRI		Ahuellamientos y Deformaciones		Fisuras y Grietas		Resistencia al Deslizamiento		Bermas		Zonas Laterales		Señalización		Deformaciones	
Total Muestra	2737	100%	2737	100%	2737	100%	2737	100%	2108	100%	1169	100%	1170	100%	421	100%
Muy bueno	1661	61%	2438	89%	1828	67%	2184	80%	1967	93%	1150	98%	621	53%	388	92%
Bueno	830	30%	223	8%	526	19%	485	18%	95	5%	18	2%	402	34%	28	7%
Regular	214	8%	50	2%	190	7%	40	1%	30	1%	1	0%	109	9%	4	1%
Malo	32	1%	26	1%	193	7%	28	1%	16	1%	0	0%	38	3%	1,00	0%

Fuente: Gustavo GAMBOA. Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”

Ahora bien, es oportuno añadir que el Sistema de Administración de Vías Urbanas (S.A.V.U) para Bogotá “fue desarrollado para cubrir las necesidades viales de una ciudad en visión de mejorar la red deteriorada, para elevarla a un nivel de servicio aceptable, tener un plan de trabajo y mantenimiento y estimar su inversión”²²; en este orden de ideas, el sistema considera en primera medida

²¹ GAMBOA BELTRÁN, Op. Cit.

²² TECHNOLOGY AND MANAGEMENT LTD. Sistema de Administración de Vías Urbanas (S.A.V.U) para la Malla Vial de Bogotá – Colombia [en línea]: 6.- Elaboración del subsistema de

la creación de la base de datos, que es producto del inventario de la red vial; en segundo lugar se deben tener en cuenta las condiciones actuales del pavimento; en tercer lugar, la predicción del desempeño del pavimento, al igual que las condiciones actuales de la red. Dentro de estos parámetros, es necesario considerar la efectividad de varios tratamientos (costo, vida, y retorno económico); una vez recopilada toda la información relativa al programa de gestión, se integra la base de datos del programa, ya que esto es lo que permitirá el análisis. El programa contempla dos módulos o subsistemas a ejecutarse para procesar la información, que son por un lado, la Subsistencia de Gestión de Pavimentos y por otro, la Subsistencia de Mantenimiento. En palabras de TNM- Technology and Management, que es la creadora de este sistema:

Mediante el módulo de gestión de pavimentos se permite la planificación a corto, mediano y largo plazo; dando soluciones de rehabilitación y la justificación económica de las inversiones. Este subsistema procesa los datos para determinar las alternativas factibles para la rehabilitación, adicionalmente, mediante el módulo de gestión de pavimentos se permite la planificación a corto, mediano y largo plazo; dando soluciones de rehabilitación y la justificación económica de las inversiones. Este subsistema procesa los datos para determinar las alternativas factibles para la rehabilitación, la intervención de los proyectos está en orden descendente con respecto a su razón de beneficio/costo. Es decir, se intervienen primero los de mayor relación beneficio/costo. Los beneficios se refieren a los ahorros en costos operativos de los usuarios a lo largo de la vida del tratamiento. Los costos son la inversión para el tratamiento seleccionado, incluyendo supervisión o monitoreo, para llegar a la optimización multianual, bajo un presupuesto limitado, se utiliza el Método de Incremento de Beneficio Costo (IBC). Este sistema permite ordenar los proyectos factibles de acuerdo al proyecto que tiene el mayor IBC y que su costo entra dentro de las limitantes del presupuesto, este será el primero en ser ejecutado; si queda presupuesto, se analizan los siguientes proyectos cuyo IBC es positivo (lo que significa que el Beneficio es más alto que los Costos) y así sucesivamente hasta agotar el presupuesto en el horizonte planificado.²³

De otra parte, la Universidad de Costa Rica en una de sus investigaciones resaltó:

La Compañía TNM - Technology and Management ha desarrollado un sistema de gestión vial y de espacio público dirigido a la administración de la red vial urbana, de las áreas destinadas al espacio público peatonal, así como de los puentes vehiculares y peatonales de la ciudad de Bogotá - Colombia, el cual a su vez incluye la calibración de modelos de deterioros de pavimentos mediante la medición directa y periódica de las variables que influyen en dicho deterioro. El

gestión y mantenimiento. Bogotá: Cía T&M -. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.construdata.com/BancoConocimiento/S/savu/savu6.htm>

²³ Ibíd.

diseño de este sistema se encuentra orientado a proveer una herramienta sistemática que permita a la Administración Distrital determinar el alcance de las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación sobre la infraestructura vial y de espacio público en cualquier instante del tiempo, a priorizar dichas actuaciones y a optimizar los recursos disponibles, con miras a mantener un nivel de servicio dado en términos de su estado funcional y estructural, el principal insumo para realizar la gestión proyectada sobre la infraestructura de malla vial consiste en los datos de inventario y diagnóstico relevados por diversos consultores, durante los últimos cinco años, obtenidos utilizando tecnologías y equipos de última generación tales como el deflectómetro de impacto y el rugosímetro láser. Esta información se encuentra debidamente organizada y almacenada en una base de datos, de igual forma, dentro de los inventarios y diagnósticos realizados, se encuentra incluida la infraestructura asociada al espacio público, en la cual se consigna información de andenes, sardineles, separadores, ciclorutas y mobiliario urbano. Con relación a la información de puentes, aún no se cuenta con un inventario de ellos, pero se han definido las variables a recolectar para llevar a cabo una gestión adecuada de los mismos²⁴.

De acuerdo con los autores José Gonzalo Ríos Marín e Iván Darío Martínez Arias, en su investigación titulada “Sistema de Administración de Pavimentos sobre la ciudad de Bogotá”:

Para evitar el deterioro de los pavimentos se establecen procedimientos de administración vial capaces de generar un completo control en cuanto a mantenimiento y rehabilitación. Para realizar dichos procesos se establecen estrategias que permiten identificar el problema, establecer el estado de la vía y consecuentemente proponer el tipo de tratamiento requerido. Lo ideal sería que no se realizaran actividades de rehabilitación, sino que a través de actividades previas de supervisión, se ejecutara un mantenimiento preventivo que garantice el buen estado de los pavimentos. La Gestión de Pavimentos, es una disciplina que engloba todas las actividades involucradas en la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de carreteras. En concordancia con lo anterior, esta Gestión de Pavimentos constituye una de las funciones más importantes para cualquier entidad responsable del desarrollo y el mantenimiento de infraestructura vial. El presente artículo muestra la forma en que el gobierno local de la ciudad de Bogotá por intermedio de su Sistema de Administración de Pavimentos del IDU, pretende controlar y mantener en óptimas condiciones su Infraestructura Vial espacio público y puentes ya que es una herramienta sistematizada que presta ayuda en la evaluación tanto técnica como económica de los proyectos de mantenimiento, de la infraestructura vial y de espacio público de la ciudad.”, de igual manera, “las estrategias de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras del pavimento son de vital importancia a lo largo de su vida útil, ya que estas se van deteriorando con el tiempo y con el tránsito, el objeto de la administración de

²⁴ BENZADÓN, Miguel Ángel; DUARTE, Jorge y HERNÁNDEZ, Marcela. Diseño e Implementación de un sistema de Gestión vial y de espacio público para Bogotá, Colombia. [en línea] Costa Rica: Revista Infraestructura Vial de la Universidad de Costa Rica, febrero de 2007. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: - <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2061>

pavimentos es la preservación de la inversión inicial mediante la aplicación oportuna de tratamientos adecuados de mantenimiento y rehabilitación para prolongar la vida del pavimento, el mantenimiento y rehabilitación cubren un rango de actividades bastante extenso, que varía desde la corrección de defectos superficiales para mejorar la calidad de la circulación vehicular, hasta las operaciones de reconstrucciones, destinadas a recuperar totalmente la capacidad estructural de la calzada. Debe considerarse que un Sistema de Administración de Pavimentos, por su parte el IDU, la misión institucional del IDU se enfoca en la ejecución de proyectos de infraestructura física y acciones de mantenimiento y rehabilitación. Lo anterior, enfocado principalmente a disminuir los costos sociales de la población, entendidos como los costos de operación vehicular, tiempos de viaje, costos ambientales y costos por accidentes, para lograr este objetivo se debe disponer de una completa información del estado de la infraestructura administrada por la Entidad, así como de la formulación, por personal especializado, de programas de mantenimiento que permitan la prevención y corrección de deterioros oportunamente, con este objetivo se utilizan los sistemas de gestión, que sirven de herramienta para ayudar a la decisión, seleccionando las acciones más adecuadas, determinando su costo y fijando sus prioridades, siempre dentro de las disponibilidades de recursos de la Entidad.²⁵

En este punto, es conveniente traer a colación lo dicho por Greivin Picado Muñoz:

Debido al problema de planificación que existe a nivel de Red Vial Cantonal en Costa Rica, gran cantidad de caminos cuentan con un nivel avanzado de deterioro y reciben actividades de mantenimiento que no son adecuadas, lo cual se traduce en un alto costo para los gobiernos locales. Esto se debe a que muchas de las Unidades Técnicas de Gestión Vial Municipal no cuentan con estudios e información básica necesaria para generar las curvas de deterioro que permitan establecer un modelo e identificar el estado de las carreteras, adicionalmente por medio de realizar una evaluación de los caminos de la Gran Área Metropolitana, en las provincias de San José, Alajuela, Cartago y Heredia; de manera que se pueda conocer la condición en la que se encuentran, así como, obtener las curvas de deterioro a partir de la información recolectada en campo, Con las curvas de deterioro encontradas y la ecuación que incluye el factor de incertidumbre se obtiene una herramienta muy útil para generar un modelo de deterioro de los caminos, de manera que los encargados de la planificación en las Unidades Técnicas, puedan definir el tipo y tiempo óptimo de las intervenciones requeridas, así como una adecuada administración de los recursos²⁶.

²⁵ RÍOS MARÍN, José Gonzalo y MARTÍNEZ ARIAS, Iván Darío. Sistema de administración de Pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. [en línea] Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2_28.pdf

²⁶ PICADO MUÑOZ, Greivin. Desarrollo de las curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre. [en línea] Costa Rica: Revista Infraestructura Vial de la Universidad de Costa Rica, julio de 2016. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/27762>

Por su parte, Rodríguez Moreno, Theboux Zeballos y González Vaccarezza, afirmaron lo siguiente a respecto:

Los modelos de comportamiento permiten predecir la condición de deterioro de un pavimento y el desarrollo de programas de mantenimiento. Normalmente cuando se evalúa el desempeño de un pavimento a través del modelo de deterioro, el pronóstico corresponde a un valor determinista. Sin embargo, los proyectos de ingeniería de pavimentos tienen un grado de incertidumbre, lo que implica que el adecuado desempeño de la solución no puede ser totalmente asegurado. El objetivo de esta investigación es el de incorporar la probabilidad en el pronóstico del modelo de agrietamiento estructural, para lo cual se utilizó el modelo de iniciación y progresión del agrietamiento del programa HDM-4 bajo diferentes escenarios, definidos según la ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural de carreteras chilenas. Para incorporar la probabilidad en el modelo de comportamiento, se desarrolló un simulador que reproduce el deterioro para un ciclo de veinticinco años de vida, en el cual las variables descriptivas del modelo de comportamiento se representan como variables aleatorias gracias a datos recolectados en terreno. La investigación entrega como resultado una serie de funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta probabilística del modelo de deterioro de catorce grupos de rutas chilenas, dentro de los modelos de deterioro empíricos más utilizados para el análisis de pavimentos se encuentran los desarrollados por el programa The Highway Development and Management Tool HDM IV versión 2.08, que son modelos incrementales que evalúan la condición de deterioro de un pavimento y cuya respuesta es representada por un valor determinista para el año analizado, el diseño y mantenimiento óptimo de pavimentos requieren de una exacta predicción de su proceso de deterioro, el cual es altamente influenciado por la incertidumbre en las cargas del tránsito, las condiciones ambientales, las propiedades mecánicas de los materiales, su desempeño estructural y por los procesos constructivos. De esta manera, los problemas de ingeniería están rodeados por condiciones de incertidumbre, por lo que satisfacer un adecuado desempeño de la solución, no puede ser garantizado de forma absoluta. Para garantizar entonces el adecuado comportamiento de un diseño, este debe ser analizado en términos de la probabilidad de éxito por satisfacer el criterio de desempeño.²⁷

Por otro lado, en un estudio realizado por Lidón²⁸, se elaboraron modelos matemáticos deterministas a partir de información disponible acerca del estado de los componentes de las infraestructuras, mediante ello se realizaron predicciones de la vida útil de las infraestructuras que sirvieron como herramientas en la planificación de los trabajos de mantenimiento, reparación

²⁷ RODRÍGUEZ MORENO, M; THEBOUX ZEBALLOS, G y GONZÁLEZ VACCAREZZA, A. Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile [en línea] Santiago de Chile: Revista de la Construcción, noviembre de 2013 Volumen 12, No. 2 [consultado 27 de julio de 2018]. Disponible en Internet: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000200012

²⁸ LIDÓN, Manuel. Modelos de deterioro de infraestructuras de transporte: Puentes y Pavimentos. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. España: Universidad Politécnica de Valencia. 2014. p. 17.

y/o rehabilitación, aportando así a la previsión de un presupuesto para las intervenciones planeadas. Parte de la información prevista por la FDOT (Florida Department of Transportation), disponible en la página web: <http://www.dot.state.fl.us/>, donde la información más reciente sobre el estado de los puentes es del año 2012, y donde aparece información relativa a los pavimentos desde 1973 hasta el 2011, señala que el deterioro de las infraestructuras como puentes y pavimentos es un problema de todas las administraciones de infraestructuras de transporte del mundo, dado que su mantenimiento requiere una destinación de recursos importantes a lo largo de su vida útil con un presupuesto limitado. Además, concluyó lo que sigue:

- La precisión de un modelo de deterioro depende de la cantidad y calidad de la información acerca del estado de los puentes y pavimentos.
- La base de datos NBI para puentes pese a ser una información obtenida visualmente, es suficiente para realizar modelos de deterioro fiables.
- Conociendo las curvas de deterioro, se puede predecir el estado de la infraestructura y por lo tanto, se pueden realizar estimaciones presupuestarias.
- Para el mantenimiento de las infraestructuras es preferible realizar labores de mantenimiento menores cuando la infraestructura presenta unas condiciones buenas que realizar labores de rehabilitación cuando éstas han alcanzado niveles de deterioro elevados.
- Los puentes de tramos simples se deterioran a corto plazo más rápidamente que los continuos.
- En el caso de los pavimentos, la realización de labores de mantenimiento menores frente a la rehabilitación pueden suponer un ahorro del 57%.²⁹

Respecto al proceso de deterioro de los materiales que conforman el pavimento relacionados con los modelos de deterioro, Valdés Vidal, Pérez Jiménez y Calabi Floody³⁰ indicaron que en una carretera la calidad y el diseño de las mezclas asfálticas influyen en su operación o servicio, por tal motivo, es necesaria la investigación científica en aras de asegurar la durabilidad de los pavimentos flexibles, que dependen de las tipologías y los mecanismos de deterioro de las carreteras. Es importante entonces diseñar materiales que aumenten su durabilidad frente a las solicitaciones de servicio, reduciendo en los costos de mantención. La Federal Highway Association (FHWA) considera que los deterioros más frecuentes producidos en las capas asfálticas de las estructuras de carreteras son las deformaciones plásticas y los daños producidos por la fisuración de las estructuras.

Asimismo, otros factores que influyen considerablemente en el deterioro de los pavimentos son las solicitaciones del tránsito, que son complejas de establecer

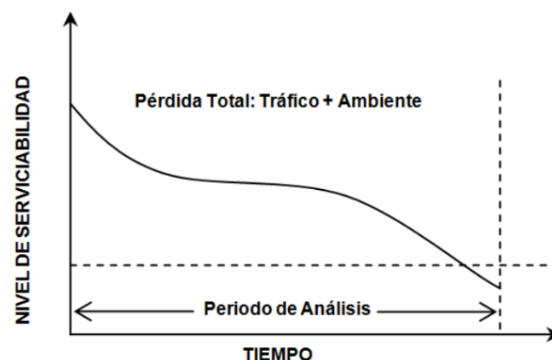
²⁹ Ibíd., p. 79

³⁰ VALDÉS, G., PÉREZ, F. y CALABI, A. La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro [en línea] España: Revista Ingeniería de Obras Civiles, enero de 2012 Volumen 1. [consultado 9 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.rioc.cl/index.php/RIOC/article/viewFile/1.3/2>

por la variabilidad, la periodicidad, las interacciones de los vehículos con el pavimento y las velocidades de circulación que producen solicitaciones adicionales. De igual modo, la temperatura afecta de forma directa la rigidez del pavimento dado que a medida que aumenta, la capa de rodadura se expande y cuando disminuye incrementa su rigidez, este fenómeno genera altas tensiones superficiales de retracción.

La humedad tiene influencia en la adhesividad entre los materiales, y eso conlleva a que se generen fisuras y por ende, ocurra una filtración de agua a las capas inferiores. De acuerdo con estos autores, la combinación de la temperatura, la radiación solar, la humedad y el aire dan como resultado la oxidación del ligante de la mezcla asfáltica en el tiempo, lo que incide en el aumento de la rigidez de la mezcla, aumentando su fragilidad; lo anterior lo vuelve susceptible a fallos por fisuración. En esa medida, los agentes solicitantes, las cargas de tránsito y las condiciones medioambientales tienen un efecto directo sobre la serviciabilidad del pavimento en el tiempo, como se logra evidenciar en la siguiente figura:

Figura 8. Efecto conjunto tráfico y medioambiente sobre la serviciabilidad de un pavimento



Fuente: Ibíd.

Otro de los procesos de deterioro en los pavimentos es la fatiga, que según Vera Silva³¹, es causada cuando la mezcla de pavimento es puesta sobre una estructura de pavimento fisurada, tal y como sucede en los proyectos de rehabilitación, en los que se instala la mezcla asfáltica sobre losas de concreto deterioradas, por lo que la mezcla presenta esfuerzos de tensión debido a la carga producida por el tránsito, los cambios de temperatura; adicionalmente, como es colocada de inmediato sobre la discontinuidad, se generan fisuras que aparecen poco después de la colocación, llamándose a este fenómeno “fisuras de reflexión”, pues son reflejo de las fisuras de las capas inferiores. En esta investigación se buscó:

³¹ VERA SILVA, Jonathan. Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 6

(...) presentar la caracterización de dos tipos de mezclas asfálticas por su resistencia a la fatiga por reflexión; para esto se diseñó e implementó un equipo de laboratorio capaz de simular en laboratorio el movimiento de los bloques en la capa rígida inferior a una mezcla asfáltica. Se trabajó con una mezcla asfáltica tipo MDC-2 de Invías, frecuentemente utilizada como carpeta de rehabilitación de pavimentos rígidos, y una elaborada con asfalto modificado con grano de caucho reciclado GCR, de acuerdo con las Especificaciones IDU. Estas mezclas fueron caracterizadas por medio de módulos dinámicos, deformación permanente, resistencia a la fatiga en Banco de Fatiga y en equipo NAT, y finalmente por su resistencia a la fatiga por reflexión. Por medio del ensayo propuesto se determinaron las leyes de fatiga por reflexión para diferentes niveles de deformación y temperatura, con el objeto de predecir de manera aproximada el número de ciclos de carga que puedan soportar estas mezclas al ser utilizadas en obras de rehabilitación.³²

En esa misma línea, Leguízamo y Vega estudiaron las leyes de fatiga por reflexión y el comportamiento de este tipo de daño en mezclas asfálticas convencionales tipo MDC-2, aplicando el método de los elementos discretos, que consiste en estudiar el comportamiento de materiales granulares sometidos a ensayos controlados de laboratorio; el objetivo de su investigación fue “(...) obtener las leyes de fatiga por reflexión en mezclas asfálticas tipo MDC-2, elaborando simulaciones computacionales a través del método de los elementos discretos e implementando la herramienta de programación PFC® 2D.”³³

En este estudio se concluyó que la evaluación de la mezcla asfáltica a través del método de elementos discretos resultó ser una buena alternativa para determinar las leyes de fatiga por reflexión en mezclas asfálticas tipo MDC-2, de igual modo, la herramienta de simulación PFC® 2D podría ser utilizada para realizar simulaciones de otros tipos de mezclas con asfaltos modificados y distintas propiedades de los materiales granulares.

Posteriormente, Apaza³⁴ estudió el comportamiento de las deformaciones del pavimento en sus diversas capas, que generan fallas estructurales en el pavimento. Su estudio se desarrolló en la ciudad de Juliaca en Perú y resaltó que los agregados son fundamentales en las mezclas asfálticas ya que estas inciden directamente en la deformación del Pavimento Asfáltico. Allí se

³² Ibíd., p. 54.

³³ LEGUÍZAMO, Jonathan y VEGA, Julio César. Obtención de las leyes de fatiga por reflexión en mezclas asfálticas mediante el método de los elementos discretos. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 7

³⁴ APAZA, Ciro Ernesto. Deformación en las mezclas asfálticas y su consecuente deterioro en los pavimentos asfálticos en la ciudad de Juliaca. – 2016. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Perú: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. 2017. p. 10

recomienda el uso de cementos asfálticos adecuados para la geografía y clima de la ciudad de Juliaca, los cuales inciden en el comportamiento de los pavimentos y sus deterioros; además tuvo en cuenta las características fisicoquímicas del asfalto, así como las propiedades reológicas de los materiales asfálticos determinadas por su comportamiento mecánico. Del mismo modo, dicho estudio describió la severidad de las deformaciones en los pavimentos asfálticos, enfocándose en la causa que produce la deformación; de igual forma, identificó los equipos de laboratorio y de campo especializados para evaluar el daño en el pavimento.

A partir de aquí se determinó que las altas temperaturas de la región generaron deformaciones en la carpeta asfáltica como consecuencia de la susceptibilidad térmica que tienen los asfaltos. El autor determinó que las deformaciones totales del pavimento son producto de la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes, por esto recomendó que para los asfaltos de la región del caso de estudio se debe “(...) incrementar la resistencia de las mezclas no solo utilizando cemento asfáltico más viscoso, sino un tipo de asfalto que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento y así tenga una mejor recuperación elástica que evite la acumulación de deformaciones plásticas permanentes.”³⁵

A su vez tuvo en cuenta que en la evaluación de las deformaciones permanentes las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica cumplen un rol importante, las cuales se pueden regular manejando la granulometría de los agregados y valores bajos en el contenido de vacíos. De igual manera, se logró identificar que la resistencia al corte puede ser mejorada si se seleccionan agregados con un alto grado de fricción interna y las deformaciones permanentes por fallas en la subrasante, base o subbase pueden originarse por una incorrecta selección de materiales; lo que se sugiere en este caso es “cuidarse de un correcto diseño de la estructura de pavimento estudiando cuidadosamente las cargas, suelos de fundación y de subrasante, clima, entre otros parámetros.”³⁶

Por otra parte, en el ámbito internacional, Zheng, Easa, Yang, Ji, Jiang³⁷, realizaron una investigación cuya base era una metodología y caso de estudio en torno a una vía ubicada en el suroeste de China, en este trabajo se desarrolló un modelo para la evaluación del ciclo de vida sustentable de un pavimento que está en edades infantiles (edades tempranas del pavimento), los autores propusieron una metodología completa del pavimento LCSA, en la que integra el análisis de coste del ciclo de vida (CLCA), la evaluación del ciclo

³⁵ *Ibíd.*, p. 88

³⁶ *Ibíd.*, p. 90

³⁷ ZHENG Xiaoyan, EASA Said M., YANG Zhengxian, JI Tao, JIANG Zhenliang. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. En: Journal of Cleaner Production. China - 213 (2019) 659 672.

de vida medioambiental (E-CLP), y la evaluación del ciclo de la vida social (S-CLP), donde se identificaron cuatro parámetros del pavimento, esto es, los materiales y su producción, el proceso constructivo, el uso y el mantenimiento; de allí se obtuvo lo que a continuación se refiere:

The proposed pavement LSCA methodology was comprehensive and effective in highlighting the full sustainability in pavement management. As an attempt, this study addresses an overall aspect of pavement sustainability that assists in selecting the appropriated pavement alternative, and helps the pavement stakeholders understand the sustainability performance. However, the proposed methodology may not fully represent the pavement sustainability and more information about pavement performance could be incorporated. In addition, future work is needed, such as conducting a comprehensive uncertainty analysis, and constructing an international and multidiscipline expert panel.

De lo anterior se resalta que si bien la metodología propuesta ayuda en la selección de la alternativa de pavimento apropiado y ayuda a los diferentes actores a entender el comportamiento y la sostenibilidad de un pavimento, teniendo en cuenta los factores técnicos, sociales y medioambientales de la vida útil de un pavimento, la misma no representa planamente la sostenibilidad de este, ya que puede incorporarse más información del mismo.

De igual manera, Y Qi, F. Wang, A El Gendy y X. Lou de la ³⁸, realizaron la evaluación de pavimentos en el estudio y análisis de datos de un sistema de gestión de estos; con este objeto, emplearon el MDOT PMS data, una base de datos de la agencia de carreteras de Mississippi Estados Unidos el PMS (Pavement Management System) que contiene el inventario de carreteras, el estado de la superficie del pavimento y el historial de mantenimiento de toda la red de carreteras administrada por el MDOT, no obstante, también se resalta que en el sistema hay una carencia de datos. En la Tabla 3 se presentan los umbrales o los límites aceptables de los parámetros que son medidos y registrados en el MDOT en los pavimentos de nueve estados de Norteamérica.

Tabla 3. Comparación de umbrales de asfalto en estados seleccionados

³⁸ Y QI, F. WANG, A, EL GENDY y LOU, X. Evaluation of pavement warranty thresholds base on survey study and analysis of pavement Management System data. En: Advances in Transportation Studies: an international Journal Section A 45 (2018) pg 55-73.

Type	Distress Name	Unit	State								
			LA	IN	IL	FL	PA	WI	CO**	MI*	MN**
Asphalt	IRI	in./mi	--	90/133	110	--	--	--	--	--	--
	Rutting	in.	0.35	0.25/0.35	0.3	0.25	0.375	0.25/0.375	0.5	0.39	0.375
	Alligator Cracking	ft.	--	--	50	--	--	50	--	--	--
	Block Cracking	ft ²	--	--	100	--	--	50	--	--	--
	Edge Cracking	ft.	100	--	10	30	--				
	Longitudinal Cracking	ft.	200	--	10	30	--	50	30	50	200
	Transverse Cracking	ft	200	--	10	30	--	--	--	--	18
	Raveling & Weathering	ft ²	10	--	--	--	--	--	50	--	60
	Bleeding	ft ²	10	--	--	10	--	50	50	--	--
	Reflection Cracking	ft.	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Concrete	IRI	in./mi	90	90	150	--	--	--	--	--	--
	Longitudinal Cracking	ft.	--	--	10	--	--	--	--	25	--
	Transverse Cracking	ft.	--	--	10	--	--	--	--	--	--
	Spalling of Longitudinal Joints	ft.	--	--	10	--	25	--	--	--	--
	Spalling of Transverse Joints	ft.	--	--	10	--	--	--	--	--	--
	Map Cracking & Scaling	ft ²	--	--	50	--	--	--	--	615	--

Fuente: Ibíd.

De lo anterior se resalta que la base del modelo analizar fue la comparación de los ítems y umbrales de garantía en Mississippi y otros estados de USA con programas de garantía existentes.; de allí se concluyó lo siguiente:

“As part of comprehensive evaluation study of Mississippi DOT pavement warranty program, this research reviewed the warranty items and thresholds in Mississippi and other states with existin warranty programs.” Donde la base del modelo analizar fue la comparación de los ítems y umbrales de garantía en Mississippi y otros estados de USA con programas de garantía existentes.

De igual manera, se resalta que un valor de IRI de 2 (m / km) es un valor razonable según el análisis de CDF, y de acuerdo algunos resultados obtenidos que son inconsistentes se sugiere seleccionar el umbral en torno al rango de percentil del 70% al 80% del CDF de cada conjunto de datos de fatiga individual; como lo indican los autores:

The findings from data analysis showed good rutting resistance of modern pavements suggesting possibly tightening rutting threshold of IRI around 125 in./mi. (2 m/km) would be reasonable based on the CDF analysis of the dataset . Significant inconsistence in threshold levels used by Mississippi and the threshold requirements, it is suggested to select the threshold around the percentile range of 70% - 80% of the CDF of each individual distress dataset.

6. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL

Conforme a la bibliografía se encontraron los siguientes documentos que tratan los principales conceptos del tema de investigación:

6.1 ÍNDICE DE ESTADO

Según lo expresado por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) en su página Web, el Índice de Estado (IE) corresponde “a la sumatoria de los productos efectuados entre la calificación ponderada de cada elemento medido (rugosidad, fisuras y grietas, resistencia al deslizamiento, estado de las bermas, zonas laterales, señalización, ahuellamiento y deformaciones) por su respectivo factor de influencia”³⁹. Es un valor numérico que varía entre 0 y 5, por medio del cual se califica la funcionalidad de la vía, además del nivel de servicio que esta y sus zonas adyacentes prestan a los usuarios de la carretera.

Como se puede observar, la concepción del IE en las carreteras colombianas, así como en otros países, se enfoca en el nivel de servicio y condiciones de funcionalidad, viéndose reflejadas en la seguridad y la comodidad prestada a los usuarios, en condiciones netamente objetivas, acerca de la capacidad estructural de la carretera. Como era de esperarse, este requisito siempre ha estado asociado a un sistema de imposición de penalidades económicas, en caso de incumplimiento por parte de los concesionarios. Con relación a los parámetros que componen el IE, estos se pueden definir de la siguiente forma:

- La rugosidad consiste en la evaluación del estado de la superficie de rodadura, desde el punto de vista de irregularidades longitudinales y ondulaciones que presente.
- La resistencia al deslizamiento, parámetro que permite evaluar la resistencia a la fricción de las llantas y la superficie de rodadura de la vía.
- Fisuras y grietas, la cual mide las fallas en la superficie de rodadura por las solicitudes del tránsito, las situaciones medioambientales o la deficiencia en los materiales.
- Ahuellamientos y deformaciones, son parámetros que representan los hundimientos presentados en la superficie de rodadura, puntuales o a lo largo de las huellas, debido a la canalización del tránsito, sobrecargas de los vehículos, deficiencias en la estructura o inestabilidad de la banca.
- Estado de bermas, lo cual determina el grado de deterioro de las bermas paralelas a la estructura de pavimento.
- Zonas laterales, las cuales evalúan la cantidad de obstáculos que tiene la vía a ambos costados de estas.

³⁹ AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Índice de Estado Op. Cit.

- Señalización, que evalúa la señalización horizontal y vertical de la vía, teniendo en cuenta condiciones como reflectividad, luminiscencia, cantidad de señales en la vía y estado de estas mismas señales.

En ese sentido, Sánchez Sabogal, en su estudio sobre el Índice de Estado en las concesiones de Colombia, propuso una tabla con los valores que deben ser aceptados para la calificación del IE en los proyectos de concesión de tercera generación, la cual se muestra a continuación⁴⁰.

Tabla 4. Tabla recomendada de calificación para determinar el Índice de Estado en los proyectos de concesión de tercera generación

Elemento	Unidad de medida de calificación	Rango de calificación			
		Muy bueno 5 - 4	Bueno 4 - 3	Regular 3 - 2	Malo 2 - 0
Rugosidad (R)	IRI (m/km)	1 - 2,5	2,5 - 3,5	3,5 - 5,5	>5,5
Ahuellamientos y deformaciones (A)	mm	0 - 10	10 - 20	20 - 35	>35
Fisuras y grietas (F)	% área afectada	0 - 0,5	0,5 - 3,0	3,1 - 5,0	>5,0
Resistencia al deslizamiento (D)	Coefficiente resistencia al desliz.	75 (o+)- 55	55 - 45	45 - 35	<35

Fuente: SÁNCHEZ SABOGAL. Op. Cit.

De lo anterior se entienden como límites aceptables aquellos que presentan una calificación superior a 4.0, razón por la cual se propone la siguiente tabla de límites aceptables para los parámetros de calificación en una concesión vial de Colombia:

Tabla 5. Límites aceptables de los parámetros de calificación para un IE superior a 4.0.

Elemento	Unidad de medida de calificación	Límite aceptable
Rugosidad (R)	IRI (m/km)	2,5
Ahuellamientos y deformaciones (A)	mm	10
Fisuras y grietas (F)	% área afectada	0,5
Resistencia al deslizamiento (D)	Coefficiente resistencia al desliz.	55
Estado de Bermas (B)	% área afectada	2

Fuente: elaboración propia con base en el estudio de la CCI

⁴⁰ CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Sobre el índice de estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales [en línea]. Bogotá D.C, [consultado 01 de febrero de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.infraestructura.org.co/2017/filef.php?IDe=846>

6.2 RUGOSIDAD (R) ÍNDICE DE REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI)

La rugosidad se define como las alteraciones del perfil longitudinal de una vía, que provocan vibraciones en los vehículos que lo recorren. Además, es la desviación de la superficie respecto a una superficie plana, con dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo y la calidad al andar; se mide con el indicador denominado Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual se expresa en m/km ⁴¹. La rugosidad o regularidad superficial es un factor que está directamente relacionado con el estado superficial de una carretera, por tanto, se ha constituido como factor primario en el análisis del IE de los pavimentos y la comodidad de los usuarios que transitan por ellos.

De igual modo, a este parámetro se le realiza seguimiento para las mediciones de IE en todas las generaciones de concesiones viales en Colombia. Las especificaciones técnicas del INVIAS regulan el IRI, mediante la especificación INV E – 790 – 13 “Determinación del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para Medir la Rugosidad (Irregularidades de la Superficie) de Pavimentos”.

6.3 AHUELLAMIENTOS Y DEFORMACIONES (A)

El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Cabe señalar que se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento, y altas temperaturas de servicio.

Por otra parte, según el INVIAS, el ahuellamiento es la deformación de la mezcla asfáltica de superficie, o en deformaciones en capas subyacentes, se mide en milímetros mediante la ayuda de la regla de tres metros y un calibrador. Al igual que la rugosidad, a este parámetro se le realiza seguimiento para las mediciones de IE en todas las generaciones de concesiones viales en Colombia⁴². El INVIAS presenta la norma de ensayo I.N.V. E – 789 – 13 “Medida del Ahuellamiento en Superficies Pavimentadas”, para determinar el ahuellamiento y deformaciones en pavimentos.

6.4 FISURAS Y GRIETAS (F) % ÁREA AFECTADA

Las fisuras y grietas son las líneas de rotura o hendiduras que se presentan en la superficie rodadura del pavimento, debido, entre otras causas, a la repetición de cargas, al medio ambiente y a los materiales que lo constituyen.

⁴¹ COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Colombia: INVIAS, 2012, p. 265

⁴² *Ibíd.*, p. 257.

Asimismo, los pliegos de condiciones estructurados por la Agencia Nacional de Infraestructura relacionan al Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles del Convenio Interadministrativo 0587 – 03⁴⁴, para caracterizar y determinar las fisuras y grietas de las vías; este parámetro se divide en las siguientes categorías:

- Fisuras
- Deformaciones
- Pérdida de capas estructurales
- Daños superficiales
- Otros daños

Vale aclarar que las fisuras y las grietas presentan diferentes tipologías, las cuales se describen a continuación.

- Fisura Longitudinal: es la línea de rotura paralela al eje de la calzada.
- Fisura Transversal: es la línea de rotura perpendicular al eje de la calzada.
- Agrietamiento Tipo Piel de Cocodrilo: es el daño presente en el pavimento conformado por una red o malla de grietas unidas entre sí que ocupan, ya sea la huella del carril o la totalidad de la calzada.

Para concluir, a este parámetro se le realiza seguimiento para las mediciones de IE en todas las generaciones de concesiones viales en Colombia.

6.5 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (D) COEFICIENTE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento se refiere a disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante, especialmente en zonas de frenado, curvas y cuando la superficie de rodadura se encuentra mojada, lo cual es fundamental para la seguridad de los usuarios. Esta adherencia entre pavimento y neumático o resistencia al deslizamiento va disminuyendo con el paso del tiempo por efecto del pulimiento causado por el tránsito, llegando a constituirse en un importante indicador de seguridad vial para los usuarios⁴⁵.

⁴⁴ . UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA E INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. Bogotá D.C.: octubre de 2006.

⁴⁵ COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op. cit., p. 281.

Ahora bien, un parámetro importante de adherencia es el coeficiente de fricción. Este coeficiente se puede cuantificar físicamente mediante un factor que resulta de la relación entre la fuerza de fricción desarrollada en la interface de un neumático impedido de rodar con el pavimento y el peso sobre el neumático. Debido a la importante influencia del agua en esta propiedad, los distintos métodos han optado por normalizar los ensayos en condiciones de superficie de rodadura mojada. La norma INVIAS determina la resistencia al deslizamiento, bajo la norma de ensayo I.N.V. E – 792 – 13 Medida del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento Usando el Péndulo Británico, en la cual se especifica que el Coeficiente Resistencia al Deslizamiento (D) es un factor que mide las propiedades superficiales de fricción. De esa forma, utilizando el método del péndulo de “*Transport and Road Reseach Laboratory*”, donde el valor medio con este péndulo se expresa en C.R.D (Coeficiente de resistencia al deslizamiento) y representa las propiedades friccionantes de una llanta en el pavimento.

6.6 MODELOS DE DETERIORO

De acuerdo con Solminihac⁴⁶, los modelos de deterioro son expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, con base en el conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis.

Entre tanto, los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos o mecanicistas, los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, donde tienen los siguientes aspectos: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.), características del drenaje y de las bermas, datos de tránsito de condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil.

Por otra parte, el desarrollo de modelos mecanicistas se basa en datos de pavimentos existentes y en las 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 la rodadura propiamente, ya sea rígida o flexible. Los pavimentos en general presentan dos fases de deterioro claramente diferenciables, a saber:

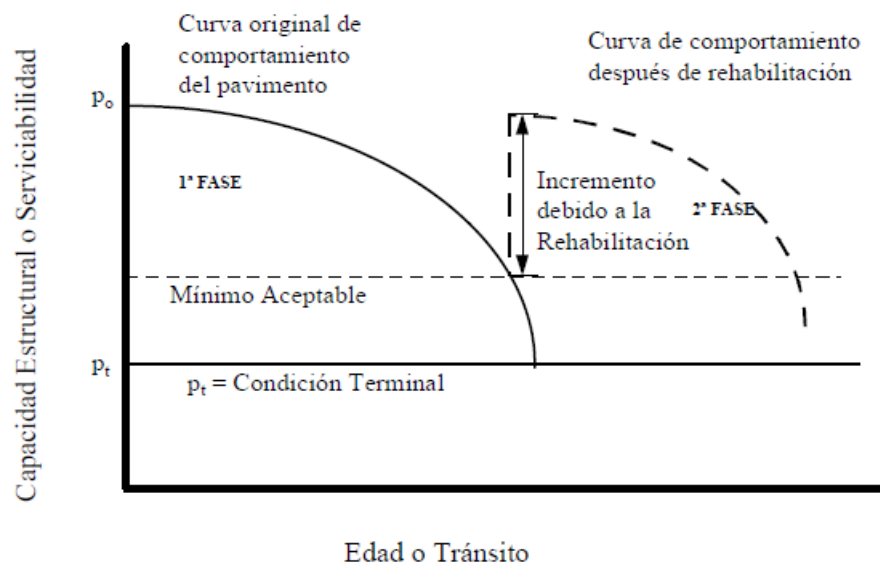
- La primera fase, aquella etapa del deterioro que se produce entre la puesta en funcionamiento de una vía, inmediatamente después de su construcción, y el momento en que se lleva a cabo en ella una intervención importante. Para este efecto es necesario definir una intervención importante del

⁴⁶ SOLMINIHAC TAMPIER, Hernán de. Gestión de Infraestructura Vial. Universidad Católica de Chile. 3ra Edición, 2003; p. 223.

pavimento, como aquella que produzca un mejoramiento del nivel de servicio de la vía, por lo cual deben considerarse las siguientes actividades como intervenciones importantes:

- Todas las actividades de rehabilitación.
- Cambio de capa de rodadura (de capas asfálticas o concreto hidráulico).
- Las reconstrucciones.
- La segunda fase de deterioro es aquella etapa que va desde la realización de una intervención importante en adelante. Al llevar a cabo una rehabilitación siempre se elimina o reduce el deterioro existente, o bien, se atenúa el progreso del mismo para el futuro, por lo que el comportamiento del pavimento en la etapa posterior a la actividad de mantenimiento es, por lo general, diferente al de la primera fase, ya sea porque el deterioro inicia desde cero nuevamente o porque la progresión con que avanza el deterioro es variable, que antes de la intervención o mantenimiento. En la Figura 9 se pueden observar las dos fases de deterioro de los pavimentos. La evolución del deterioro es en función del tiempo, bien sea por el tránsito (TPD), por el número de ejes o por los años de servicio de la vía.

Figura 9. Esquema de deterioros de pavimentos en la primera y la segunda fase



Fuente: Ibíd.

Los modelos de deterioro también se dividen en agregados o incrementales según su forma de predicción:

Los modelos agregados (acumulados) son aquellos que para predecir un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia previa del comportamiento del pavimento, es decir, se necesitan saber los siguientes datos:

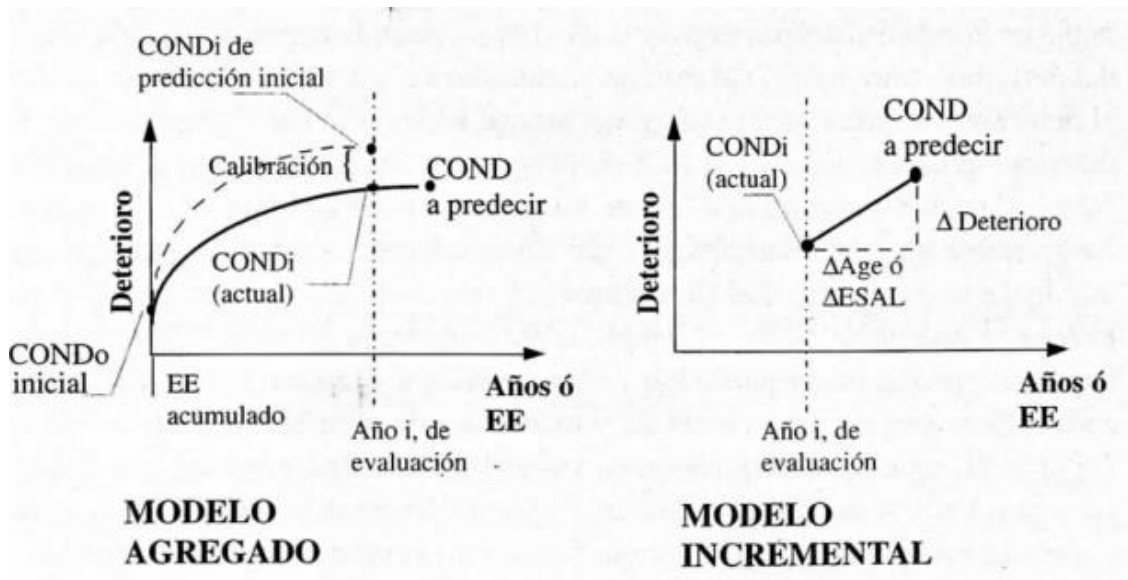
- La tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento.
- Tránsito medio diario anual al inicio del servicio al pavimento.
- Ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación.

- Nivel de servicio Inicial al momento de la puesta en servicio del pavimento (agrietamiento, deterioro de juntas y escalonamiento, PCI e IRI).

Es de mencionar que los modelos de tipo incremental no requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que se realiza a partir de un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer solo lo siguiente:

- El estado o condición actual del pavimento.
- Las características estructurales.
- Las características climáticas existentes.
- Tránsito que circula en el año de evaluación del pavimento.

Figura 10. Diferencia entre modelos agregados e incrementales



Fuente: Ibíd.

6.7 VARIABLES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Para Reyes y Rondón⁴⁷, las variables de diseño de pavimentos se pueden tipificar en dos categorías directas o indirectas, a saber.

Directas: variable que incide de manera "directa" en el espesor de las capas del pavimento.

- Tránsito.

⁴⁷ RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño. Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 2015, p. 521.

- Subrasante.
- Clima.
- Propiedades mecánicas de los materiales (E, Mr y Relación de Poisson).
- Factores de seguridad.

Indirectas: no inciden en el espesor del pavimento, pero sí en el tipo de estructura que se va a dimensionar.

- Costos.
- Topografía.
- Estética.

6.7.1 Tránsito

Esta variable se caracteriza a través del número de ejes equivalentes de 8.2 o 13 toneladas que circulan en el carril y el periodo de diseño; se calcula a través de la ecuación 6.1.

$$N = TPD \times \frac{K1}{100} \times \frac{K2}{100} \times 365 \times \frac{(1 + r)^n - 1}{Ln (1 + r)} \times FC \quad (6.1)$$

Donde:

N= Número de ejes equivalentes de 8,2 o 13 toneladas que circulan en el carril de diseño y el periodo de diseño

TPD= Tránsito Promedio Diario

K1= % de vehículos pesados

K2= Factor de carril

r= tasa de crecimiento anual del tránsito

n= periodo de diseño en años

FC= Factor Camión

La aplicación del Número de ejes equivalentes de 8,2 o 13 está sujeta al método que se utilice para el diseño de pavimentos, por lo que para el dimensionamiento de este tipo de estructuras en Colombia se emplea el método de la AASHTO, cuya variable tránsito (W_{18}) corresponde a ejes de 8.2 toneladas, siendo el subíndice 18 la masa del eje simple equivalente en kips (kilo-libras). Así mismo, la Norma 6.1IC de España y la CNR-178 de Italia utilizan ejes equivalentes de 8.2 toneladas para el diseño de pavimentos.

Por otro lado, el diseño racional de pavimentos propuesto por el IDU y la Universidad de los Andes (2002) adoptaron la norma francesa AFNOR, donde

este método contempla unas condiciones desfavorables en un escenario crítico, por lo cual utilizan para el diseño ejes equivalentes de 13 toneladas.

Tránsito Promedio Diario (TPD)

El TPD es el número de vehículos (Automóviles - A, Buses – B y camiones - C) que circula en una vía en un día. Se calcula dividiendo el número de vehículos (A+B+C) que pasa por una vía entre el número de días de un conteo.

Número acumulado de ejes simples equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño (NESE), durante un período determinado. Este número será utilizado para el cálculo de N de la ecuación 6.1 del presente capítulo; para el cálculo del NESE se aplica la siguiente ecuación.

$$NESE_i = TPD_i * K1 * k2 * 0.90 * FC * 365 \quad (6.2)$$

Donde:

NESE= Número acumulado de ejes simples equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño

i= período determinado

TPD= Tránsito Promedio Diario

K1= % de vehículos pesados

K2= Factor de carril

FC= Factor Camión

De igual manera, se puede determinar N, con base en el NESE, aplicando la siguiente ecuación:

$$N = NESE_0 * \left[\frac{(1+r)^n - 1}{Ln(1+r)} \right] \quad (6.3)$$

Donde:

N= Número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas que circulan en el carril de diseño y el periodo de diseño.

NESE= Número acumulado de ejes simples equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño

0= Año base de la proyección

r= tasa de crecimiento anual del tránsito

n = periodo de diseño en años

6.7.2 Subrasante

De acuerdo con Reyes y Rondón, la subrasante “es la capa sobre la cual se soporta o cimenta la estructura del pavimento (terreno natural de cimentación o explanación de una vía) [...] esta capa debe soportar en última instancia las cargas producidas por el tránsito, presentar un buen comportamiento ante el medio ambiente y servir como apoyo uniforme a la estructura de pavimento”⁴⁸. Esta capa puede ser natural o mejorada y entre sus cualidades se hallan las siguientes:

- Alta resistencia mecánica.
- Permanencia de la resistencia durante la vía útil del pavimento.
- Alta densidad o grado de compactación.
- Baja susceptibilidad a cambios volumétricos y al agua.
- Buena trabajabilidad durante la compactación.

6.7.3 Clima

Según Reyes y Rondón⁴⁹, la variable clima se tiene en cuenta en el diseño de pavimentos a partir de dos parámetros, el primero es la Temperatura Media Anual Promedio (TMAP) y el segundo es la Precipitación Media Anual (PMA). Con el primer parámetro se identifica el valor del módulo resiliente óptimo para las metodologías INVIAS (2007), IDU (2002) y el coeficiente a_1 para la metodología AASHTO (1993).

Vale señalar que el segundo parámetro del clima se utiliza para calcular el porcentaje de tiempo, en el que la estructura de pavimento está expuesta a niveles de humedad próxima a la saturación, donde dicho porcentaje se calcula como la relación entre el número de días promedio que llueve en la zona (PMA), donde se construirá la estructura de pavimento y los 365 días del año⁵⁰.

6.7.4 Propiedades mecánicas de los materiales

El parámetro mecánico con el cual se caracterizan los materiales es el módulo resiliente, el cual se traduce en coeficientes estructurales para el diseño y

⁴⁸ Ibid, p. 348

⁴⁹ Ibid, p. 120.

⁵⁰ Ibid, p. 550.

dimensionamiento del espesor de las capas de pavimentos; con estos coeficientes se puede medir la capacidad relativa de una unidad de espesor de una determinada capa para funcionar como soporte estructural del pavimento. Lo anterior se aplica en la metodología de diseño de pavimentos de la AASTHO.

6.7.5 Tipos de pavimento

En concordancia con Claudio Giordani y Diego Leone⁵¹, los pavimentos se clasifican en tres tipos: Flexibles, Semirrígidos y Rígidos.

Pavimento Flexible: el pavimento flexible o asfáltico es aquel construido con materiales asfálticos o granulares, está constituido por la carpeta asfáltica, la base, la subbase y la subrasante; tal como se muestra en la Figura 11:

Figura 11. Estructura de Pavimento Flexible



Fuente: Ibíd.

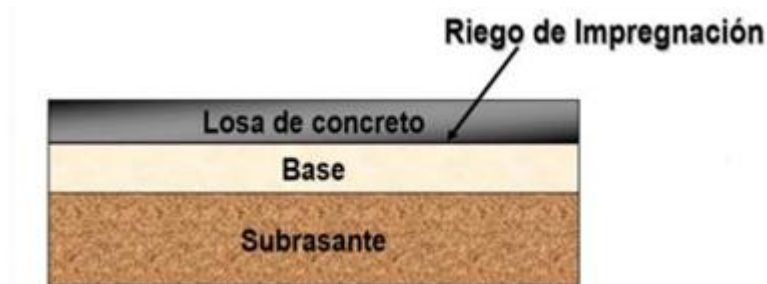
Es de resaltar que la capa de rodadura de un pavimento flexible tiene como función soportar los esfuerzos máximos y condiciones más severas impuestas por el clima y el tráfico. Por otra parte, la base tiene como función principal soportar las cargas aplicadas y distribuir estas cargas a la subbase o al terreno, se compone de materiales granulares que por lo general han sido tratados con cemento hidráulico, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes. Por último, las subbases transmiten cargas al terreno y en algunos casos, pueden actuar como ayuda al drenaje de las aguas del subsuelo, está constituida por materiales de menor calidad que los de una base estabilizada o del terreno estabilizado.

Pavimento Rígido: los pavimentos rígidos están compuestos por una losa de concreto hidráulico y dependiendo del diseño, puede contar con una base y/o una subbase, como se expone en la

⁵¹ GIORDANI, Claudio y LEONE, Diego. Pavimentos [en línea] Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra Ingeniería Civil I, [consultado 10 de mayo de 2018]. Disponible en Internet: <https://docplayer.es/67943552-Pavimentos-docentes-ing-claudio-giordani-ing-diego-leone-1o-ano-ingenieria-civil-comision-02-turno-tarde.html>

Figura 12:

Figura 12. Estructura Pavimento Rígido



Fuente: Ibíd.

Mientras tanto, en este tipo de pavimentos la resistencia estructural depende prácticamente de la losa de concreto, la alta rigidez de las losas de concreto permite que se distribuyan mejor las cargas sobre un área mayor de la subrasante, transmitiendo bajas presiones a las capas inferiores.

Pavimento Semirrígido: este tipo de pavimento tiene una mayor rigidez de las capas que la componen, particularmente en su capa base, la cual está conformada por materiales granulares y tratados con un ligante hidráulico; esta estructura se constituye de una o dos capas de mezcla bituminosa (rodadura e intermedia), la subbase puede ser de un material granular estabilizado, y su capa base absorbe la mayor parte de los esfuerzos dada su rigidez.

Como su nombre lo indica, los pavimentos semirrígidos son pavimentos que combinan características de “pavimentos flexibles” y “pavimentos rígidos”, por lo general este tipo de pavimentos se comprenden de una capa de base de concreto hidráulico y una superficie de rodadura de concreto asfáltico. Este tipo de pavimento se utiliza, generalmente, para soportar solicitudes de cargas pesadas como camiones o aeronaves.

7. MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo se desarrolla a partir de información secundaria y los datos usados para el desarrollo del proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”⁵². A continuación, se describen las fases que tiene el proyecto.

Fase 1: se realiza la recolección de información correspondiente a los parámetros de diseño (Clima - Temperatura Media Anual Promedio, Tránsito Promedio Diario - TPD, Tipo de pavimento) de las concesiones a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura, a partir de la consulta en las bases de datos web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y bases de datos y expedientes de la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI. Asimismo, se toman en cuenta los datos que se encuentran en las fichas de evaluación del Índice de Estado – IE del estudio “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”.

Así pues, los datos de Temperatura Media Anual Promedio son extraídos por municipio, de la base de datos del IDEAM, de acuerdo con la ubicación de los tramos pertenecientes a las concesiones a las que se les realizó la medición del Índice de Estado. Por otro lado, los datos de TPD se obtienen de la base de datos que tiene la Agencia Nacional de Infraestructura, los cuales corresponden a las estaciones de peaje de las concesiones a evaluar.

De la misma forma, el tipo de pavimento que tiene cada concesión está relacionado en la fuente principal, que es el proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”. Todos estos datos (Clima - Temperatura Media Anual Promedio, Tránsito Promedio Diario - TPD, Tipo de pavimento) son registrados en varias hojas de cálculo de un archivo Excel.

Fase 2: en esta fase se procede a realizar una matriz con la información recolectada en la Fase 1 por concesión, la cual tiene los siguientes ítems; nombre del proyecto, longitud del proyecto, tramo evaluado, departamento y municipio en el que se ubica el tramo, nombre del peaje más cercano al tramo, TPD anual del peaje más cercano al tramo, Temperatura Media Anual Promedio-TMAP del municipio y tipo de pavimento del tramo.

Fase 3: con base en la información de la fase 2, se clasifican las concesiones (nombre del proyecto) en varios conjuntos de tramos viales que tengan características similares (Clima - Temperatura Media Anual Promedio (TMAP), Tránsito Promedio Diario - TPD, Tipo de pavimento) con edades distintas. Para la variable clima, los tramos viales se clasificarían así:

Tabla 6. Clasificación de las concesiones según TMAP (° C)

⁵² GAMBOA BELTRÁN, Op. Cit.

TMAP (°C)	TMAP
5-10	1
10-15	2
15-20	3
20-25	4
25-30	5
>30	6

Fuente: elaboración propia

En ese orden el TPD se utiliza para calcular, mediante la ecuación 7.1, el número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas que circulan en el carril y periodo de diseño, de los cuales se tienen en cuenta los siguientes rangos, según la especificación del INVIAS:

$$N = TPD \times \frac{K1}{100} \times \frac{K2}{100} \times 365 \times \sum_{\text{Año Inicial}}^{\text{Año Final}} TPD \times FC \quad (7.1)$$

Donde:

N= Número de ejes equivalentes de 8,2 o 13 toneladas que circulan en el carril de diseño y el periodo de diseño

TPD= Tránsito Promedio Diario

K1= % de vehículos pesados

K2= Factor de carril

FC= Factor Camión

$\sum_{\text{Año Inicial}}^{\text{Año Final}} TPD$ = Corresponde a la sumatoria anual de los TPD de los años reportados en la serie histórica de cada peaje correspondiente al tramo evaluado.

En tanto, el número de ejes equivalentes de cada concesión se clasifican de esta manera:

Tabla 7. Categoría de tránsito de acuerdo con Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras

NT1 ($\times 10^6$)	NT2 ($\times 10^6$)	NT3 ($\times 10^6$)
<0,5	0,5 – 5,0	>5,0

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2012. Op. Cit.

Es preciso anotar que para el tipo de pavimento se clasifica en pavimento flexible (PF) o pavimento rígido (PR).

Fase 4: se utilizan los datos de calificación del Índice de Estado de cada Concesión del proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, para transformarlos en datos de medición (Índice de Rugosidad - IRI, Ahuellamiento y deformaciones, Fisuras y Grietas, resistencia al deslizamiento y Estado de Bermas), con el fin de que los tramos de las concesiones sean comparables. Estos datos de medición son parte de las características de cada concesión, por lo cual se integran en los grupos generados en la fase 3 de esta metodología.

Fase 5: de acuerdo con los conjuntos identificados en la fase 3 y a los datos de medición obtenidos en la fase 4, se construyen las curvas de deterioro bajo un modelo agregado usando la herramienta Excel para realizar la modelación preliminar, agrupando varios tramos que tienen características similares de tránsito, clima y tipo de pavimentos, obteniendo los siguientes grupos:

Tabla 8. Grupos a estudiar

Grupo	NT	TMAP	Tipo de pavimento
1	1	1	PR
2	1	1	PF
3	2	1	PR
4	2	1	PF
5	3	1	PR
6	3	1	PF
7	1	2	PR
8	1	2	PF
9	2	2	PR
10	2	2	PF
11	3	2	PR
12	3	2	PF
13	1	3	PR
14	1	3	PF
15	2	3	PR
16	2	3	PF

Grupo	NT	TMAP	Tipo de pavimento
17	3	3	PR
18	3	3	PF
19	1	4	PR
20	1	4	PF
21	2	4	PR
22	2	4	PF
23	3	4	PR
24	3	4	PF
25	1	5	PR
26	1	5	PF
27	2	5	PR
28	2	5	PF
29	3	5	PR
30	3	5	PF
31	1	6	PR
32	1	6	PF
33	2	6	PR
34	2	6	PF
35	3	6	PR
36	3	6	PF

Fuente: elaboración propia

Como resultado de esta fase, se obtienen por grupo cinco gráficas (Datos de medición de IRI, Ahuellamiento, Resistencia al Deslizamiento, fisuras y grietas, y estado bermas vs. tiempo).

Fase 6: obtenidas las gráficas de la fase anterior, se reconstruyen las curvas de deterioro tipo de cada conjunto, a partir de la metodología de modelos a nivel de red por el método de “Ventanas”, dado que las concesiones (red vial) fueron agrupadas en la fase 3, por tramos que contenían características similares y edades diferentes, con el propósito de registrar el comportamiento de deterioro de cada grupo; mediante la utilización del software 2RDATA© realizando un análisis de regresión lineal, obteniendo las ecuaciones que describen el comportamiento de cada curva. Igualmente, se realizan los análisis y conclusiones de las curvas de deterioro.

7.1 PROYECTOS A EVALUAR

Los proyectos a evaluar se extraen del proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, los cuales fueron trabajados en el siguiente orden:

Tabla 9. Listado de proyectos de concesión

PROYECTO CONCESIÓN	LONGITUD (KM)	NÚMERO DE TRAMOS	GENERACIÓN
PY-01 Malla Vial del Meta	188,34	3	1G
PY-02 Bogotá - La Vega - Villeta	81,626	18	1G
PY-03 Santa Marta – Paraguachón	156	4	1G
PY-04 Bogotá - Villavicencio	85,6	5	1G
PY-05 Cartagena - Barranquilla	93	8	1G
PY-06 Devinorte	50,8	13	1G
PY-07 Bogotá - Facatativá - Los Alpes	38,38	8	1G
PY-08 Neiva - Espinal - Girardot	168,05	5	1G
PY-09 Devimed	297,1	23	1G
PY-10 Armenia - Pereira – Manizales	202	33	1G
PY-11 Malla vial del Valle del Cauca y Cauca	388,82	7	2G
PY-12 La Calera	49	5	3G (I)
PY-13 Briceño-Tunja-Sogamoso	319,08	18	3G (I)
PY-14 Bosa -Granada - Girardot	131,75	15	3G (I)
PY-15 Pereira - La Victoria	54,49	11	3G (I)
PY-16 Zona Metropolitana de Bucaramanga	58,2	15	3G (II)
PY-17 Rumichaca - Pasto – Chachagüí	155,72	16	3G (II)
PY-18 Córdoba - Sucre	178,50	23	3G (II)
PY-19 Área Metropolitana de Cúcuta	152,04	35	3G (II)
PY-20 Ruta Caribe	288,62	9	3G (II)
PY-21 Girardot - Ibagué – Cajamarca	147	19	3G (II)
PY-22 Zipaquirá - Palenque	370	38	3G (I)

Fuente: elaboración propia de acuerdo con el trabajo de grado “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”

7.1.1 Consideraciones de los datos evaluados

- Los informes analizados datan del año 2008 hasta hoy en día.
- Claramente, en algunos periodos de los proyectos evaluados, hay tramos que no presentan reporte de IE, lo cual se puede deber a diferentes condiciones que no se encontraron en los reportes de los periodos analizados; de estos datos faltantes, se puede inferir que las mediciones de IE no se realizaron, debido a que en ese periodo se pudo haber realizado alguna intervención a la vía.
- Algunos informes difieren de la nomenclatura o nombre del tramo en diferentes periodos de la misma concesión, por lo cual se clasificó cada tramo, teniendo en cuenta el abscisado de dichos tramos.

7.2 RECOLECCIÓN INFORMACIÓN PARÁMETROS DE DISEÑO

7.2.1 Tránsito Promedio Diario – TPD

Conforme a las bases de datos “serie_historica_mensual_de_tarifas_trafico_y_recaudo_desde_2014_a_junio_2017” e “histórico_de_trafico_desde_2003_a_2013_1107171” encontradas y descargadas de la página oficial de la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI, <https://www.an.gov.co/>, se identificaron los TPD a partir del municipio en el encuentra el tramo de la concesión y la estación de peaje más cercana. Por lo anterior, a continuación se muestra el primer proyecto evaluado, donde se especifican los datos mencionados:

Tabla 10. Datos básicos del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta

PROYECTO DE CONCESIÓN	PY 01 Malla Vial del Meta
TRAMO	RUTA 1 VILLAVICENCIO - VERACRUZ K0+000 - K6+000
MUNICIPIO	CUMARAL
NOMBRE DEL PEAJE	VERACRUZ

Fuente: elaboración propia

Tabla 11. Datos de TPD del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta

AÑO	TOTAL_TRAF	TPD
2003	526512	1442
2004	572439	1568
2005	580857	1591
2006	620571	1700
2007	687018	1882
2008	790350	2165
2009	838848	2298
2010	928680	2544
2011	1082261	2965
2012	1190411	3261
2013	1122092	3074
2014	1185469	3248
2015	1178331	3228
2016	1105776	3030

Fuente: elaboración propia de acuerdo con las bases de datos de la ANI

Cabe aclarar que los TPD por año se establecieron a partir de la sumatoria de los tráficos mensuales encontrados en las bases de datos mencionadas. Una vez sumados los tráficos mensuales, se dividieron sobre 365, correspondientes a los días del año. Además, para la organización de la información se asignó un número de tramo a cada proyecto, cuyos números pueden coincidir o no con el reportado en la realidad.

Seguidamente, se relaciona Tabla 122, donde se recopilaron los TPD de los 22 proyectos de concesión, sobre los cuales se verificó que todos los tramos presentaron los TPD de los 12 meses de cada año. En el Anexo 2 se presenta el consolidado de todos los proyectos.

Tabla 12. Datos de TPD por año de los tres primeros proyectos a evaluar

PROYECTO	TRAMO	MUNICIPIO	PEAJE	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
PY 01	1	CUMARAL	VERACRUZ								1442	1568	1591	1700	1882	2165	2298	2544	2965	3261	3074
	2	VILLAVICENCIO	LA LIBERTAD								1941	1946	2040	2148	2477	2918	3541	3743	4090	4429	4684
	3	GRANADA	IRACÁ								1908	2057	2096	2193	2258	2363	2483	2442	2706	2839	2890
PY 02	1	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	2	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	3	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	4	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	5	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	6	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	7	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	7862	7964	8242	9296	9722	10001	10739	11265	11711	12261	12276	13914	14466
	8	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	9	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	10	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	11	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	12	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	13	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	14	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	15	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	16	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	17	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
	18	NOCAIMA	CAIQUERO													2885	3671	3721	3088	4530	4993
PY 03	1	SANTA MARTA	NEGUANJE					1466	1533	1397	1447	1591	1561	1692	1801	1942	2105	2293	2557	2818	2707
	2	RIOHACHA	EL EBANAL					1123	1154	1099	1051	1119	1093	1196	1364	1514	1670	1861	2031	2122	2108
	3	MANAURE	ALTO PINO					1387	1444	1510	1413	1517	1506	1516	1938	1970	2074	2134	2316	2308	2354
	4	MAICAO	PARAGUACHON					1413	1576	1461	1289	1603	1548	1581	1837	1895	1789	1754	1934	1924	2247

Fuente: elaboración propia de acuerdo con las bases de datos de la ANI

7.2.2 Clima - Temperatura Media Anual Promedio (°C)

Para la recolección de este parámetro, se consultó la página web <http://www.ideam.gov.co/> del IDEAM, de la cual se descargó la base de datos denominada “Promedios Climatológicos 1981 – 2010”, cuyas TMAP se escogieron a partir del municipio en el que se encuentra ubicado cada tramo de proyecto.

Tabla 13. Datos de Temperatura Media Pondera Anual de los tres primeros proyectos a evaluar

PROYECTO	TRAMO	MUNICIPIO	TEMPERATURA MEDIA PONDERADA ANUAL (°C)
PY 01	1	CUMARAL	25,65
	2	VILLAVICENCIO	25,64
	3	GRANADA	25,60
PY 02	1	TENJO	13,75
	2	TENJO	13,75
	3	TENJO	13,75
	4	TENJO	13,75
	5	TENJO	13,75
	6	TENJO	13,75
	7	TENJO	13,75
	8	NOCAIMA	14,02
	9	NOCAIMA	14,02
	10	NOCAIMA	14,02
	11	NOCAIMA	14,02
	12	NOCAIMA	14,02
	13	NOCAIMA	14,02
	14	NOCAIMA	14,02
	15	NOCAIMA	14,02
	16	NOCAIMA	14,02
	17	NOCAIMA	14,02
	18	NOCAIMA	14,02

Fuente: elaboración propia de acuerdo con la base de datos del IDEAM

Como puede evidenciarse, en el Anexo 3 se presenta el consolidado de los TMAP de todos los proyectos.

7.2.3 Tipo de Pavimento

El tipo de pavimento por cada tramo de proyecto se extrajo de la información reportada en el trabajo de grado “Análisis Comparativo de los Parámetros de

Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”, que en su mayoría están contruidos con Pavimento Flexible (PF).

Tabla 14. Tipo de pavimento de los tres primeros proyectos a evaluar

PROYECTO	TRAMO	MUNICIPIO	TIPO DE PAVIMENTO
PY 01	1	CUMARAL	PF
	2	VILLAVICENCIO	PF
	3	GRANADA	PF
PY 02	1	TENJO	PF
	2	TENJO	PF
	3	TENJO	PF
	4	TENJO	PF
	5	TENJO	PF
	6	TENJO	PF
	7	TENJO	PF
	8	NOCAIMA	PF
	9	NOCAIMA	PF
	10	NOCAIMA	PF
	11	NOCAIMA	PF
	12	NOCAIMA	PF
	13	NOCAIMA	PF
	14	NOCAIMA	PF
	15	NOCAIMA	PF
	16	NOCAIMA	PF
	17	NOCAIMA	PF
	18	NOCAIMA	PF

Fuente: elaboración propia de acuerdo con el trabajo de grado “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”

Por consiguiente, en el Anexo 4 se presenta la relación de los tipos de pavimento por cada tramo de proyecto.

Ahora bien, como resultado de la información recolectada, se obtuvo la siguiente matriz:

Tabla 15. Datos de los dos primeros proyectos a evaluar

PROYECTO	LONGITUD PROYECTO (KM)	TRAMO	DEPATAMENTO	MUNICIPIO	PEAJE	1996	1997	1998	1999	2000	...	TEMPERATURA MEDIA PONDERADA ANUAL (°C)	TIPO DE PAVIMENTO
PY 01	188,34	1	META	CUMARAL	VERACRUZ						...	25,65	PF
		2	META	VILLAVICENCIO	LA LIBERTAD						...	25,64	PF
		3	META	GRANADA	IRACÁ						...	25,60	PF
PY 02	81,626	1	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		2	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		3	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		4	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		5	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		6	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		7	CUNDINAMARCA	TENJO	SIBERIA	1623	8710	9428	9296	8487	...	13,75	PF
		8	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		9	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		10	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		11	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		12	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		13	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		14	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		15	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		16	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		17	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF
		18	CUNDINAMARCA	NOCAIMA	CAIQUERO						...	14,02	PF

Fuente: elaboración propia

Ahora bien, en el Anexo 5 se presenta el consolidado de los datos de TPD, TMAP y tipo de pavimento por cada tramo de proyecto.

7.3 CONJUNTOS DE TRAMOS VIALES CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES

7.3.1 Conjuntos de tramos por TMAP:

Como resultado de la recopilación de la información, se conformaron conjuntos de tramos viales con TMAP similares, por ejemplo, para el TMAP 1 se tienen los siguientes tramos:

Tabla 16. Conjuntos de tramos viales con TMAP similares

Rango TMAP (°C)	Conjunto TMAP	Proyecto	Tramo	Tramo numerado
5 - 10	1	PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	CARRERA SÉPTIMA El Buda - La Caro K2+000 - K7+000	1,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	AUTOPISTA NORTE La Caro - Briceño K7+000 - K21+000	2,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	AUTOPISTA NORTE Paso Urbano Briceño K18+700 - K19+500	3,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	AUTOPISTA NORTE La Caro - Chía K5+800 - K7+400	4,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	AUTOPISTA NORTE El Buda - La Caro K1+500 - K6+500	5,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Centro Chía K7+000 - K11+000	6,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ JR - Salida a Tabio K11+000 - K13+200	7,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Capellanía - Portachuelo K16+500 - K23+000	8,0
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del	LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Portachuelo -	9,0

Rango TMAP (°C)	Conjunto TMAP	Proyecto	Tramo	Tramo numerado
		Norte de Bogotá	Zipaquirá K1+000 - K3+400	
		PY 06 DEVINORTE - Desarrollo Vial del Norte de Bogotá	LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Variante Portachuelo K23+000 - K26+000	10,0
			LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Variante Cajicá K0+000 - K6+400	11,0
			LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Variante Cajicá K11+000 - K17+400	12,0
			LA CARO - CAJICÁ - ZIPAQUIRÁ Variante Teletón K0+000 - K1+500	13,0

Fuente: elaboración propia de acuerdo con la base de datos del IDEAM

Así pues, los tramos clasificados en los TMAP 2, 3, 4 y 5 se evidencian en el Anexo 6.

7.3.2 Conjuntos de tramos por tipo de pavimento:

De tal modo, se evidenció que para la clasificación de los tramos teniendo como referencia el parámetro de tipo de pavimento, todos los tramos viales tienen pavimento flexible, exceptuando el tramo 2 “Variante Gualanday” del Proyecto PY 21 GIC Girardot-Ibagué-Cajamarca.

7.3.2 Conjuntos de tramos por nivel de tránsito:

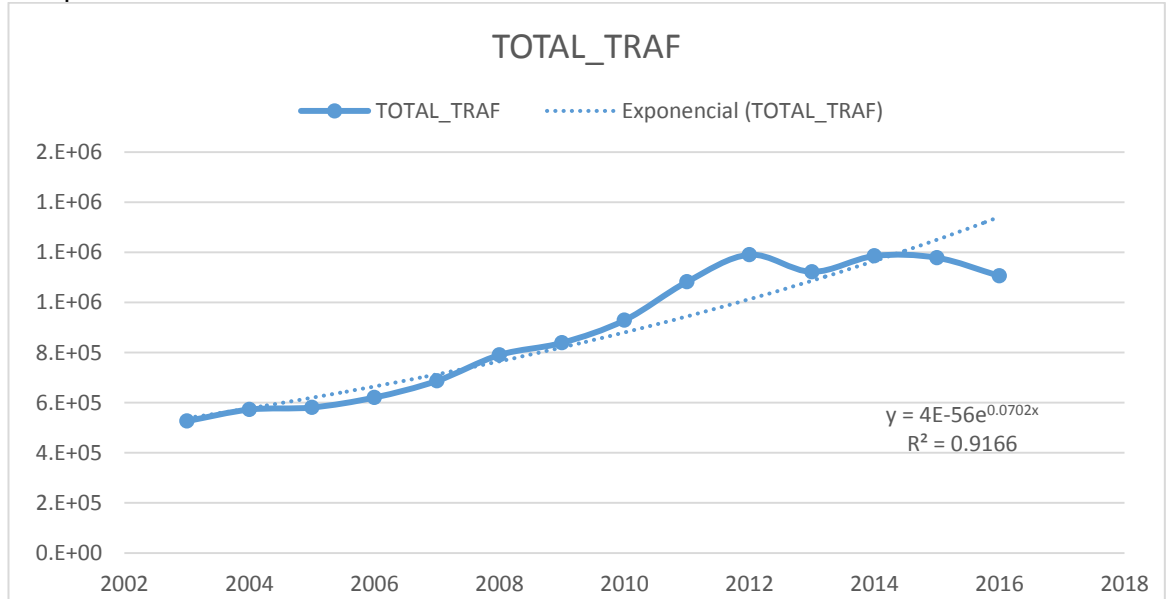
El parámetro de TPD fue utilizado para determinar el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circulan en el carril y el periodo de diseño (N), que para este proyecto tiene como fin categorizar el nivel de tránsito que circula por cada tramo evaluado. Así, se tuvo como premisa que el tráfico reportado para el cálculo es el aforado en los peajes de las concesiones evaluadas, de acuerdo con las cuales se establecen los factores: K1 que corresponde al porcentaje de vehículos pesados que pasan por la vía para cada tramo, K2 que es el factor de carril que depende del número de carriles de cada vía y el factor camión FC, con base en las ponderaciones del INVIAS (2003), siendo este un escenario crítico.

Por lo tanto, con la información de tráfico de los peajes se construyeron las tablas compuestas por los totales de tráfico de cada tramo, TPD, porcentajes

de autos, buses y camiones determinados a partir de las categorías registradas en las bases de datos de los peajes, donde la categoría I corresponde a Autos (A), la categoría II a Buses (B) y las categorías superiores a III se refieren a los Camiones (C) reportados para cada vía.

Como resultado, se obtuvieron graficas del tráfico de cada vía, donde a partir de una línea de tendencia exponencial se determina un “r” (rata de crecimiento del tráfico). Como ejemplo se presenta la Figura 13:

Figura 13. Datos de tráfico del primer tramo del Proyecto Malla Vial del Meta. N vs. tiempo



Fuente: elaboración propia de acuerdo con las bases de datos de la ANI

Entre tanto, con base en las gráficas se obtienen la ecuación de la línea de tendencia exponencial:

$$y = 4E - 56e^{0.0702x} \quad (7.2)$$

Donde el valor exponencial representa la rata de crecimiento “r” para este tramo. Entonces, para efectos de lograr un factor de comparación del valor de N, se proyectó el tráfico a 10 años para todos los tramos, por lo cual n= 10 años.

De lo anterior se procedió a determinar el número **acumulado** de ejes simples equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño (NESE), durante un período determinado, con crecimiento exponencial del tránsito, por medio de la siguiente ecuación:

$$(7.3)$$

$$NESE_i = TPD_i * K1 * k2 * 0.90 * FC * 365$$

Finalmente, para el cálculo del N se establece que el primer año que presenta datos de TPD, es el año base, desde el cual inicia la proyección. Para el cálculo de N se aplica la siguiente ecuación 7.4:

$$N = NESE_0 * \left[\frac{(1 + r)^n - 1}{Ln(1 + r)} \right] \quad (7.4)$$

Como resultado de la aplicación de la ecuación 7.4 se formuló la hoja de cálculo denominada Anexo 7, donde se encuentra el cálculo de los “N” de cada tramo de proyecto.

Conociendo el valor de N se utilizó la Tabla 17 para clasificar cada tramo de acuerdo con el nivel del tránsito:

Tabla 17. Clasificación del nivel de tránsito con base al Número de Ejes Equivalentes de 8.2 ton

Nivel de tránsito	EE 8.2 Ton (Carril de diseño)		
NT1	0	<	500.000
NT2	500.000	-	5.000.000
NT3		>	5.000.000

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la ecuación 6.1 se obtienen los siguientes conjuntos de tramos:

Tabla 18. Clasificación de tramos por nivel de tránsito

Proyecto	Tramo	Nivel de tránsito
VER ANEXO 6		NT1
		NT2
		NT3

Fuente: elaboración propia

Es de señalar que en el Anexo 7 se encuentra el cálculo de los “N” de cada tramo de proyecto.

7.4 CONVERSIÓN DE DATOS DE ÍNDICE DE ESTADO EN DATOS DE MEDICIÓN

Conforme a los datos de calificación del Índice de Estado de cada Concesión recopilados en el proyecto “Análisis Comparativo de los Parámetros de

Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia", se formuló una hoja de cálculo en la que se lograron establecer por tramo los valores de medida de Índices de Rugosidad - IRI, Ahuellamiento y deformaciones, Fisuras y Grietas, resistencia al deslizamiento y Estado de Bermas de cada tramo a evaluar. Por lo anterior, los valores de medida fueron recopilados por tramo, como se muestra en la Tabla 21, para el tramo 1 del proyecto PY-01 Malla Vial del Meta. La información de todos los proyectos se presenta en el Anexo 9.

Igualmente, el año de la vía que se muestra en la siguiente tabla corresponde al tiempo estimado de entrada en operación del pavimento para cada tramo. Para ser comparables, los tramos de las diferentes concesiones se calcularon los valores de medida Índices de Rugosidad - IRI, Ahuellamiento y deformaciones, Fisuras y Grietas, resistencia al deslizamiento y Estado de Bermas, interpolando los parámetros de calificación con los parámetros de medida, como se muestra en la Ecuación 7.1:

$$VM = \frac{PCS - C}{PCS - PCI} * (PMS - PMI) + PMS \quad (7.1)$$

Donde:

VM: Valor de Medición

C: Calificación

PCS: Parámetro de Calificación Superior

PCI: Parámetro de Calificación Inferior

PMS: Parámetro de Medida Superior

PMI: Parámetro de Medida Inferior

Cabe aclarar que para cada generación de concesiones viales varían los rangos de calificación y de medida, organizándose de este modo:

Tabla 19. Valores de especificación para determinar el índice de estado en los contratos de concesión de 1G, 2G, 3G-1 y 3G-2.

			TABLA VALORES DE ESPECIFICACIÓN							
			Muy bueno		Bueno		Regular		Malo	
	Parámetro	Calificación	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
		Medida	5	4	4	3	3	2	2	0
1G	Rugosidad IRI	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12
	Ahuellamientos y Deformaciones	mm	0	25	25	40	40	60	60	100
	Fisuras y Grietas	% área afect	0	6	6	8	8	9	9	10
	Resistencia al Deslizamiento	q Coef	100	45	45	0	45	0	45	0
	Bermas	% área afect	0	2	2	5	5	10	10	20
2G	Rugosidad IRI	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12
	Ahuellamientos y Deformaciones	mm	0	15	15	25	25	40	40	100
	Fisuras y Grietas	% área afect	0	1	1	5	5	10	10	15
	Resistencia al Deslizamiento	Coef	100	55	55	45	45	35	35	0
	Bermas	% área afect	0	2	2	5	5	10	10	20
3G - 1	Rugosidad IRI	m/km	2	3,5	3,5	4,5	4,5	6,5	6,5	12
	Ahuellamientos y Deformaciones	mm	0	6	6	13	13	25	25	40
	Deformaciones		0	12	12	25	25	40	40	100
	Fisuras y Grietas	% área afect	0	1	1	5	5	10	10	15
	Resistencia al Deslizamiento	Coef	100	55	55	45	45	35	35	0
	Bermas	% área afect	0	2	2	5	5	10	10	20
	Zonas Laterales	Vegetación en 5 m	0	0,2	0,21	0,3	0,31	0,4	0,41	0,6
	Señalización	%Señalización	100	90	89,9	80	79,9	70	69,9	30
3G - 2	Rugosidad IRI	m/km	1	2,5	2,5	3,5	3,5	5,5	5,5	12
	Ahuellamientos y Deformaciones	mm	0	10	10	20	20	35	35	50
	Fisuras y Grietas	% área afect	0	0,5	0,5	3	3,1	5	5	10
	Resistencia al Deslizamiento	Coef	100	55	55	45	45	35	35	0

Fuente: elaboración propia de acuerdo con el trabajo “Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia”

Para los cálculos realizados en este trabajo, la variable dependiente es el tiempo y la variable independiente el parámetro evaluado, la correlación se hace con un análisis de regresión lineal para los pares de variables comparados entre sí.

El valor resultante, del cálculo del coeficiente de correlación lineal, lo que nos muestra es que tan asociados están las variaciones de una variable con respecto a la otra, es decir si una cambia positivamente cómo es el cambio de la otra variable, positivo, negativo o no hay asociación entre el cambio de una variable y la otra. Esta relación, entre el cambio de una variable y otro puede ser perfecto, fuerte, moderado, débil o simplemente no existe. Como se resume en la tabla 19:

Tabla 20. Correlación lineal entre dos variables

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	<i>Negativa perfecta</i>
$-1 < r \leq -0.8$	<i>Negativa fuerte</i>
$-0.8 < r < -0.5$	<i>Negativa moderada</i>
$-0.5 \leq r < 0$	<i>Negativa débil</i>
0	<i>No existe</i>
$0 < r \leq 0.5$	<i>Positiva débil</i>
$0.5 < r < 0.8$	<i>Positiva moderada</i>
$0.8 \leq r < 1$	<i>Positiva fuerte</i>
1	<i>Positiva perfecta</i>

Fuente: Nieves Hurtado & Domínguez Sánchez, 2010

Tabla 21. Datos de medición del tramo 1 Proyecto PY-01 Malla Vial del Meta

Año de la Vía	RUTA 1 VILLAVICENCIO - VERACRUZ K0+000 - K6+000									
	IRI Calificación	IRI (m/Km)	AHUELLA MIENTO Calificación	AHUELLA MIENTO (mm)	FISURAS Y GRIETAS Calificación	FISURAS Y GRIETAS (% área afectada)	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Calificación	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (CDR)	ESTADO DE BERMAS Calificación	ESTADO DE BERMAS (% área afectada)
14,6	3,43	4,07	4,72	7	4,6	168%	4,95	97,25	4,99	2%
15,1	4,68	2,48	4,93	1,75	4,6	42%	4,62	79,1	4,92	16%
15,5	4,85	2,225	4,94	1,5	4,51	36%	4,6	78	4,9	20%
16,0	4,7	2,45	4,92	2	4,38	48%	5	100	4,22	156%
16,2	4,67	2,495	4,92	2	4,27	48%	4,2	56	4,98	4%
16,6	4,67	2,495	4,92	2	4,27	48%	4,2	56	4,98	4%
17,3	4,63	2,555	4,85	3,75	4,69	90%	4,25	58,75	4,95	10%
17,8	4,55	2,675	4,85	3,75	4,8	90%	4,22	57,1	4,93	14%
18,0	4,57	2,645	4,85	3,75	4,48	90%	4,23	57,65	4,93	14%
18,8	4,65	2,525	4,86	3,5	4,99	84%	4,37	65,35	5	0%

Fuente: elaboración propia de acuerdo con el trabajo "Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia"

Vale mencionar que en el Anexo 9 se encuentran los datos del Índice de Estado y los datos de medición de cada tramo de proyecto.

8. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Una vez organizada la información, solo se presentan datos de los siguientes grupos, pues a partir de estas combinaciones se obtuvo información:

Tabla 22. Grupos a evaluar

Grupo	NT	TMAP	Tipo de pavimento	Tramo	Proyecto	Código
2	1	1	PF	(Ver Anexo 1)		NT11PF
4	2	1	PF			NT21PF
6	3	1	PF			NT31PF
8	1	2	PF			NT12PF
10	2	2	PF			NT22PF
12	3	2	PF			NT32PF
14	1	3	PF			NT13PF
16	2	3	PF			NT23PF
18	3	3	PF			NT33PF
20	1	4	PF			NT14PF
22	2	4	PF			NT24PF
23	3	4	PR			NT34PR
24	3	4	PF			NT34PF
26	1	5	PF			NT15PF
28	2	5	PF			NT25PF
30	3	5	PF			NT35PF
32	1	6	PF			NT16PF
34	2	6	PF			NT26PF
36	3	6	PF			NT36PF

Fuente: elaboración propia

Es preciso aclarar que los grupos 8 y 23 no son tenidos en cuenta para la proyección de las curvas de deterioro, dado que no son datos suficientes para conformar las gráficas. Para los grupos 14 y 20 no se presentan datos, puesto que los tramos evaluados no contienen estas condiciones de clima y tráfico.

De igual manera, los grupos 32, 34 y 36 no muestran datos, dado que el TMAP para esta condición se definió mayor a 30°C, condición que no se presentó en las concesiones evaluadas. No se tienen en cuenta tramos con pavimento flexible, debido a que los proyectos evaluados en su mayoría se constituyen por pavimentos flexibles.

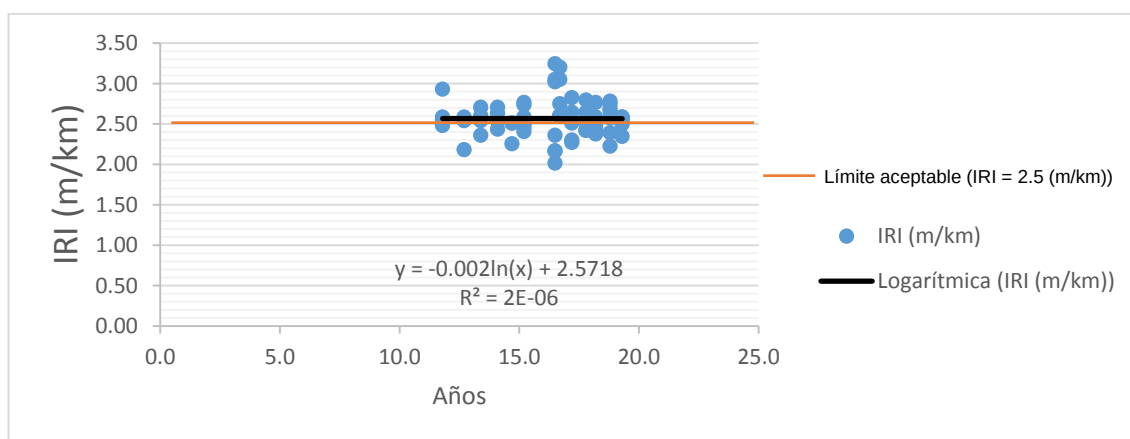
Una vez establecidos los grupos a evaluar, se procedió a la elaboración de las curvas preliminares de deterioro bajo un modelo agregado, aplicando la línea de tendencia logarítmica, toda vez que se asemeja al comportamiento de deterioro de los pavimentos. En el Anexo 1 se encuentra la Tabla 22 completa.

8.1 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 2:

El grupo 2 de tramos analizados corresponden a los tramos con las características de un tráfico NT1, es decir, número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, inferior a los 500.000 (N), un clima entre los 5°C y los 10°C, para un tipo de pavimento flexible.

Por consiguiente, en la Figura 14 se representa el comportamiento del IRI para un pavimento que está expuesto a las características del grupo 2, donde se puede observar que las curva tiene una tendencia mantenerse por encima del límite aceptable para el para el parámetro del IRI; esto puede deberse a que los datos analizados se encuentran en una región con climas bajos, el cual puede afectar la rugosidad del pavimento.

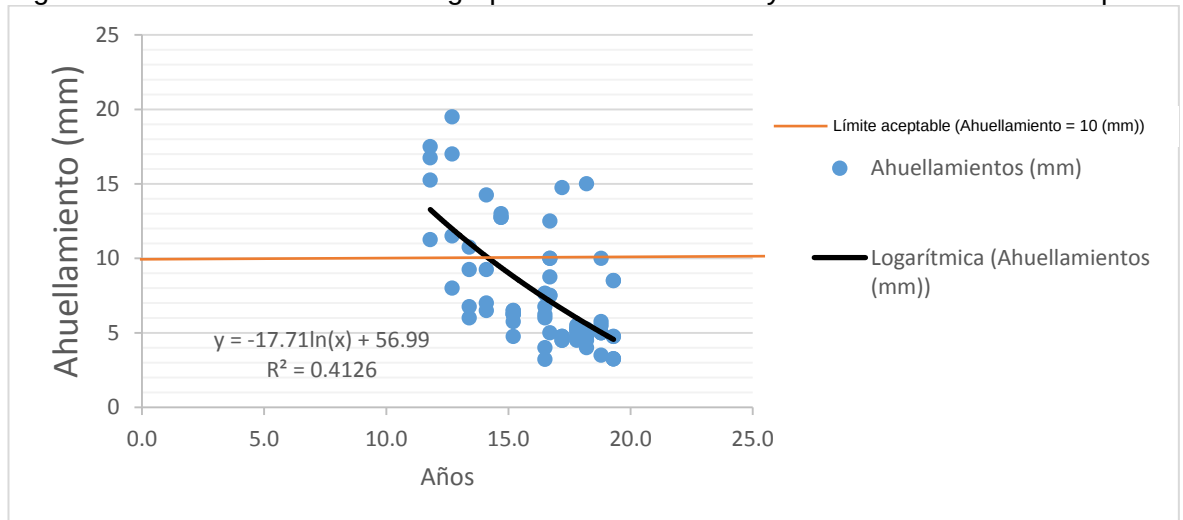
Figura 14. Curva de deterioro del grupo 2 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, en la Figura 15 donde se observa el comportamiento del Ahuellamiento en las condiciones descritas para el grupo 2, se evidencia que la curva muestra una tendencia a mejorar a través del tiempo, lo cual puede darse por las intervenciones oportunas que se hagan en la vía, sin embargo, se podría analizar si para esta condición el pavimento puede sufrir por Ahuellamiento en edades tempranas.

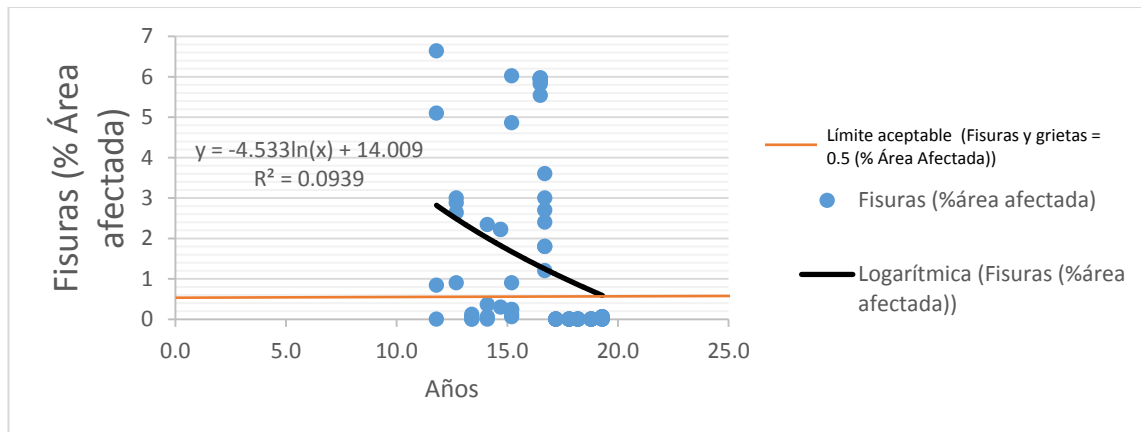
Figura 15. Curva de deterioro del grupo 2 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Figura 16 se analiza el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas en proyectos con poco tráfico y con temperaturas bajas, como se describen en el grupo 2, donde el comportamiento de la curva es a mejorar a través del tiempo, para entrar al límite aceptable para las carreteras de Colombia de un porcentaje de afectación por fisuras inferior al 0.5%, no obstante, en edades tempranas se podría intuir que este porcentaje de afectación es mayor al aceptable, para las condiciones descritas en el grupo 2.

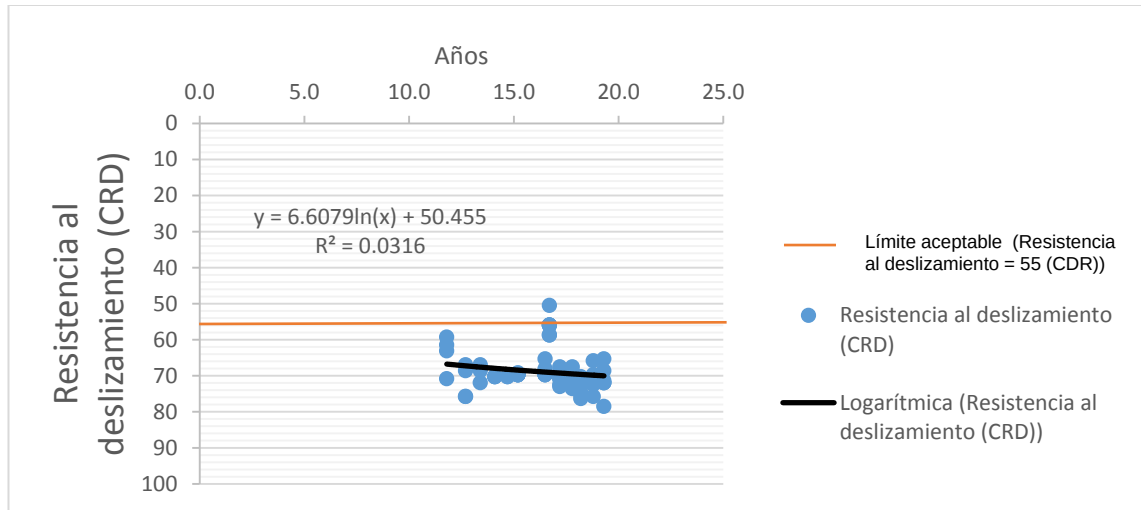
Figura 16. Curva de deterioro del grupo 2 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

A continuación, en la Figura 17 se presenta la curva del comportamiento del parámetro resistencia al deslizamiento, en la cual se puede observar que para las condiciones de un tráfico bajo y un clima frío, en un pavimento flexible la tendencia es a mantenerse dentro del rango del límite aceptable.

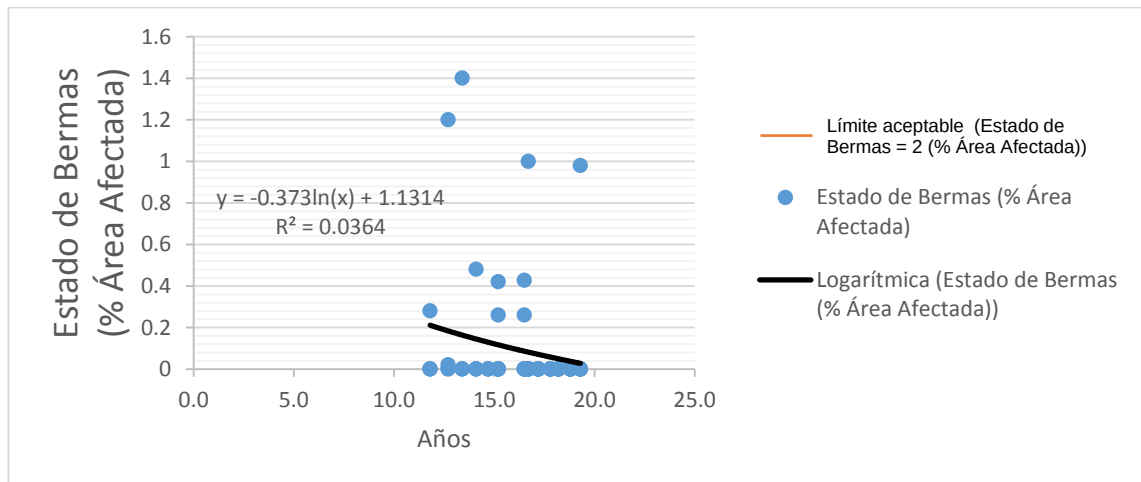
Figura 17. Curva de deterioro del grupo 2 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Seguidamente, en la Figura 18 se analiza el comportamiento del parámetro estado de bermas bajo unas condiciones de clima bajo y temperatura baja en un pavimento flexible, en donde los resultados arrojaron que este parámetro se encuentra dentro de un rango aceptable y mejorando a través del tiempo.

Figura 18. Curva de deterioro del grupo 2 - Estado de bermas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

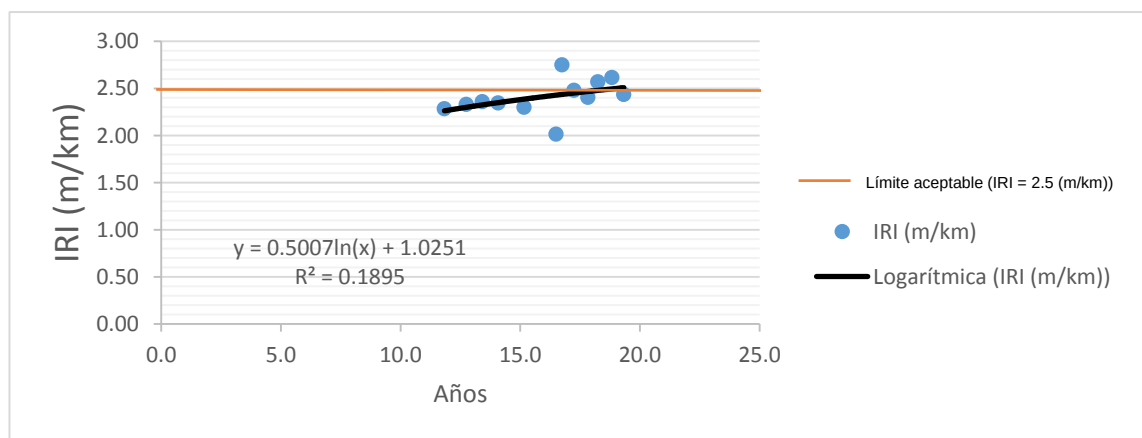
8.2 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 4:

El grupo 4 de tramos analizados corresponden a los tramos con las características de un tráfico NT2, es decir, número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior

a los 500.000 (N) e inferior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 5°C y los 10°C, para un tipo de pavimento flexible.

Por consiguiente, en la Figura 19 se encuentra el análisis del comportamiento de la rugosidad en condiciones de un tráfico medio y un clima bajo para un tipo de pavimento flexible, en la curva se puede observar el deterioro del pavimento por IRI, el cual sale de los límites aceptables después de 6 años, de lo cual se puede identificar que el deterioro es lento, con respecto a la vida útil del pavimento, la cual puede estar entre los 20 y 25 años, según Reyes y Rondón⁵³.

Figura 19. Curva de deterioro del grupo 4 - IRI vs. Tiempo

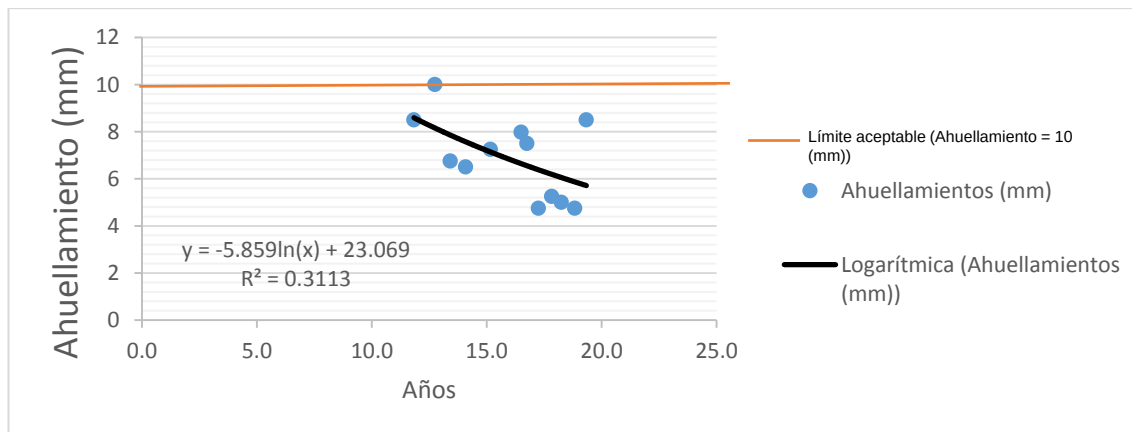


Fuente: elaboración propia

Como se puede ver en la Figura 20, se describe el comportamiento del parámetro de Ahuellamiento y deformaciones para condiciones de un tráfico medio y temperaturas bajas entre los 5°C y 10°C, el comportamiento de este parámetro tiene una tendencia a mejora a través del tiempo y estar dentro de los límites aceptables para las carreteras colombianas.

⁵³ RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño. Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 2015, p. 521.

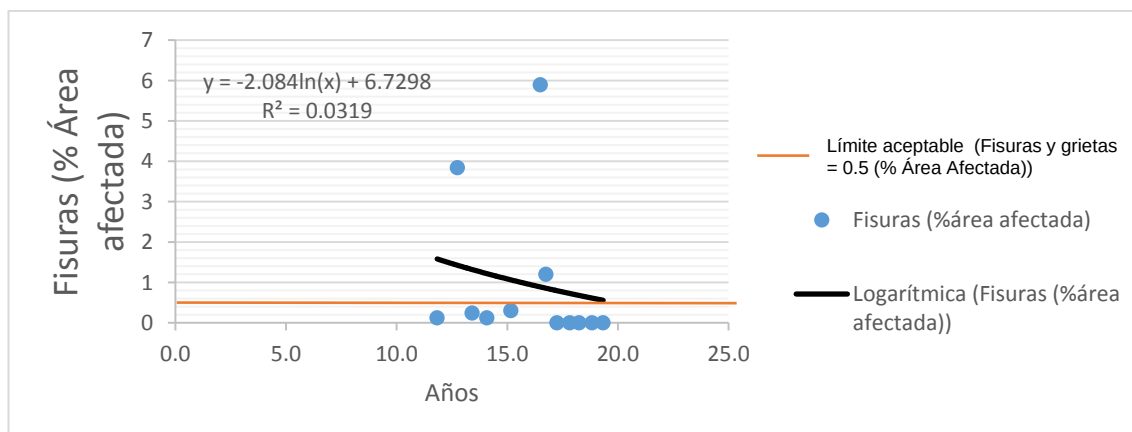
Figura 20. Curva de deterioro del grupo 4 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De esa manera, en la Figura 21 se describe el comportamiento del parámetro fisuras y grietas para las condiciones descritas en el grupo 4, donde el comportamiento es de mejora hasta al alcanzar el porcentaje de aceptación del parámetro, empero, la curva muestra que el parámetro no está lejos del límite aceptable.

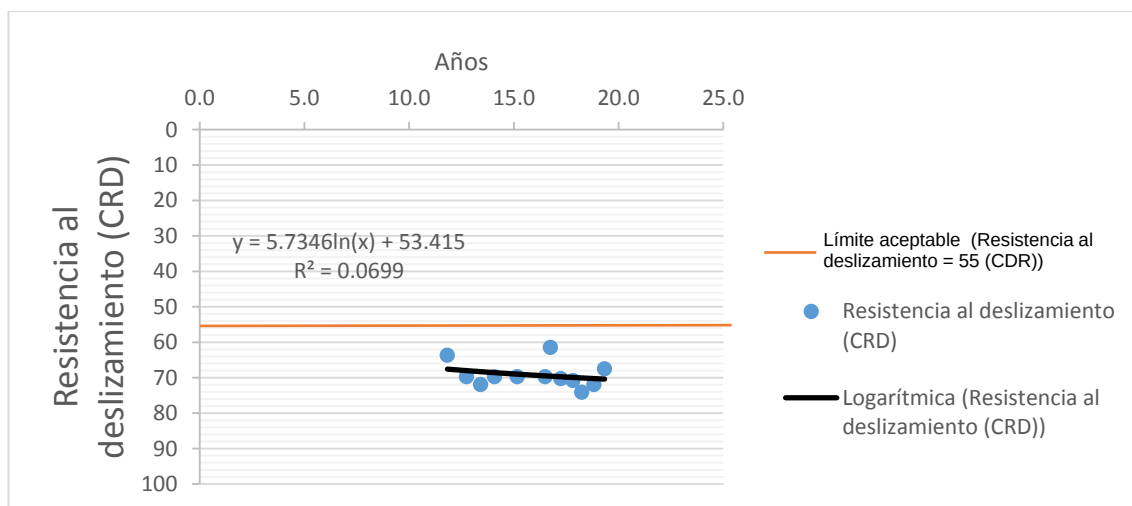
Figura 21. Curva de deterioro del grupo 4 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De igual forma, en la Figura 22 se encuentra la descripción del comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento, que para las condiciones descritas en el grupo 4 se mantiene dentro del límite aceptable con una tendencia de la curva a entrar en un mejoramiento a través del tiempo.

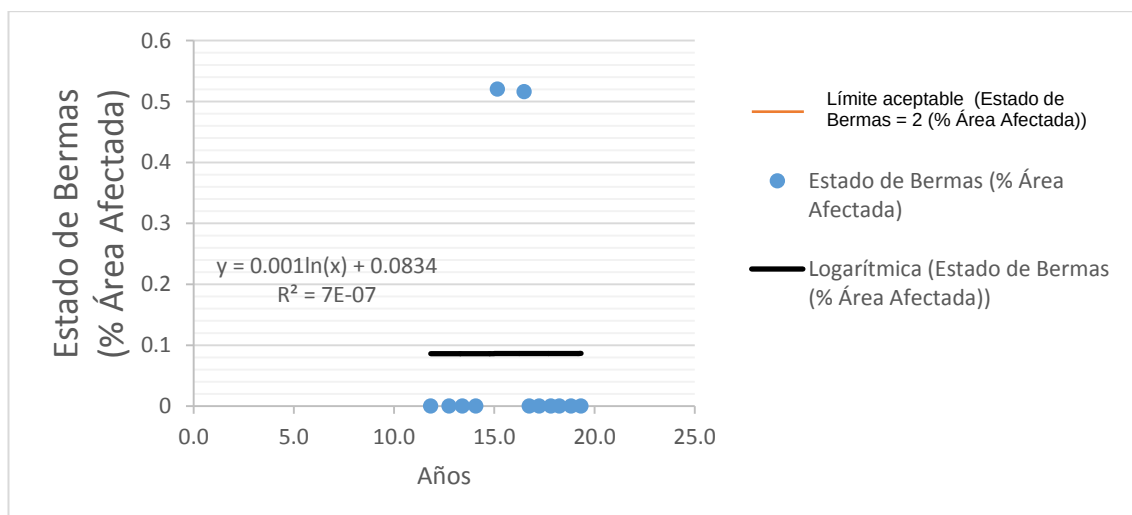
Figura 22. Curva de deterioro del grupo 4 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De esa manera, en la Figura 23 se describe el comportamiento del estado de berma para las condiciones del grupo 4, se puede analizar que la tendencia es a mantenerse lineal a través del tiempo en un rango del 0.09%, estando dentro del límite aceptable del parámetro.

Figura 23. Curva de deterioro del grupo 4 - Estado de bermas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

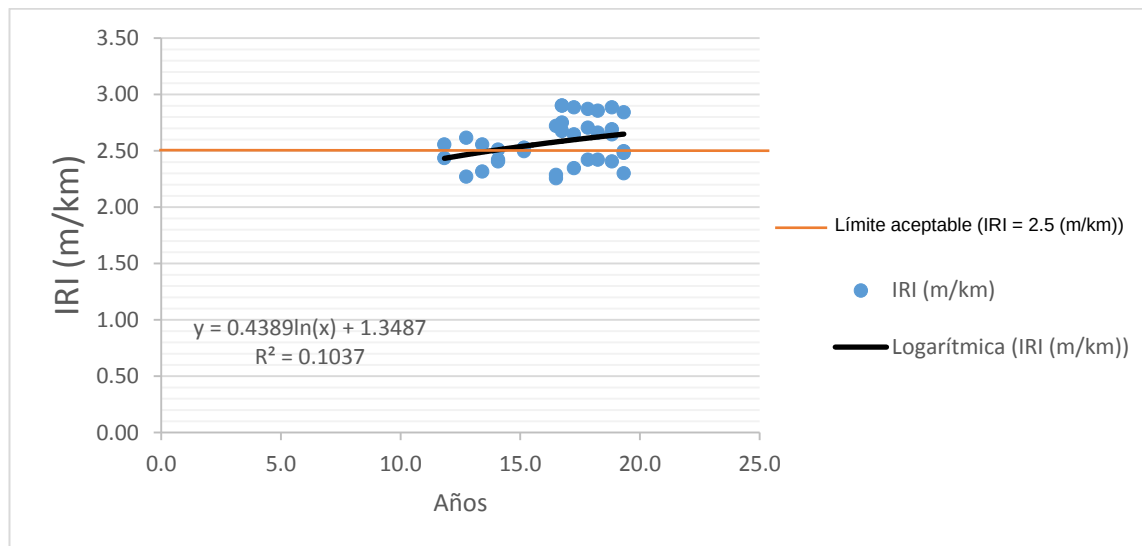
8.3 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 6

El grupo 6 de tramos analizados corresponden a los tramos con las características de un tráfico NT3, es decir, número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior

a los 5.000.000 (N), un clima entre los 5 y 10 °C, para un tipo de pavimento flexible.

Así pues, en la Figura 24 se describe el comportamiento de la rugosidad mediante el IRI, para un pavimento flexible que tiene un tráfico alto en un clima frío, de modo que el comportamiento es de deterioro a través del tiempo, donde después de aproximadamente el segundo año de la evaluación el parámetro en estas condiciones sale de los límites acatables por la normatividad colombiana.

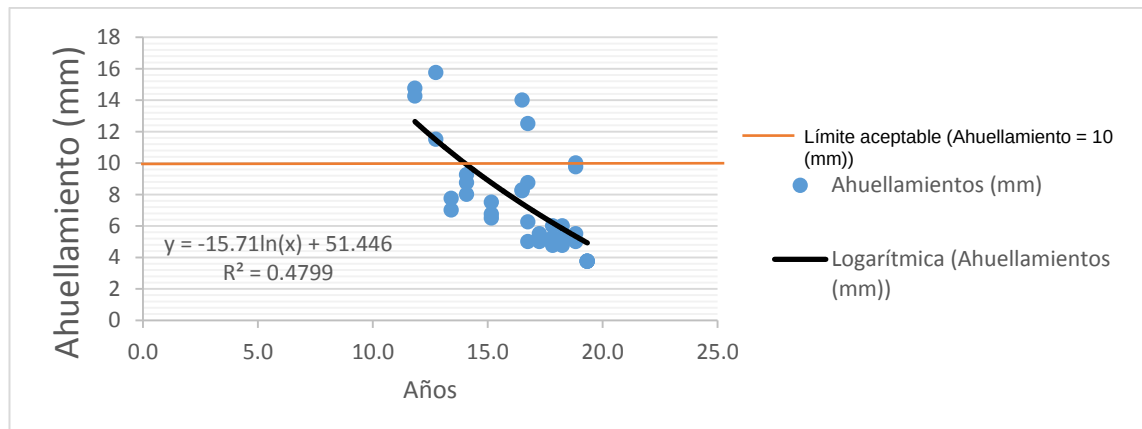
Figura 24. Curva de deterioro del grupo 6 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Entre tanto, en la Figura 25 se representa el comportamiento del parámetro de Ahuellamiento y deformaciones en un pavimento con las características descritas en el grupo 6, donde la tendencia de la curva es un mejoramiento; no obstante, aproximadamente en los dos primeros años de la evaluación el parámetro se encontraba fuera del límite aceptable.

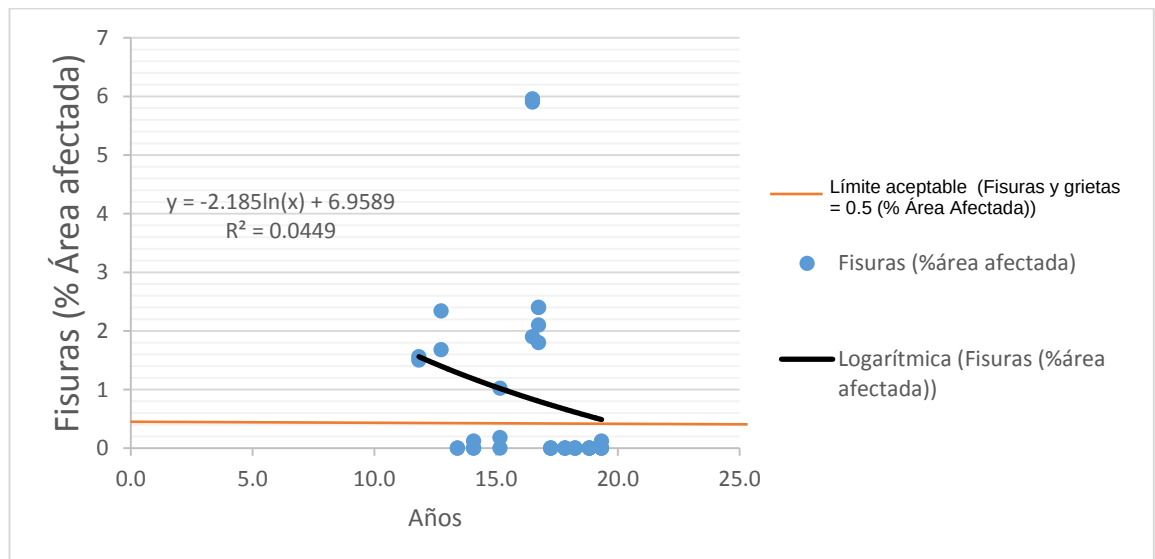
Figura 25. Curva de deterioro del grupo 6 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De igual modo, en la Figura 26 se representa el comportamiento del parámetro fisuras y grietas, donde se identifica que para las condiciones del grupo 6, este se tiene una curva que muestra un mejoramiento; sin embargo, el mismo se encuentra fuera de los límites aceptables, lo que puede deberse al alto flujo vehicular en un clima frío.

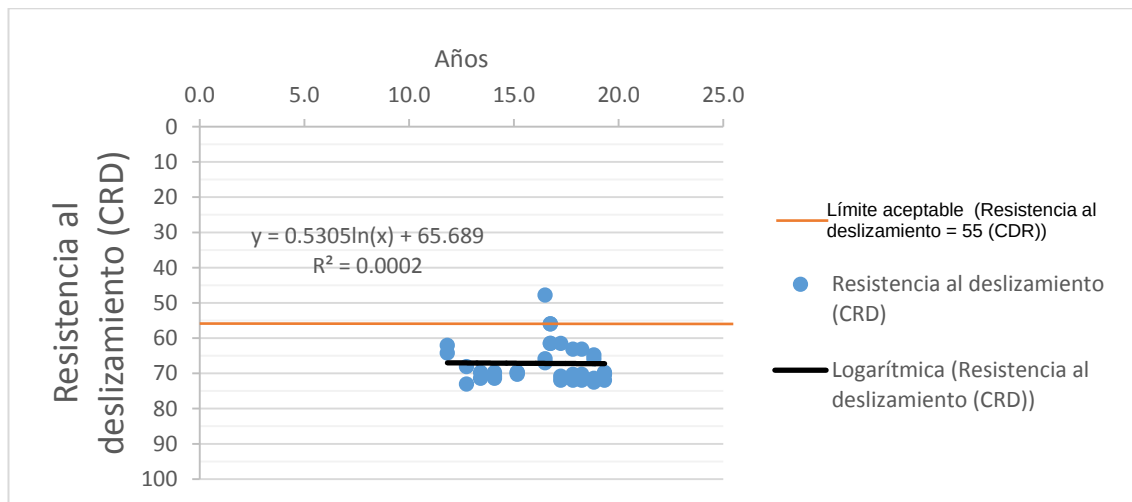
Figura 26. Curva de deterioro del grupo 6 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Para el caso del parámetro de Resistencia al deslizamiento que se mide mediante el coeficiente de resistencia al deslizamiento CDR en las condiciones de un tráfico NT3, es decir, alto y una temperatura entre los 5°C y los 10°C; en la Figura 27 se identificó que el comportamiento de este parámetro bajo las condiciones descritas en el grupo 6 se mantiene estable y dentro de los límites aceptables, con una leve tendencia a mejorar a través del tiempo.

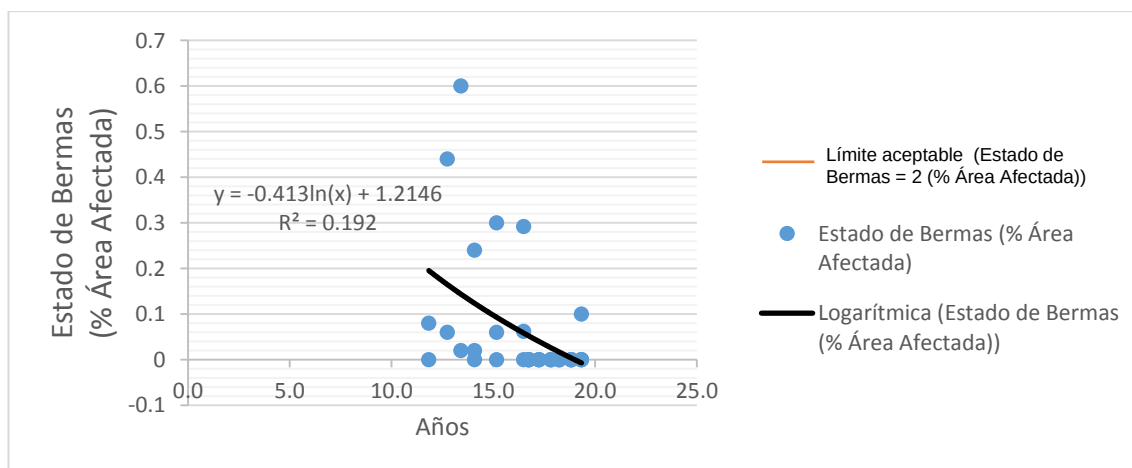
Figura 27. Curva de deterioro del grupo 6 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por otra parte, el parámetro de estado de bermas presenta su comportamiento bajo las condiciones del grupo 6 en la Figura 28, donde se puede evidenciar que el mismo se encuentra dentro del rango aceptable por la normatividad colombiana y tiene una tendencia a que el porcentaje de área de afectación por este parámetro sea el 0%.

Figura 28. Curva de deterioro del grupo 6 - Estado de bermas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

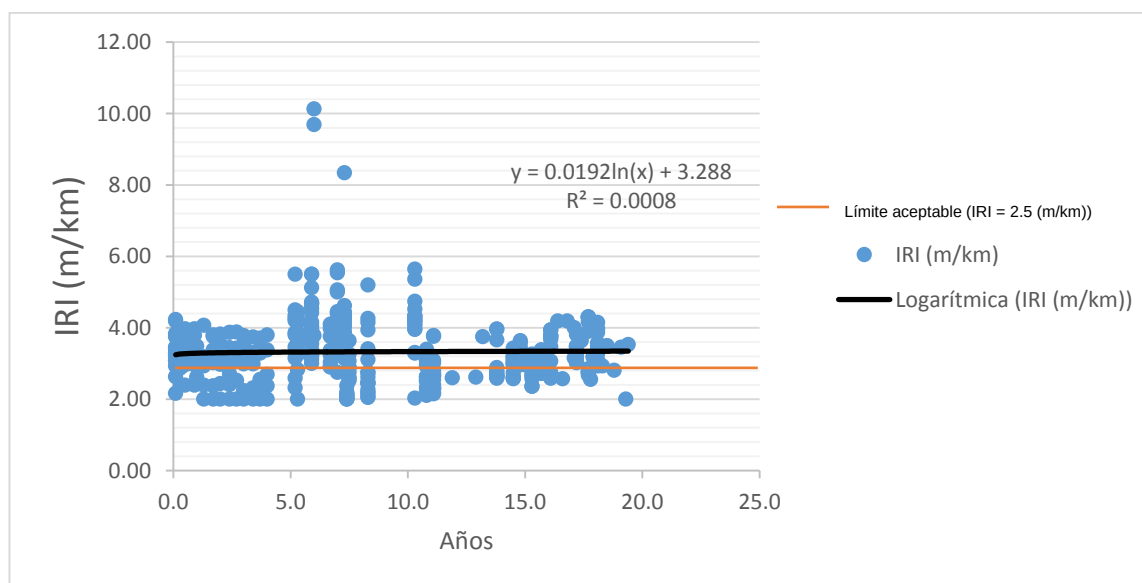
8.4 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 10:

El grupo 10 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT2, es decir, número de ejes equivalentes de 8.2

toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 500.000 (N) e inferior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 10 y 15°C, para un tipo de pavimento flexible.

Entonces, en la Figura 29 se presenta el comportamiento del IRI en las condiciones del grupo 10, esto quiere decir, un tráfico medio y una temperatura media baja entre los 10°C y los 15°C, para un tipo de pavimento flexible se evidencia que el comportamiento de este parámetro bajo estas condiciones es de mantenerse en un rango de los 3.0 (M/Km), a lo largo del tiempo; pero este valor se encuentra fuera de los límites aceptables en la normatividad colombiana.

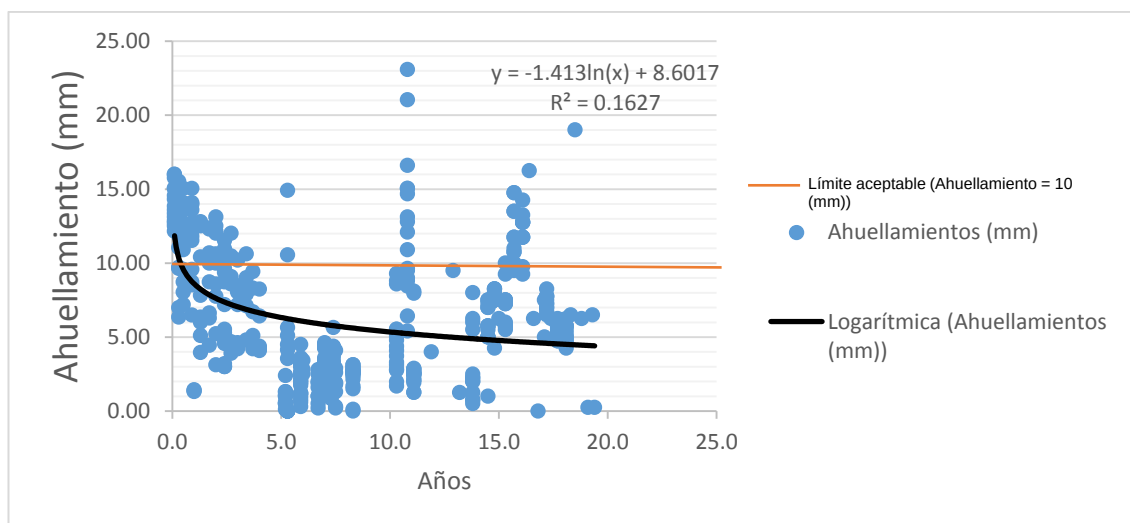
Figura 29. Curva de deterioro del grupo 10 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por consiguiente, en la Figura 30 se encuentra reflejado el comportamiento de Ahuellamiento y deformaciones, bajo las características del grupo 10, donde se evidencia que a edades tempranas el Ahuellamiento tiende a ser mayor y con el paso del tiempo se mantiene en un nivel constante.

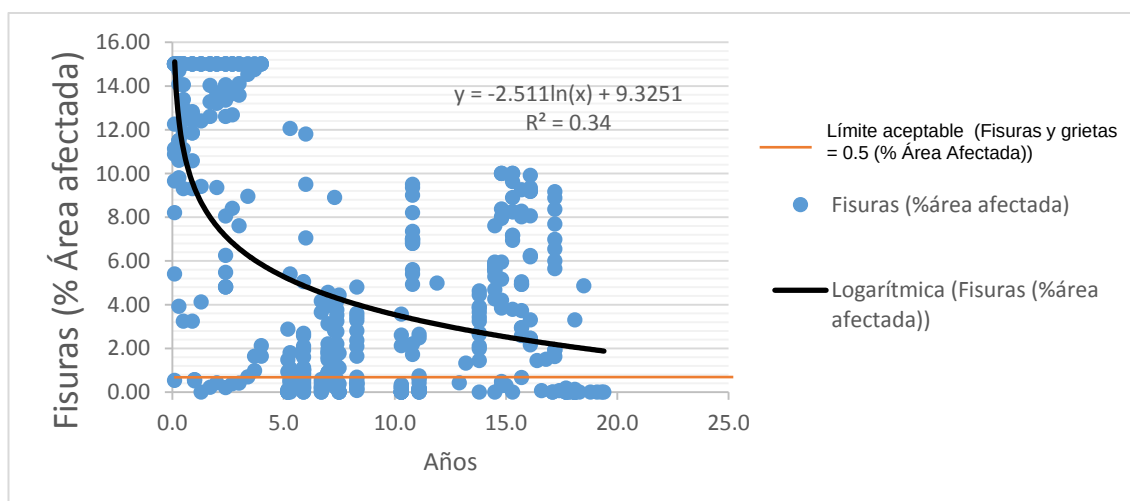
Figura 30. Curva de deterioro del grupo 10 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 31 se presenta el comportamiento del parámetro fisuras y grietas para las condiciones de un tráfico medio y una temperatura media baja en un pavimento flexible, donde se evidencia un deterioro a edades tempranas el cual se nivela con el paso del tiempo; no obstante, el comportamiento de este parámetro esta fuera de los límites aceptables.

Figura 31. Curva de deterioro del grupo 10 - Fisuras y grietas vs. Tiempo

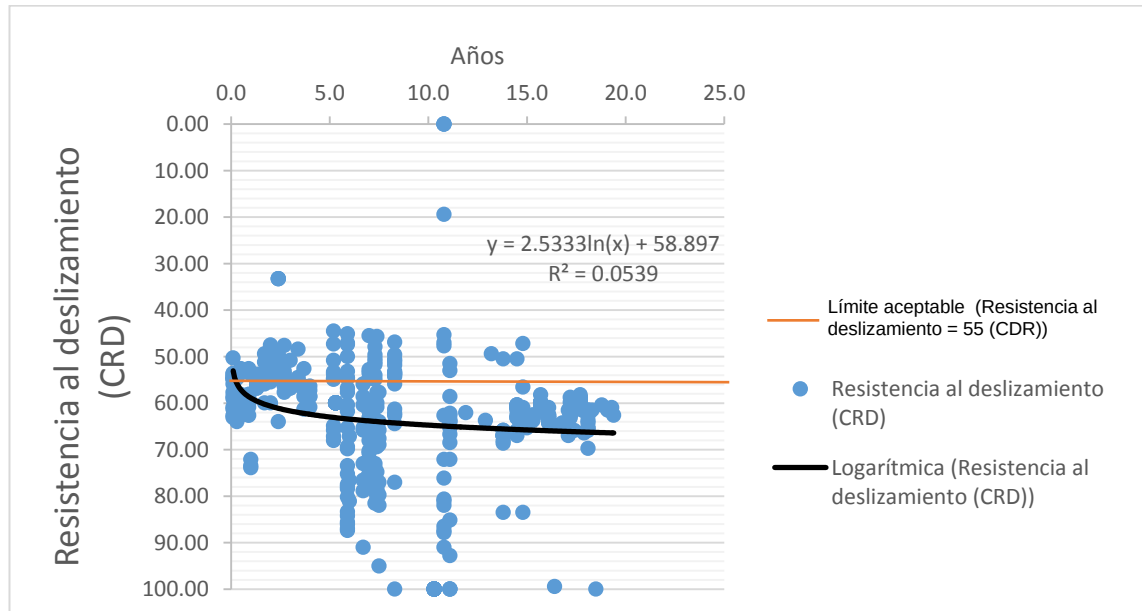


Fuente: elaboración propia

Cabe resaltar que el parámetro de resistencia al deslizamiento para las condiciones del grupo 10 se describe en la Figura 32, donde el comportamiento

es a mejorar a través de los años y en las edades tempranas del pavimento, el mismo presenta una tendencia a ser afectado por esta condición; sin embargo, el parámetro mejora en edades posteriores y a encontrarse dentro del límite aceptable.

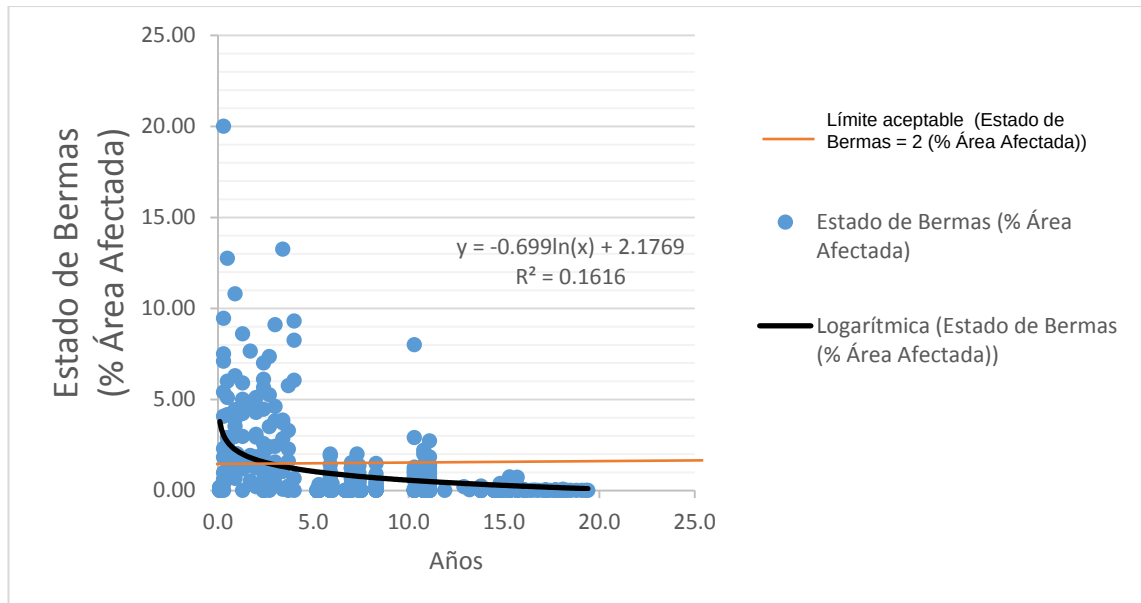
Figura 32. Curva de deterioro del grupo 10 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Entre tanto, para el caso del parámetro de estado de bermas, el comportamiento del mismo se describe en la Figura 33, para las condiciones descritas en el grupo 10, se observa que en edades tempranas este parámetro no cumple; empero, después de 3 años de entrada de operación de la vía, el comportamiento de este parámetro mejora y se encuentra dentro de los límites aceptables.

Figura 33. Curva de deterioro del grupo 10 - Estado de bermas vs. Tiempo



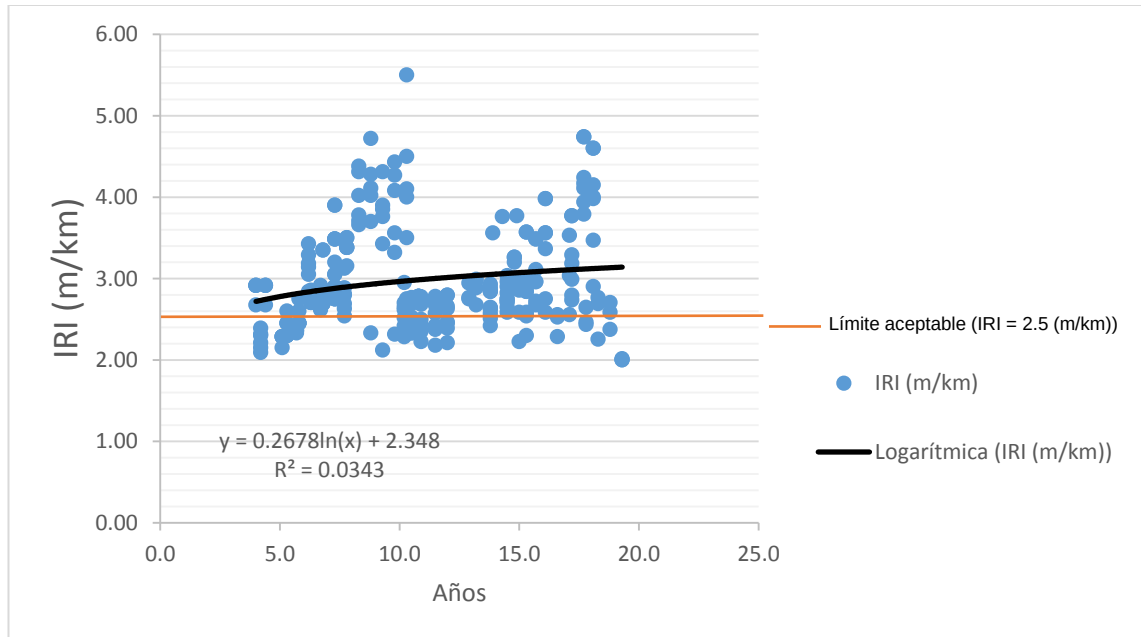
Fuente: elaboración propia

8.5 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 12:

El grupo 12 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT3, es decir, número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 10°C y los 15°C, y un tipo de pavimento flexible.

Mientras tanto, el parámetro de IRI para condiciones de un tráfico alto y un clima medio bajo en un pavimento flexible se describe en la Figura 34, donde se evidencia el deterioro del mismo a través del tiempo, encontrándose en una condición donde el IRI no cumple los límites aceptables en la normativa colombiana.

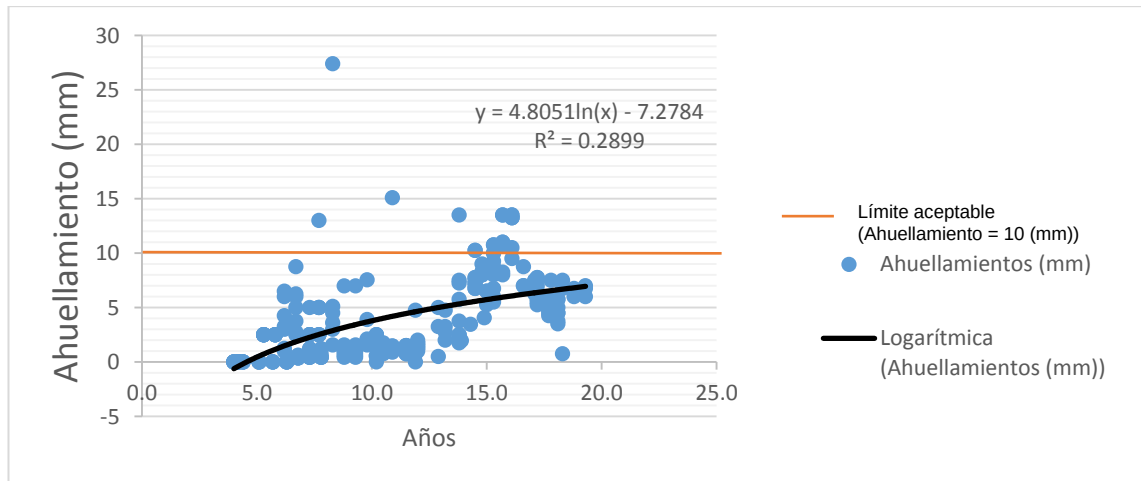
Figura 34. Curva de deterioro del grupo 12 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De tal modo, en la Figura 35 se describe el comportamiento del Ahuellamiento y deformaciones bajo las condiciones del grupo 12, donde se evidencia un deterioro; sin embargo, el mismo se encuentra dentro de los límites aceptables.

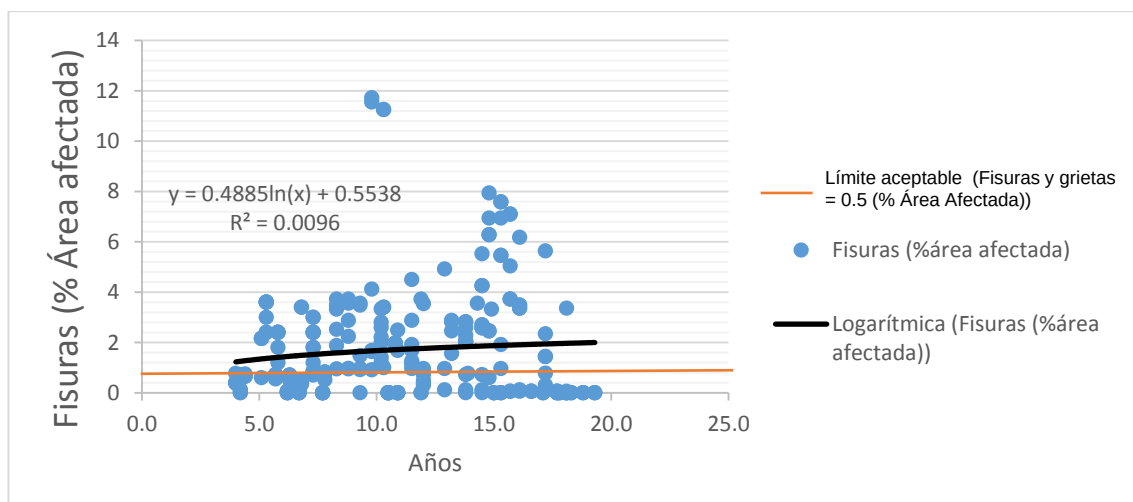
Figura 35. Curva de deterioro del grupo 12 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Ahora, en la Figura 36 se representa el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas en las condiciones descritas en el grupo 12, de un tráfico alto para un clima medio bajo en un pavimento flexible, donde se evidencia una tendencia deterioro fuera del límite aceptable, aunque el mismo se mantiene en un rango entre el 1% y 2% de área afectada por este parámetro.

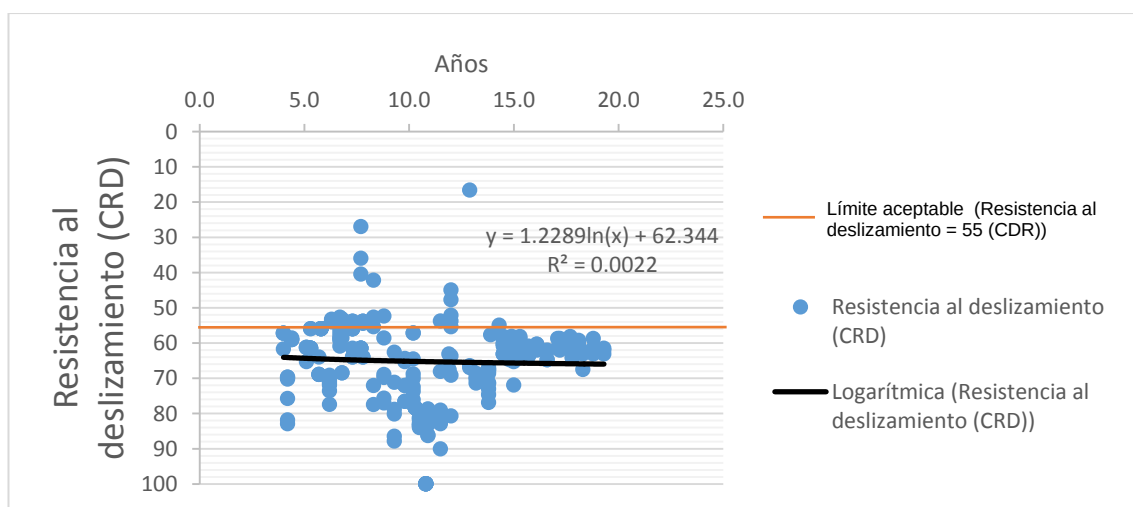
Figura 36. Curva de deterioro del grupo 12 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Seguidamente, en la Figura 37 se describe el comportamiento del parámetro Resistencia al deslizamiento para las condiciones del grupo 12, donde la curva muestra una tendencia a mantenerse constante a través del tiempo, en un rango de los 75 CDR.

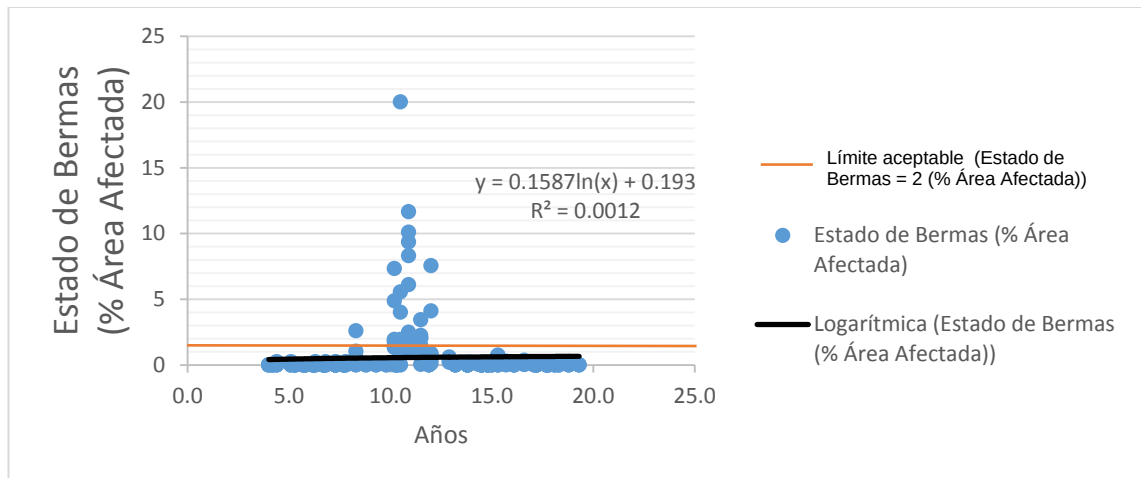
Figura 37. Curva de deterioro del grupo 12 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Igualmente, en la Figura 38 se describe el comportamiento del parámetro de estado de bermas bajo las condiciones del grupo 12, donde el comportamiento de este parámetro es a mantenerse constante dentro de los mites aceptables a lo largo del tiempo.

Figura 38. Curva de deterioro del grupo 12 - Estado de bermas vs. Tiempo



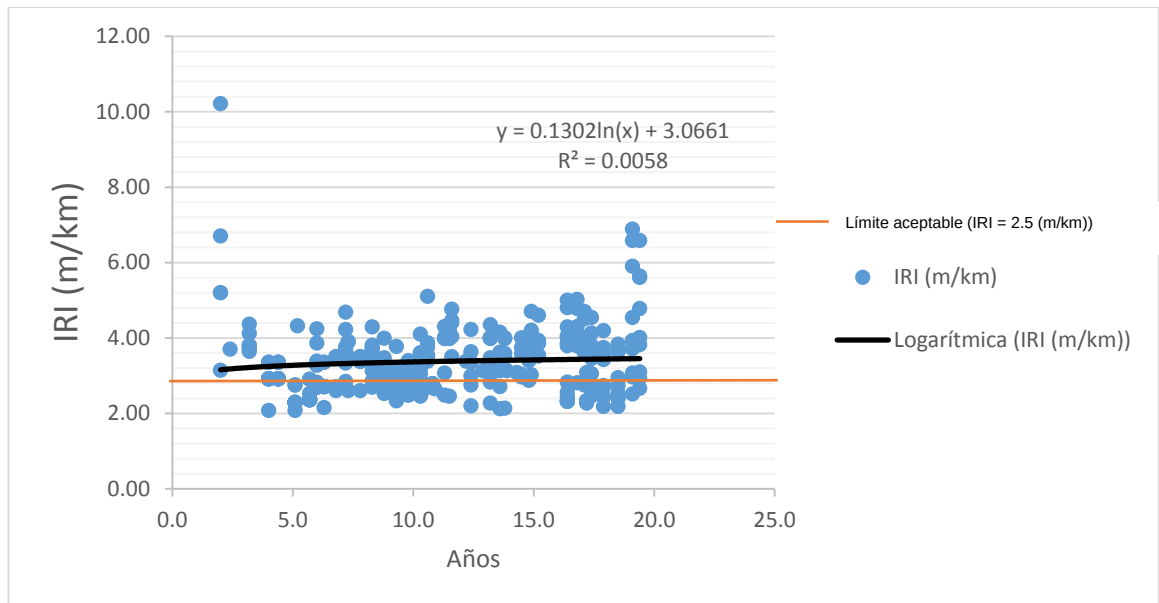
Fuente: elaboración propia

8.6 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 16:

El grupo 16 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT2, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 500.000 (N) e inferior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 15°C y los 20°C, para un tipo de pavimento flexible.

Por lo tanto, en la Figura 39 se describe el comportamiento del parámetro de rugosidad IRI para las condiciones del grupo 16, en otras palabras, un tráfico medio con una temperatura media entre los 15°C y lo 20°C para un pavimento de tipo flexible, donde se aprecia una leve tendencia de deterioro fuera del límite aceptable manteniéndose en el rango de 3.0 (M/Km).

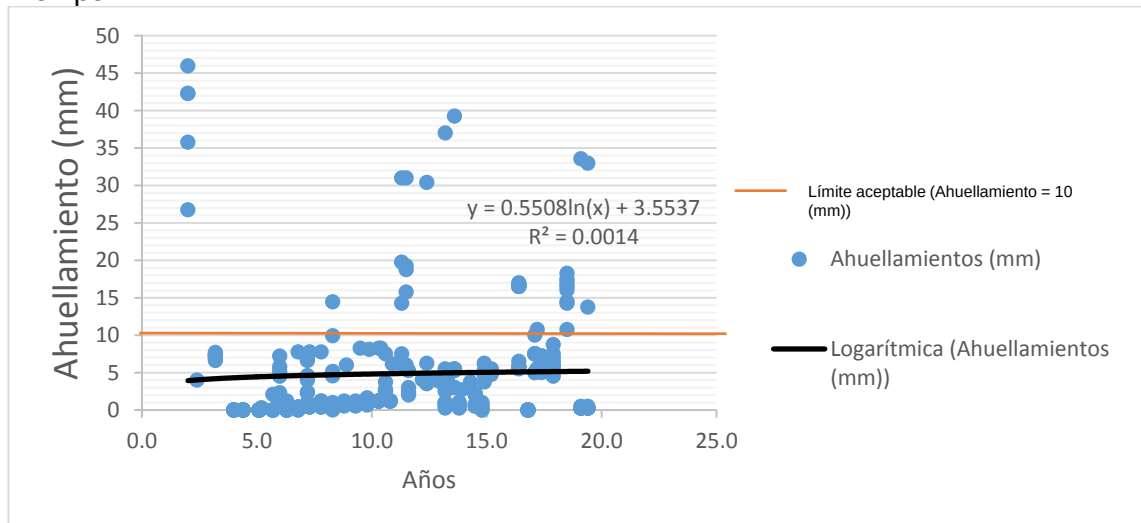
Figura 39. Curva de deterioro del grupo 16 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

A continuación, en la Figura 40 se describe el comportamiento del parámetro de Ahuellamiento y deformaciones para las condiciones descritas en el grupo 16, donde la curva muestra una tendencia de un leve deterioro, manteniéndose dentro de los límites aceptables en un rango entre los 4 mm y los 5 mm; tal deterioro ocurre a lo largo de 18 años.

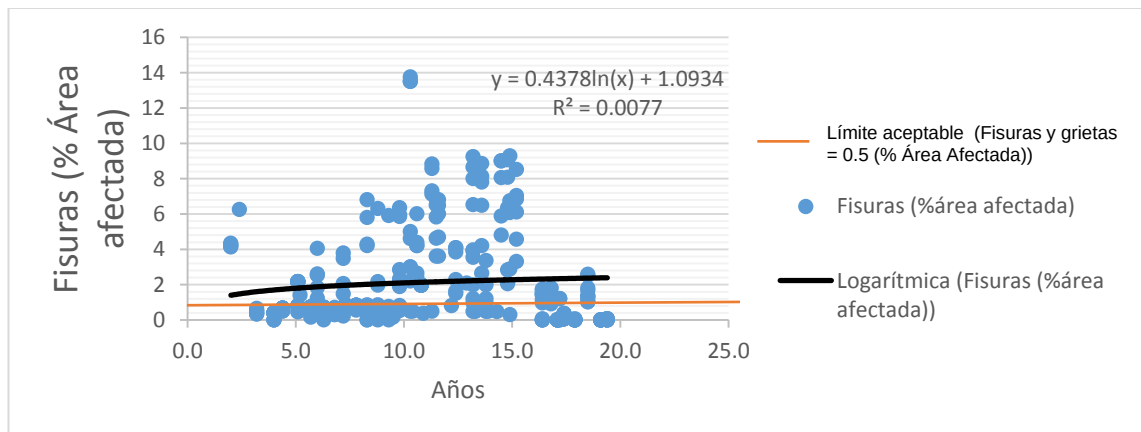
Figura 40. Curva de deterioro del grupo 16 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

En ese orden de ideas, en la Figura 41 se representa el deterioro del parámetro de fisuras y grietas, para las condiciones de un tráfico medio en un clima entre los 15°C y los 20°C, donde se identifica un deterioro leve fuera de los límites aceptables; este deterioro inició en el 2 de entrada en operación de la vía con un valor 1.7% del área afectada con presencia de fisuras y grietas, y en el año 20 se encuentra un valor de 2.5% del área afectada por el mismo parámetro.

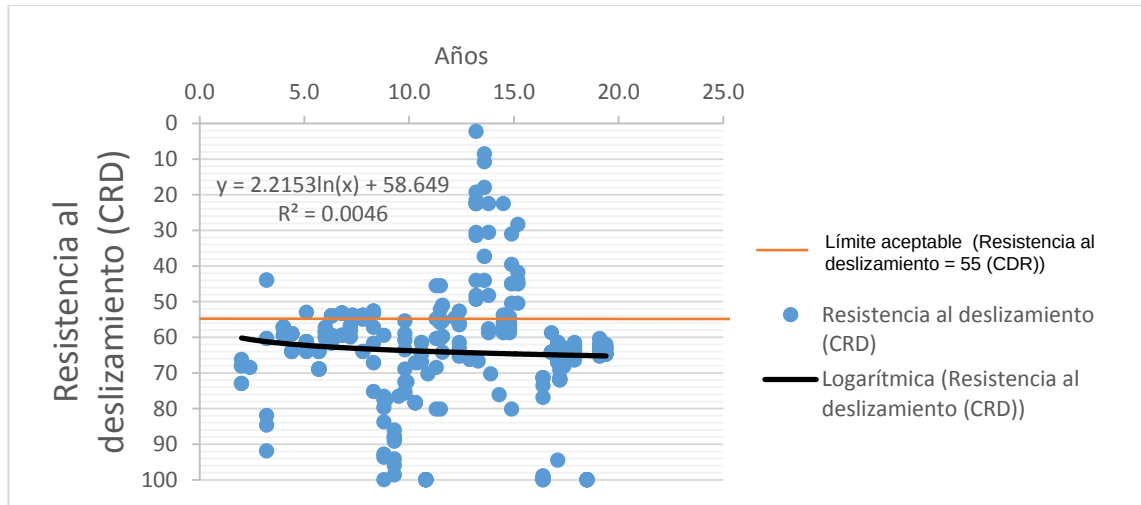
Figura 41. Curva de deterioro del grupo 16 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Figura 42 se refleja el comportamiento del parámetro de Resistencia al deslizamiento medido mediante el CDR, bajo las condiciones descritas en el grupo 20, en dicha curva se puede observar que la tendencia es a presentar un mejoramiento leve a lo largo de los 18 años evaluados.

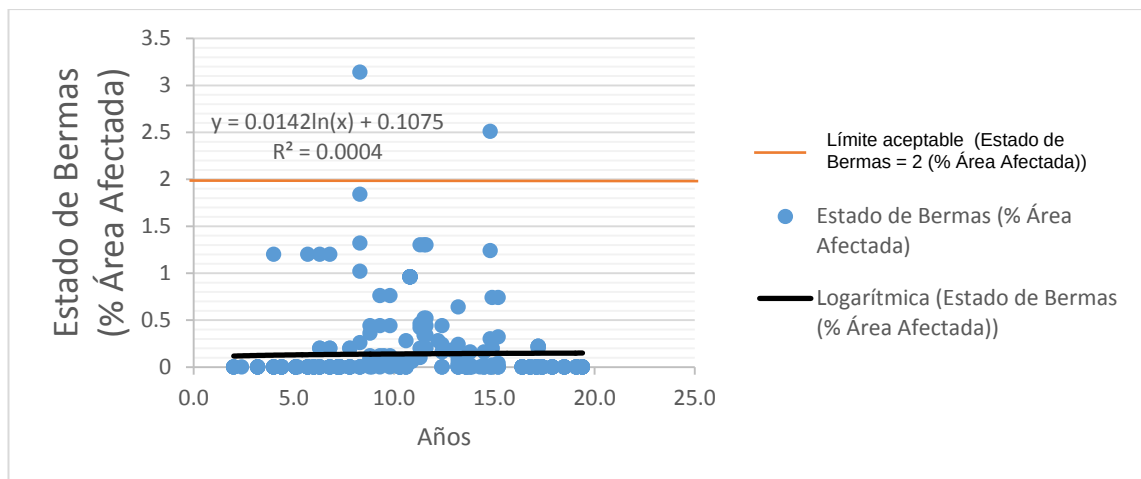
Figura 42. Curva de deterioro del grupo 16 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

A continuación, en la Figura 43 se describe el comportamiento del parámetro de estado de bermas para las condiciones del grupo 16, donde se observa una tendencia a mantenerse en el rango de 0.1 % del área afectad por mal estado de las bermas, lo cual denota el buen comportamiento de este parámetro en vías bajo la condición de un tráfico medio y un clima entre los 15°C y 20°C.

Figura 43. Curva de deterioro del grupo 16 - Estado de bermas vs. Tiempo



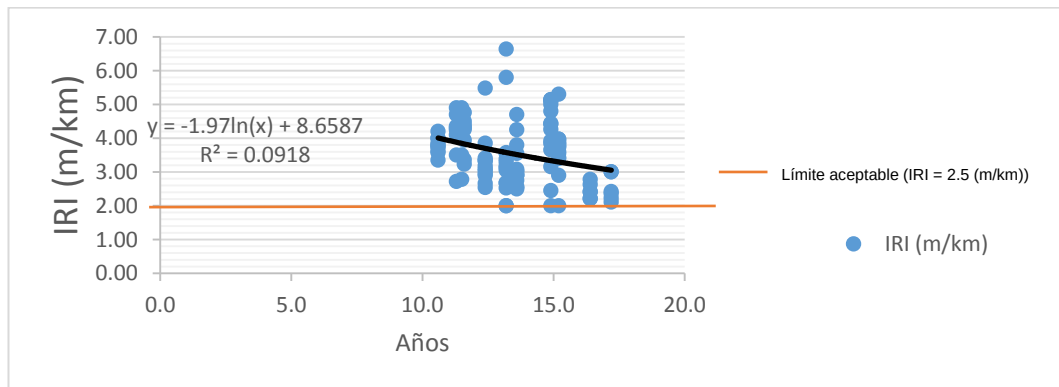
Fuente: elaboración propia

8.7 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 18

El grupo 18 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT3, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 15°C y los 20°C, para un tipo de pavimento flexible.

De tal manera, el parámetro de IRI para las condiciones del grupo 18 se describe en la Figura 44, donde se evidencia una tendencia de mejoramiento de la curva mostrando que la misma en el año 10 muestra un valor de IRI de 4.0 (m/km) y en el año 17, este valor se reduce a 3.0 (m/km), de modo que se evidencia un mejoramiento en la rugosidad del pavimento en un periodo de 7 años; empero, este rango de valores de Índice de Rugosidad se encuentra fuera de lo requerido por la normatividad colombiana.

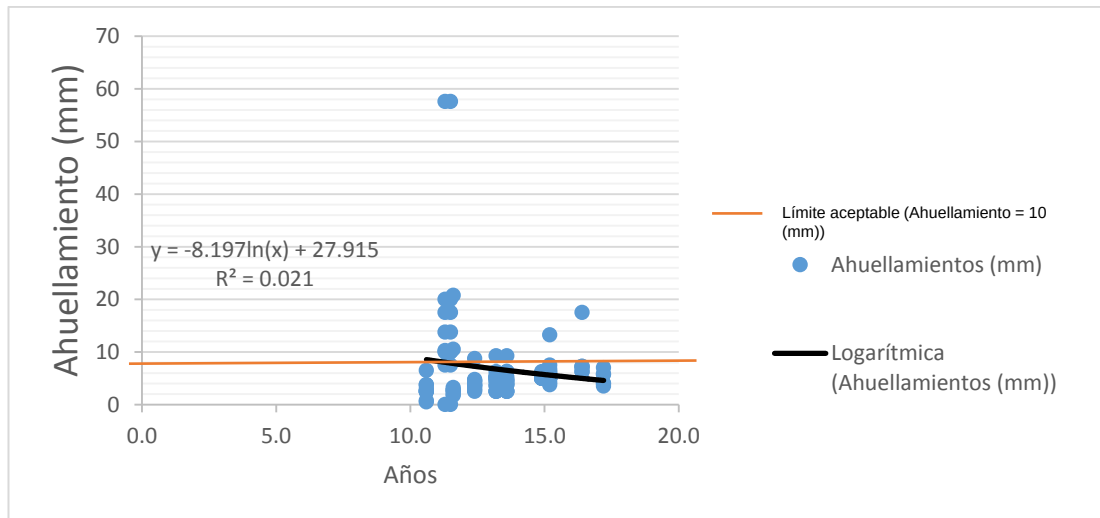
Figura 44. Curva de deterioro del grupo 18 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De esa forma, en el caso del parámetro de ahuellamiento y deformaciones su comportamiento, bajo las condiciones de un tráfico alto en con una temperatura entre los 15°C y los 20°C, se describe en la Figura 45, en la cual se puede identificar que el comportamiento de la curva muestra una tendencia de mejoramiento, en donde el ahuellamiento en el año 10 fue de 9 mm y en el año 17 pasó a ser 3.5 mm; en este periodo de 7 años el ahuellamiento fue menor. Dichos valores se encuentran dentro del rango aceptable de la normatividad colombiana.

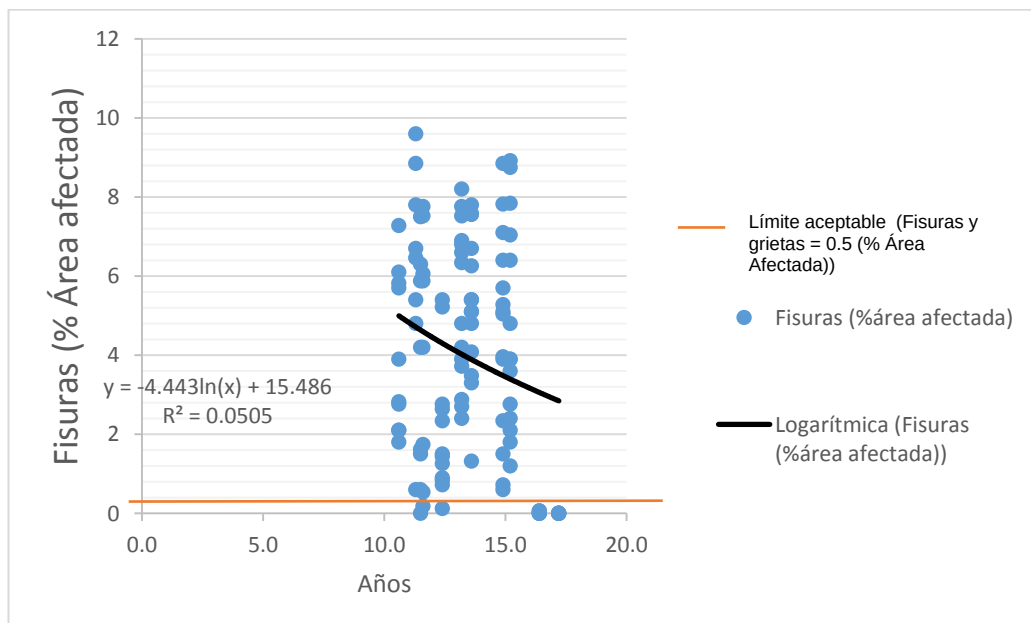
Figura 45. Curva de deterioro del grupo 18 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por consiguiente, el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas, bajo las condiciones del grupo 18, se describe en la Figura 46, donde la curva se encuentra fuera del límite aceptable con una tendencia a disminuir la afectación de la vía por la presencia de fisuras y grietas en el pavimento, pasando del 5% aproximadamente en el año 10, al 2.5% aproximadamente para el año 17.

Figura 46. Curva de deterioro del grupo 18 - Fisuras y grietas vs. Tiempo

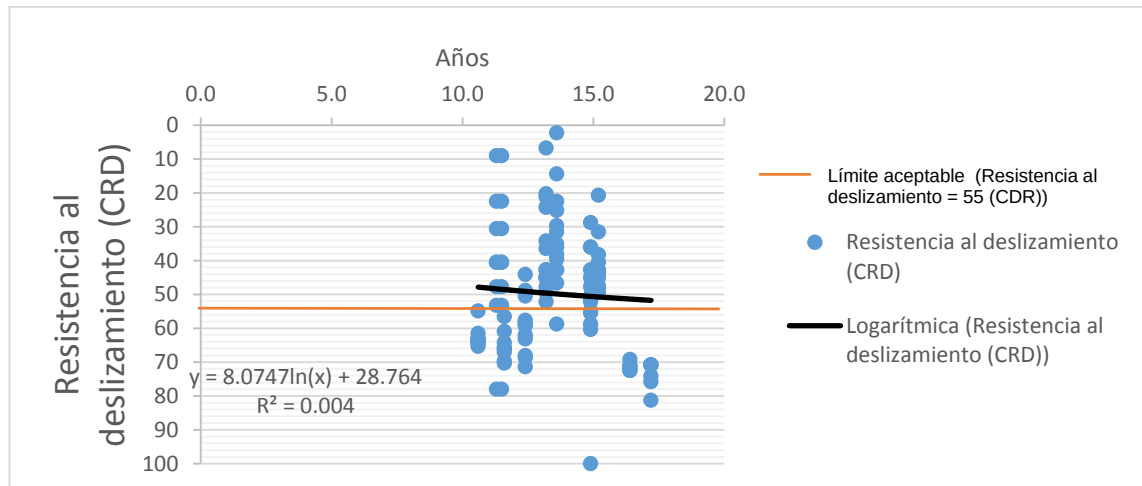


Fuente: elaboración propia

En la Figura 47 se describe el comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento para las condiciones del grupo 18, donde se halla que la curva

muestra una tendencia al mejoramiento; aunque dichos valores se encuentran fuera de los límites aceptables por la normatividad Colombia y los mismos, en un periodo 7 años, pasan de un CDR de 49 a un CDR de 51.

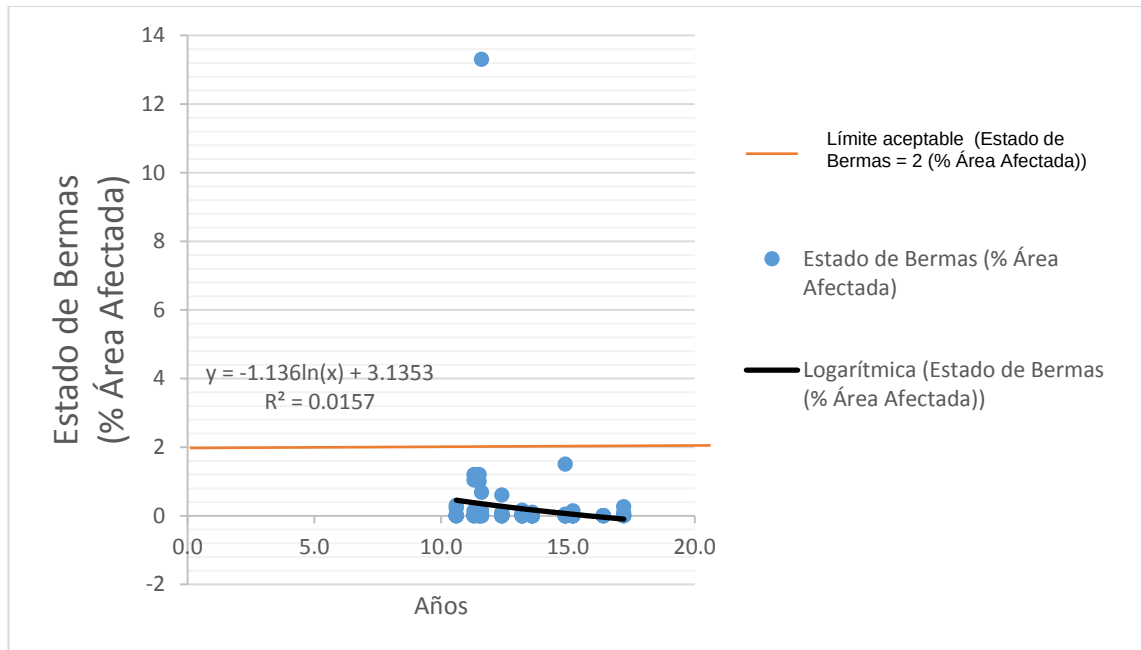
Figura 47. Curva de deterioro del grupo 18 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Como puede evidenciarse, en la Figura 48 se describe el comportamiento del parámetro de estado de bermas para las condiciones de un tráfico alto en un clima entre los 15°C y los 20°C, por lo que se puede apreciar que este parámetro tiene una tendencia de mejoramiento en un periodo de 7 años y se mantiene dentro de los límites aceptables, con un excelente comportamiento, acercándose al 0% del área afectad por un mal estado de las bermas en las vías, con las características del grupo 18.

Figura 48. Curva de deterioro del grupo 18 - Estado de bermas vs. Tiempo



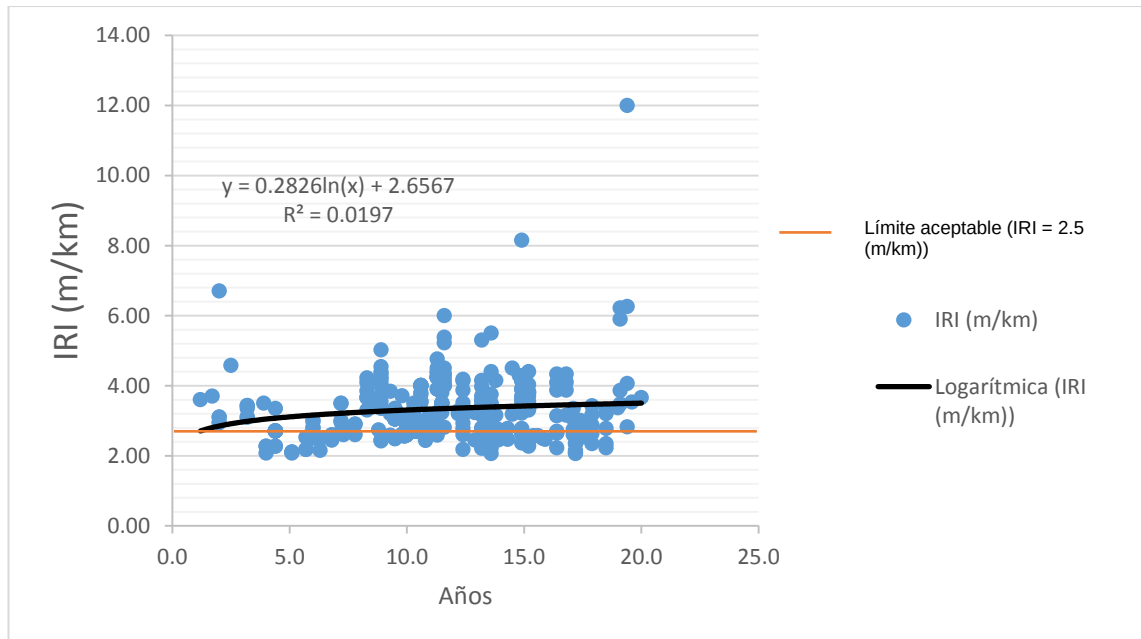
Fuente: elaboración propia

8.8 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 22

El grupo 22 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT2, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 500.000 (N) e inferior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 20°C y los 25°C, para un tipo de pavimento flexible.

Entre tanto, el parámetro de IRI bajo las condiciones de un tráfico medio NT2 y un clima entre los 20°C y los 25°C, para un tipo de pavimento flexible, se refleja en la Figura 49, con un deterioro que aumenta a través de los años y está por fuera de los límites aceptables, de manera que la curva muestra que del año 1 al año 20, el IRI pasa de 2.5 (M/Km) a 3.6 (M/Km) de afectación de la vía en 20 años.

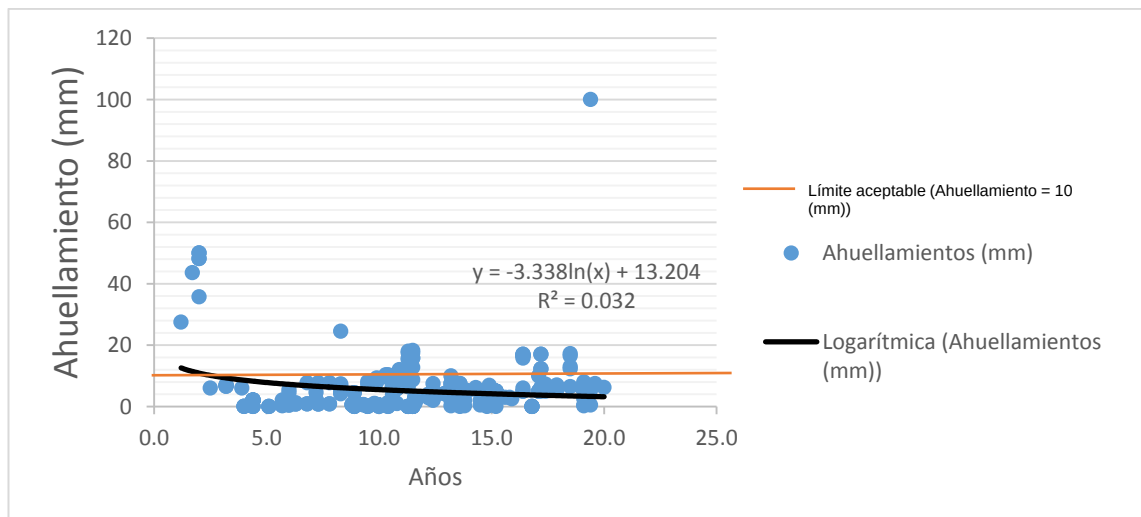
Figura 49. Curva de deterioro del grupo 22 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, en la Figura 50 se observa el comportamiento del Ahuellamiento y las deformaciones para un proyecto con las condiciones del grupo 22, donde la curva expone un mejoramiento a través de los años, pasando de un valor no aceptado a entrar en el rango del límite aceptable por la normatividad colombiana.

Figura 50. Curva de deterioro del grupo 22 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo

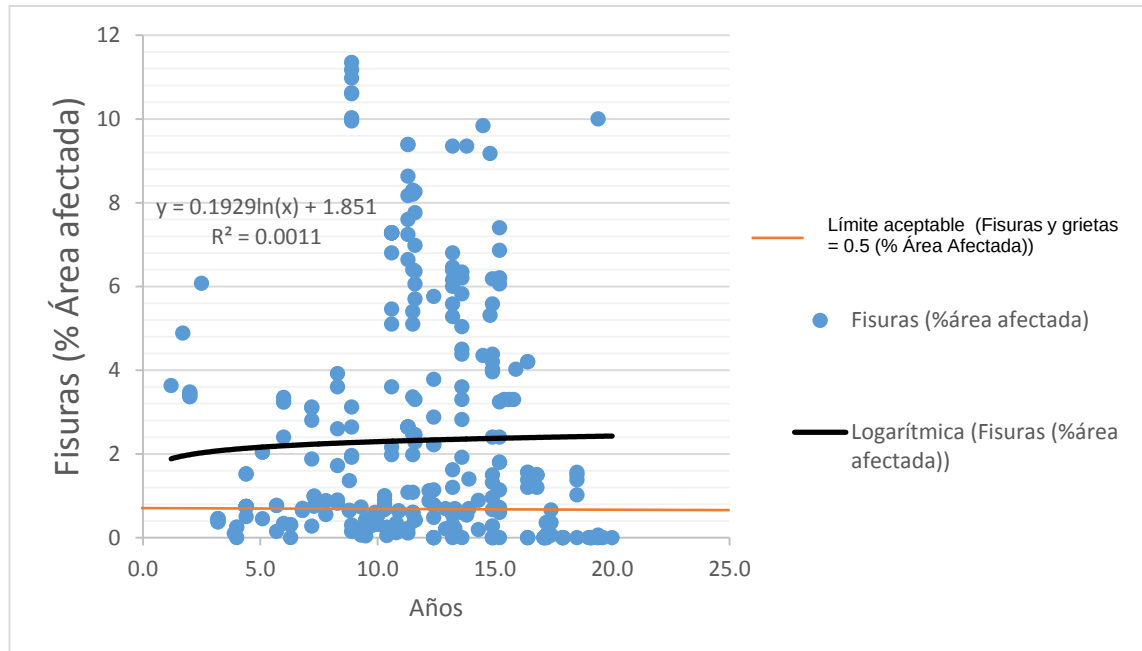


Fuente: elaboración propia

En la Figura 51 se evidencia el comportamiento de la afectación en una vía por Fisuras y grietas, la cual se encuentra bajo las condiciones descritas para el grupo 22, donde el comportamiento refleja una tendencia de deterioro, el cual

varía levemente a lo largo de 20 años; no obstante, esta tendencia se encuentra fuera de los límites aceptables de la normatividad colombiana.

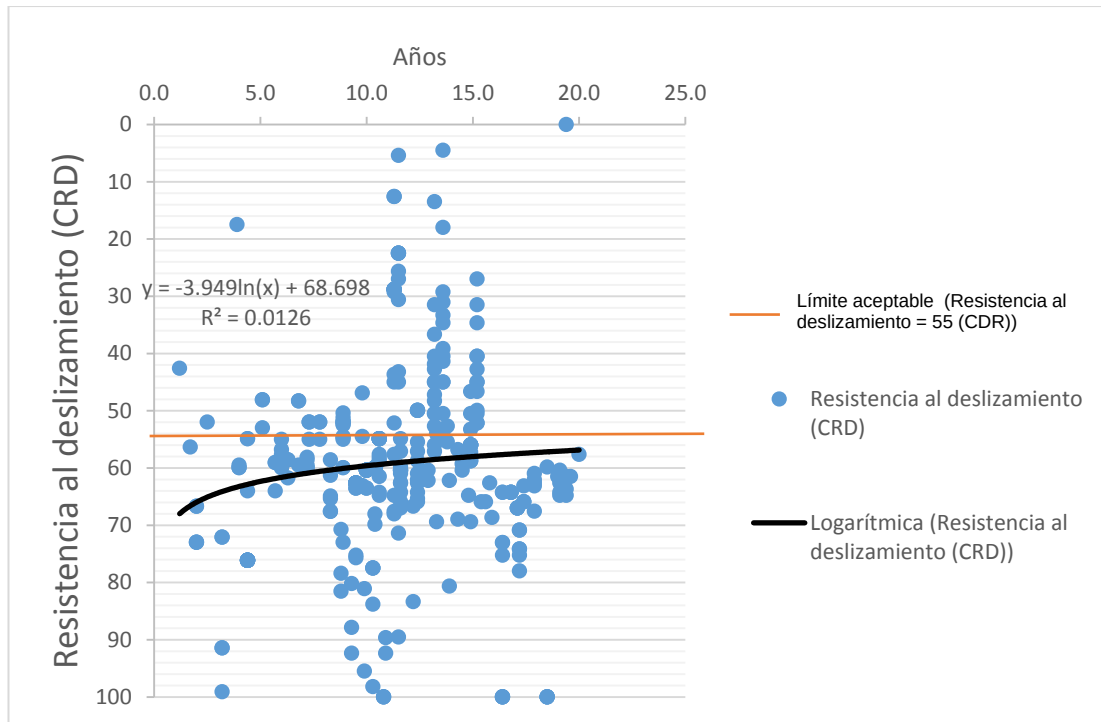
Figura 51. Curva de deterioro del grupo 22 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

A continuación, por medio de la Figura 52 se describe el comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento, para una vía con las condiciones del grupo 22; en la misma se puede observar que el deterioro del CDR crece a través de los años, pasando de un año 1 con un CDR de 69 a un CDR de 57 en el año 20, sin embargo este parámetro se mantiene entre los límites aceptables por la normatividad colombiana y dentro del rango de la vida útil de un pavimento flexible (20 a 25 años).

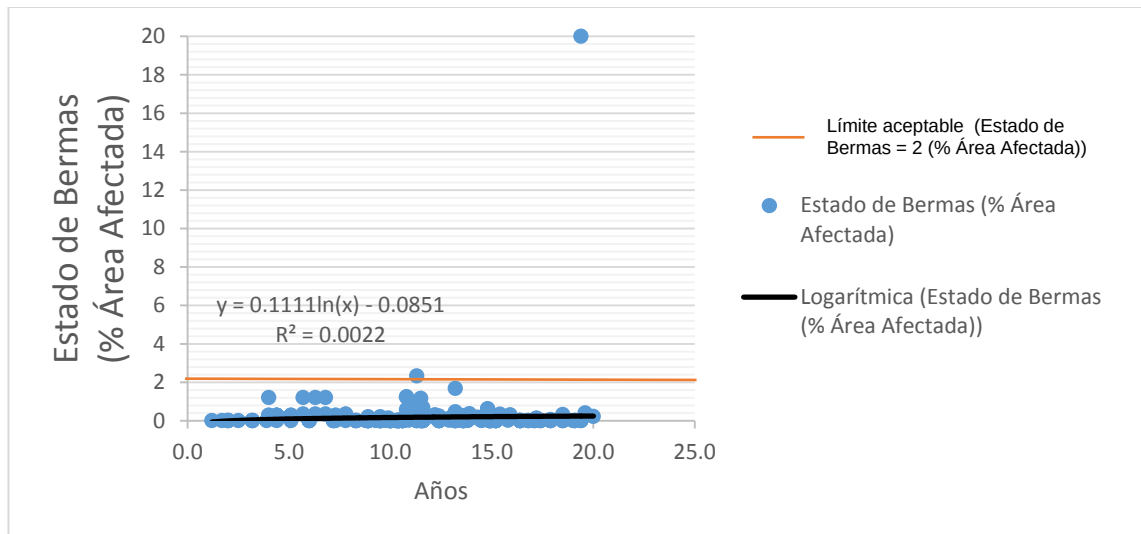
Figura 52. Curva de deterioro del grupo 22 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, el comportamiento del parámetro de estado de bermas se describe en la Figura 53, para las condiciones descritas del grupo 22 un tráfico medio NT2 y un clima entre los 20°C y los 25°C; así, para un tipo de pavimento flexible, el comportamiento de la curva muestra una tendencia a mantenerse constante dentro de los límites aceptables por la normatividad colombiana y acercándose al valor de 0% de área afectada por mal estado de las bermas, en proyectos con las características del grupo 22.

Figura 53. Curva de deterioro del grupo 22 - Estado de bermas vs. Tiempo

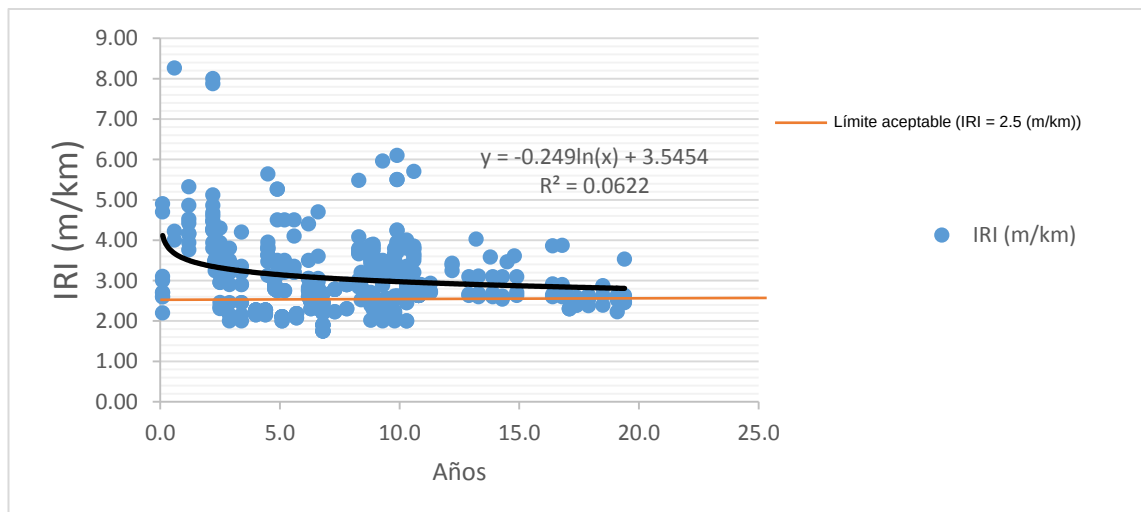


Fuente: elaboración propia

8.9 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 24

El grupo 24 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT3, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 20°C y los 25°C, para un tipo de pavimento flexible.

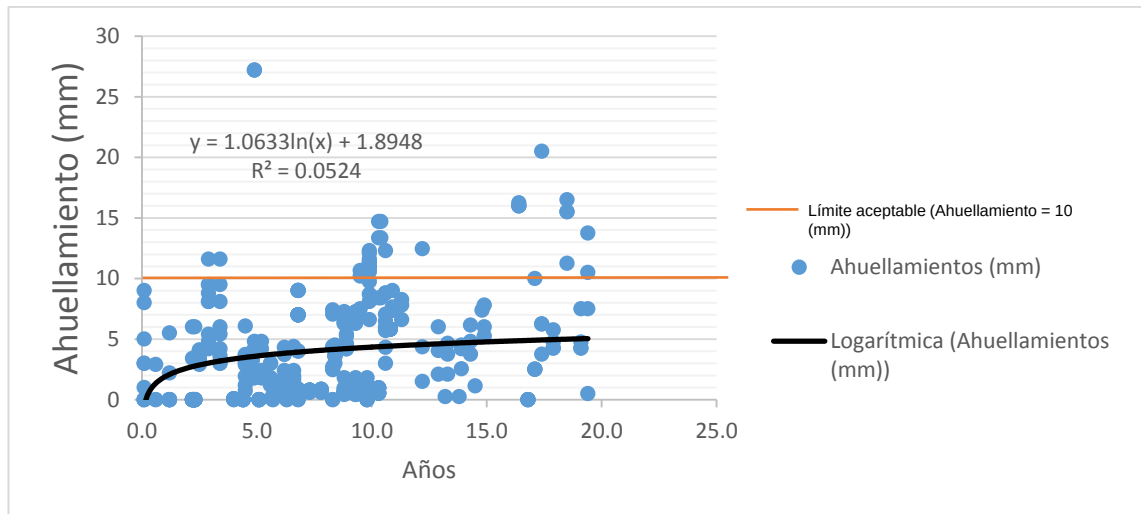
Figura 54. Curva de deterioro del grupo 24 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Así pues, en la Figura 55 se expone el comportamiento del parámetro de ahuellamiento y deformaciones bajo las condiciones del grupo 24, en donde la curva de deterioro se encuentra dentro de los límites aceptables y el parámetro se deterioró, en 20 años, 5 mm.

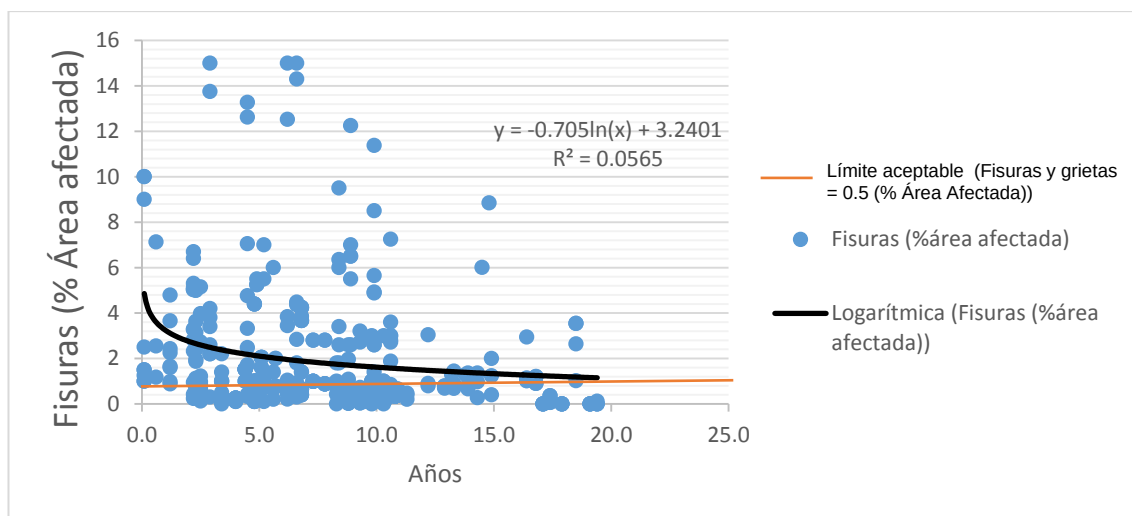
Figura 55. Curva de deterioro del grupo 24 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De esa forma, en la Figura 56 se observa el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas bajo las condiciones del grupo 24; esta curva refleja que a edades tempranas hay mayor presencia de fisuras y grietas en una vía. Sin embargo, con el paso del tiempo, el porcentaje de área afectada por presencia de fisuras y grietas en la vía disminuye; por otro lado, se evidencia que la curva está por fuera de los límites aceptables en la normatividad colombiana.

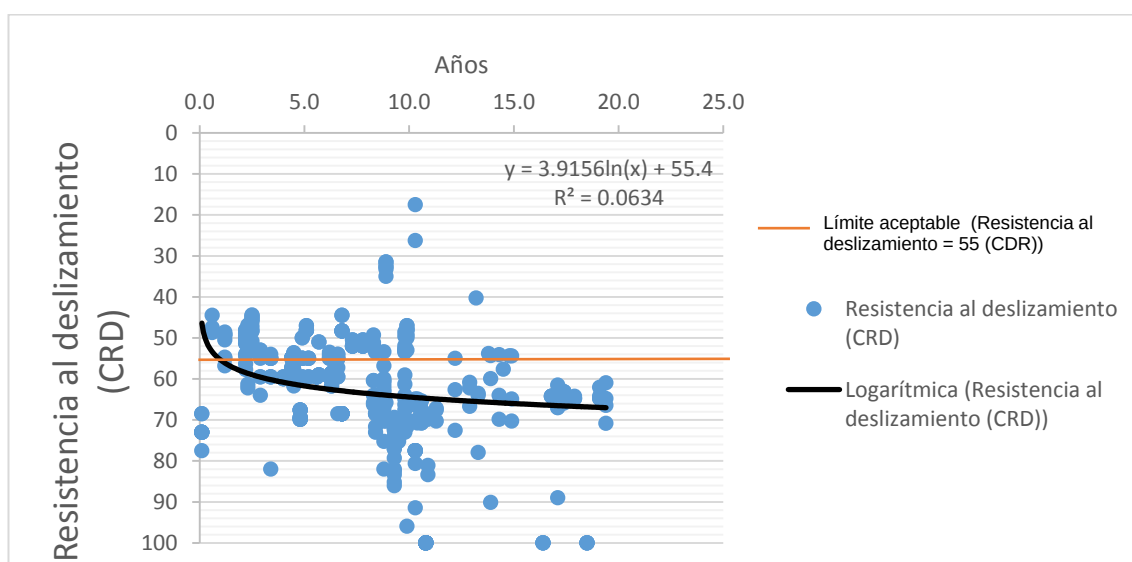
Figura 56. Curva de deterioro del grupo 24 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

En la Figura 57 se puede ver el comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento, en un proyecto que tiene las características de un tráfico alto y está en un clima entre los 20°C y los 25°C para un tipo de pavimento flexible, donde se evidencia un mayor deterioro en las edades iniciales de entrada en operación de la vía, además, su tendencia es al mejoramiento y pasar a un rango aceptable por la normatividad colombiana.

Figura 57. Curva de deterioro del grupo 24 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo

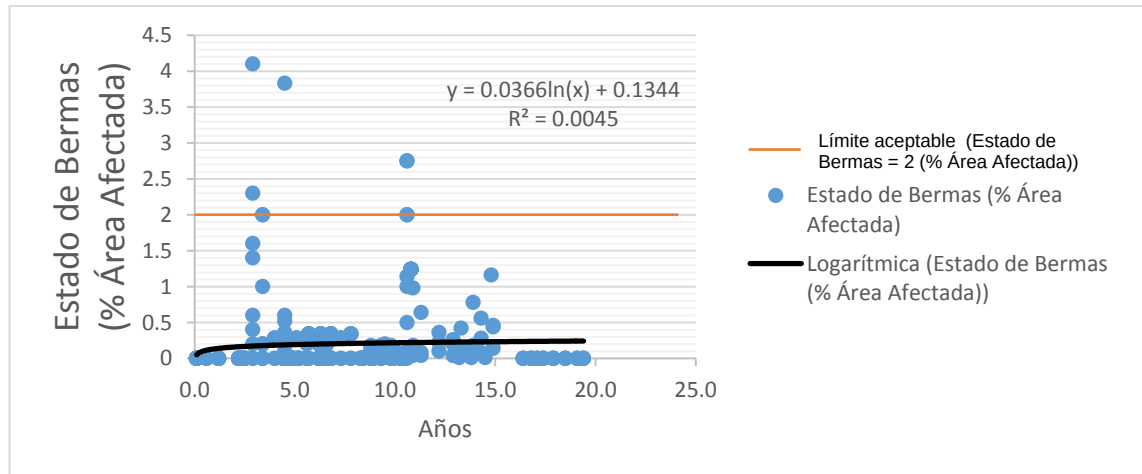


Fuente: elaboración propia

Igualmente, el parámetro de estado de bermas se describe en la Figura 58, bajo las condiciones del grupo 24, donde el comportamiento de este parámetro

en estas condiciones es de un deterioro leve, manteniéndose dentro de los límites aceptables de la normatividad colombiana.

Figura 58. Curva de deterioro del grupo 24 - Estado de bermas vs. Tiempo



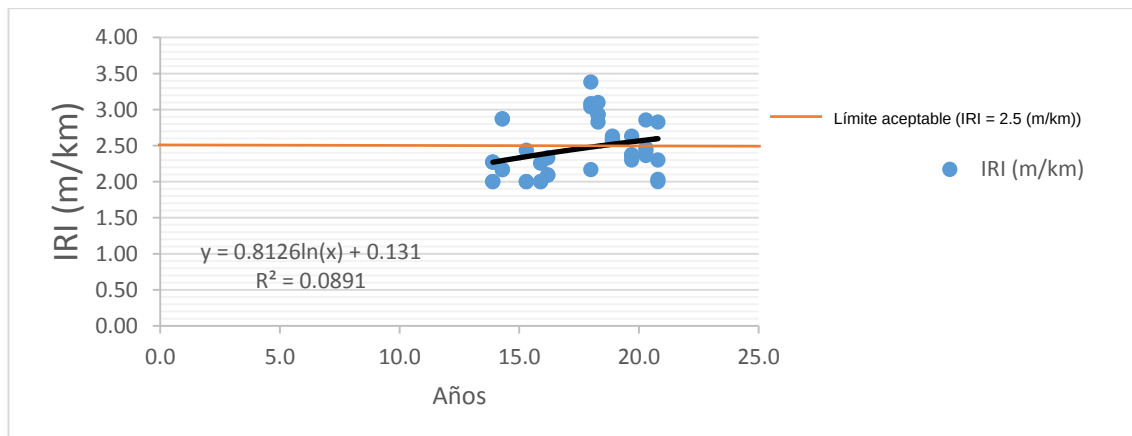
Fuente: elaboración propia

8.10 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 26

El grupo 26 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT1, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, inferior a los 500.000 (N), un clima entre los 25°C y los 30°C, para un tipo de pavimento flexible.

Con relación a ello, en la Figura 59 se describe el comportamiento del IRI para una vía con un tráfico bajo y un clima alto, con una temperatura entre los 25°C y los 30°C para un tipo de pavimento flexible, como lo describe el grupo 26; en este caso, el IRI presenta una curva de deterioro, la cual varía entre los 2.2 (M/Km) a 2.6 (M/Km), entre el año 14 y el año 21, el IRI pasó de estar dentro de los límites aceptables a salir de estos.

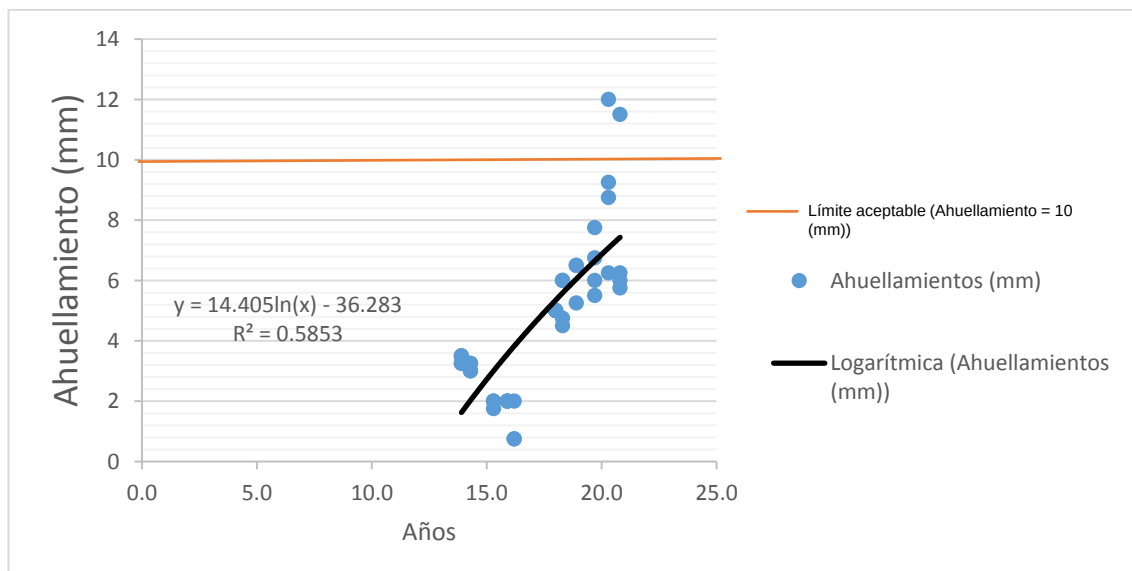
Figura 59. Curva de deterioro del grupo 26 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Seguidamente, en la Figura 60 se presenta el comportamiento del ahuellamiento y deformaciones bajo las condiciones del grupo 26, donde se evidencia un gran deterioro en un corto tiempo entre los años 14 y 21. No obstante, el ahuellamiento se encuentra dentro de los límites aceptables y este deterioro se refleja al final de la vida útil de un pavimento flexible.

Figura 60. Curva de deterioro del grupo 26 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo

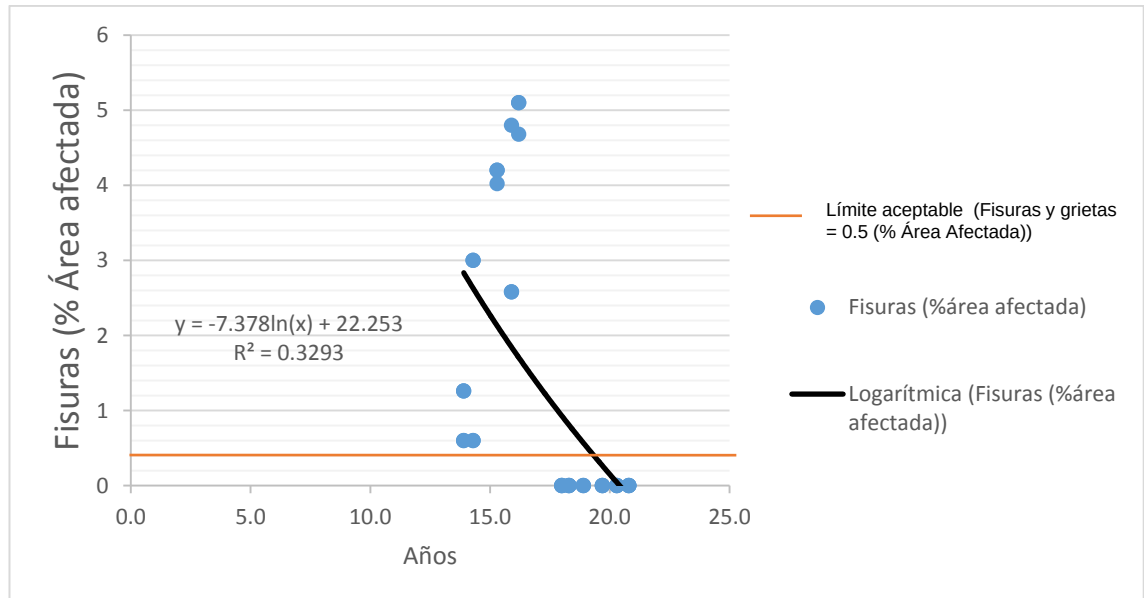


Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en la Figura 61 se describe el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas bajo las condiciones del grupo 26, de modo que se evidencia

un comportamiento de mejoramiento, donde el porcentaje del área de afectación por fisuras y grietas disminuye desde el 3% en el año 14 al 0% en el año 20 de entrada en la operación la vía.

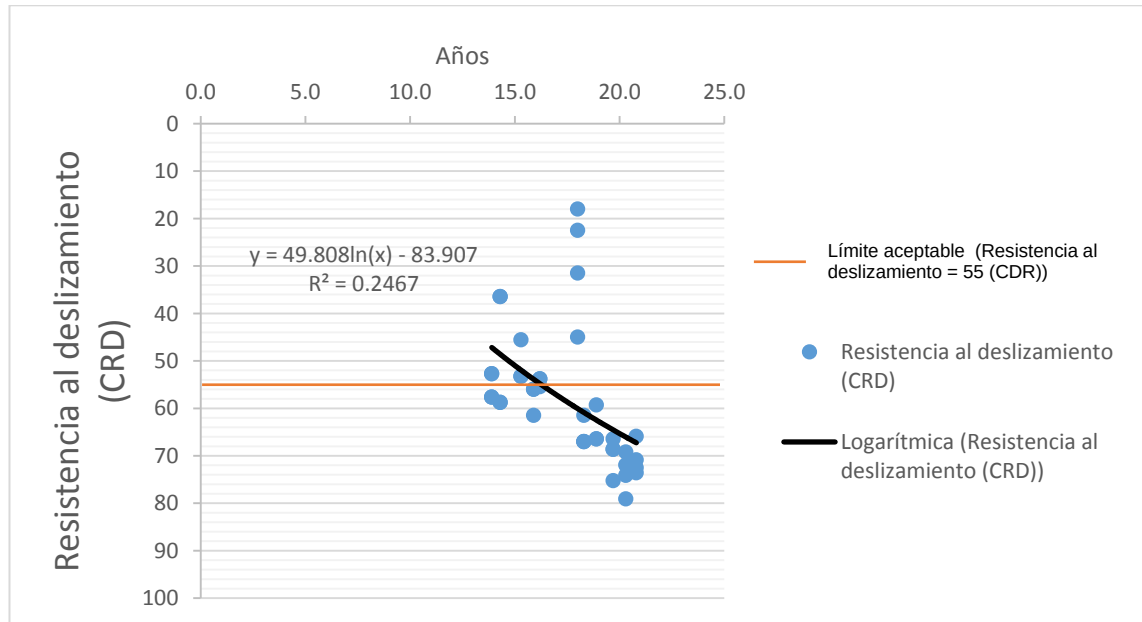
Figura 61. Curva de deterioro del grupo 26 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Del mismo modo, en la Figura 62 se encuentra reflejado el comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento, bajo las condiciones del grupo 26, la curva muestra una tendencia de mejoramiento entre los años 14 a 20, pasando de una condición desfavorable a una favorable en el año 16, entrando en el límite aceptable por la normatividad colombiana.

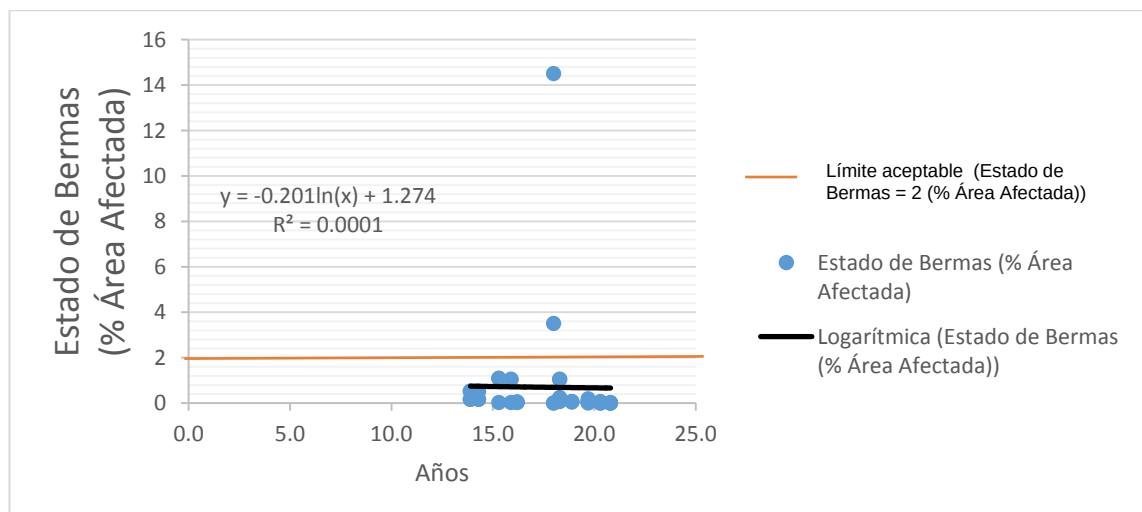
Figura 62. Curva de deterioro del grupo 26 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Así pues, en la Figura 63 se expone el comportamiento del parámetro de estado de bermas, bajo las condiciones del grupo 26, donde la curva tiene una tendencia a mantenerse constante y dentro del porcentaje de área afectada aceptable para este parámetro.

Figura 63. Curva de deterioro del grupo 26 - Estado de bermas vs. Tiempo



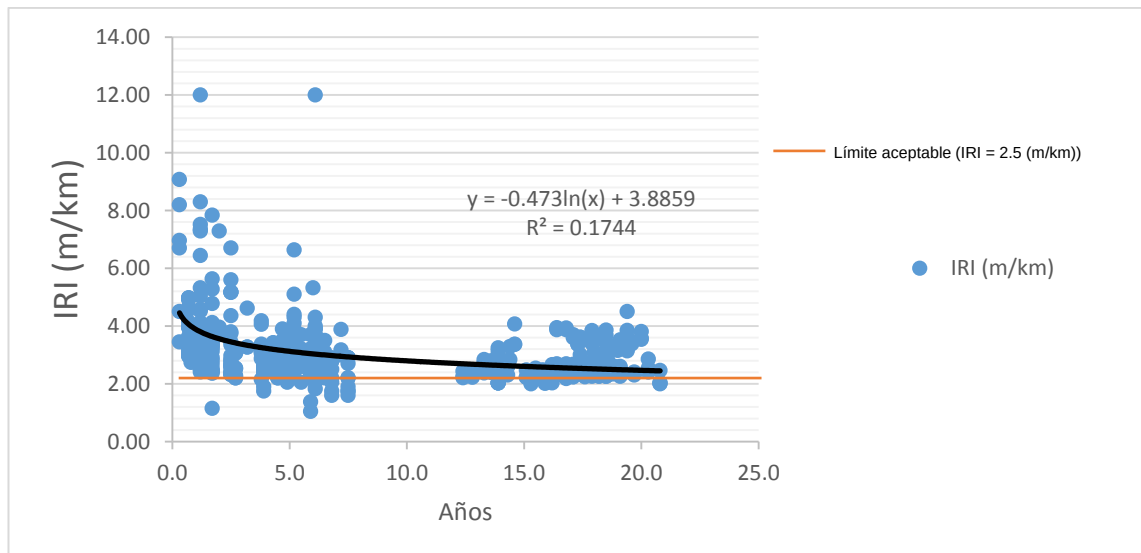
Fuente: elaboración propia

8.11 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 28

El grupo 28 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT2, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 500.000 (N) e inferior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 25°C y los 30°C, para un tipo de pavimento flexible.

En ese sentido, la Figura 64 muestra el comportamiento del parámetro del IRI en unas condiciones de un tráfico medio y un clima entre los 25°C y los 30°C para un pavimento flexible; de acuerdo con lo descrito para el grupo 28, donde el parámetro expone una tendencia de deterioro en edades tempranas, pero tiende a mejorar en los años siguientes, sin embargo, la curva se mantiene fuera del límite aceptable.

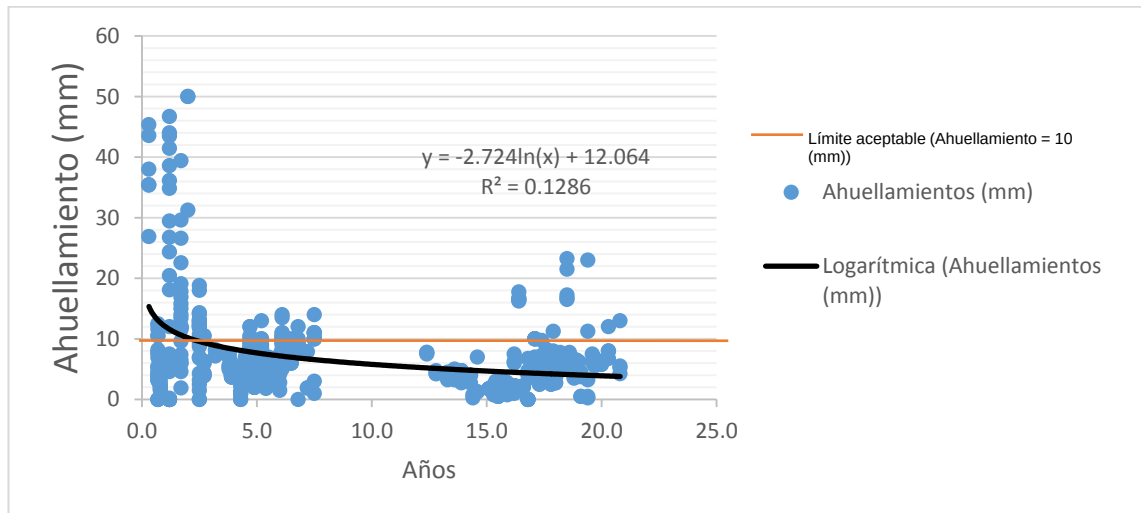
Figura 64. Curva de deterioro del grupo 28 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De tal forma, en la Figura 65 se presenta el comportamiento del ahuellamiento y deformaciones bajo las condiciones del grupo 28, donde la tendencia muestra un mayor deterioro a edades tempranas y un mejoramiento en los años siguientes, de modo que entre los años 2 y 3, el parámetro entra en el límite aceptable por la normatividad colombiana.

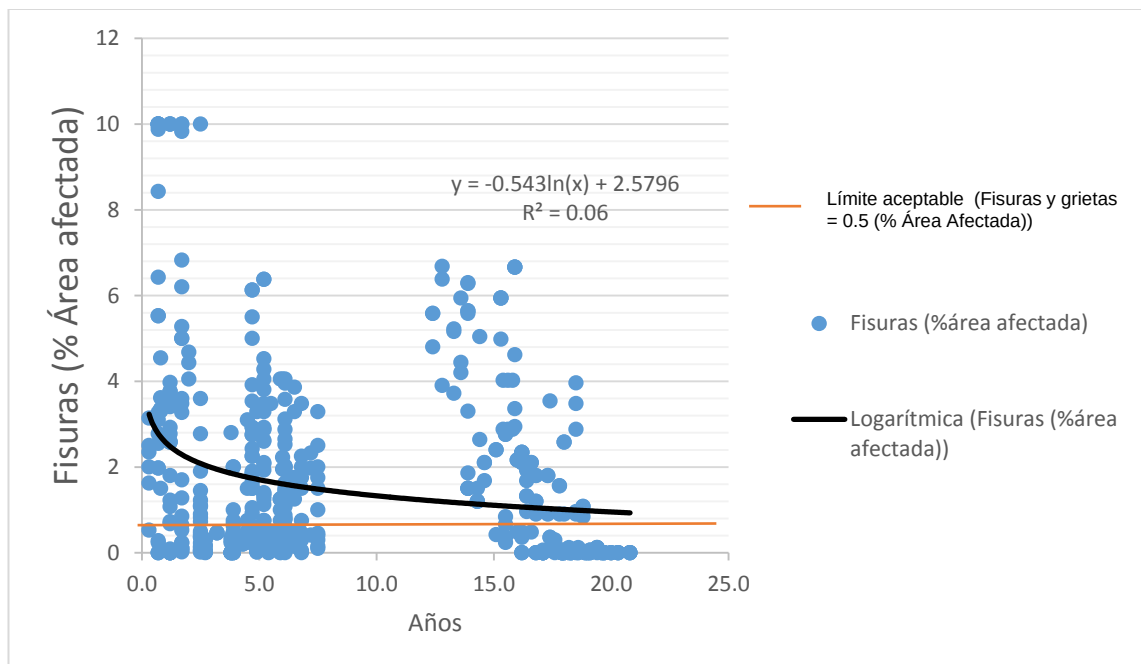
Figura 65. Curva de deterioro del grupo 28 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por otra parte, en la Figura 66 se muestra el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas bajo las condiciones del grupo 28, la curva evidencia que a edades tempranas el deterioro es mayor y tiende a mejorar en los años siguientes, aunque se mantiene fuera de los límites aceptables.

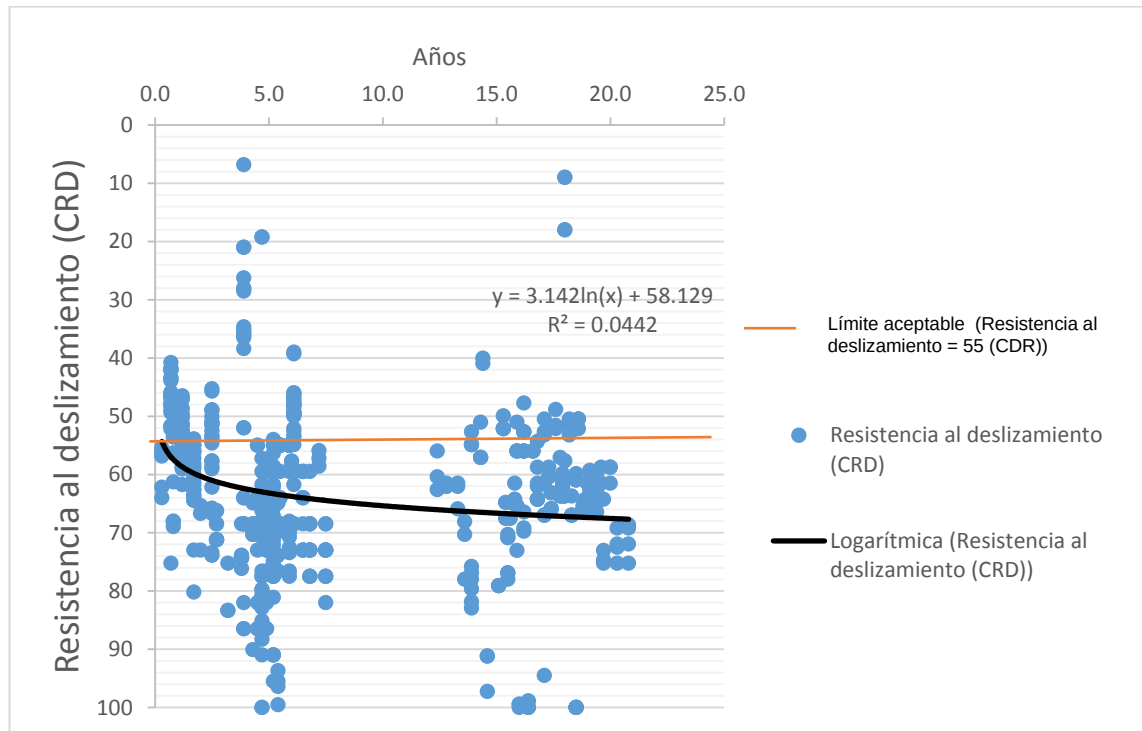
Figura 66. Curva de deterioro del grupo 28 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Por consiguiente, en la Figura 67 se describe el comportamiento del parámetro de resistencia al deslizamiento bajo las condiciones del grupo 28, donde la curva muestra una tendencia de mejoramiento y se halla dentro de los límites aceptables.

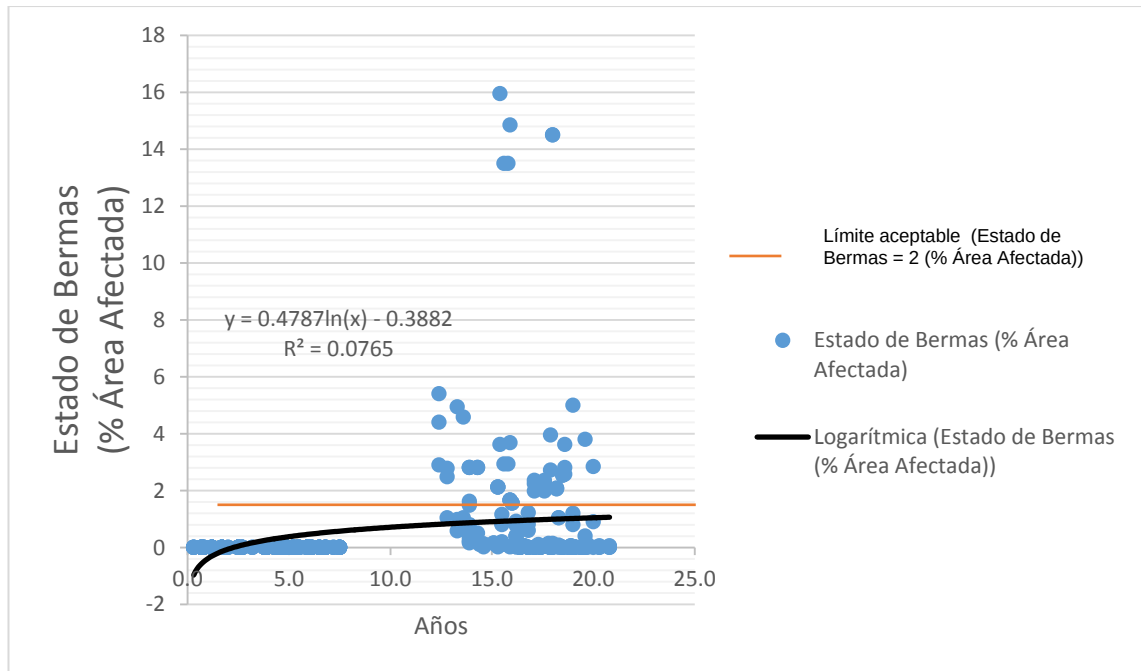
Figura 67. Curva de deterioro del grupo 28 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Asimismo, en la Figura 68 se expone el comportamiento del parámetro de estado de bermas bajo las condiciones del grupo 28, en la curva se muestra un deterioro leve que se mantiene dentro de los límites aceptables, a lo largo de los 20 años evaluados.

Figura 68. Curva de deterioro del grupo 28 - Estado de bermas vs. Tiempo



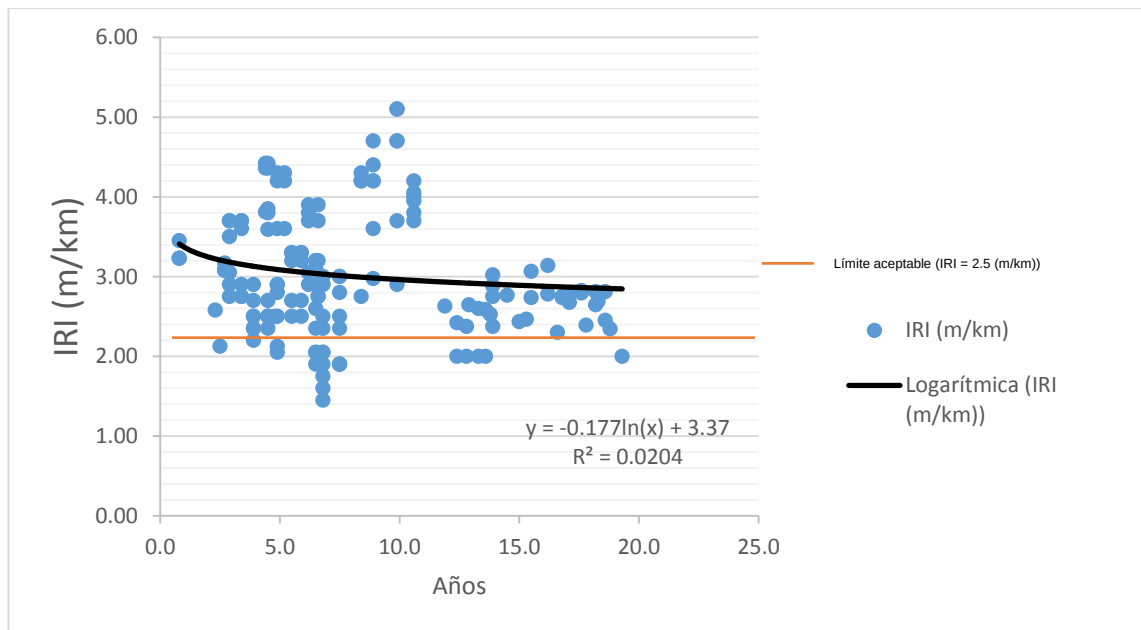
Fuente: elaboración propia

8.12 CURVAS DE DETERIORO DEL GRUPO 30

El grupo 30 de tramos analizados corresponde a los tramos con las características de un tráfico NT3, es decir, un número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circula en un carril en un periodo de diseño de 10 años, superior a los 5.000.000 (N), un clima entre los 25°C y los 30°C, para un tipo de pavimento flexible.

Así, en la Figura 69 se describe el comportamiento de la rugosidad media mediante el IRI para proyectos que tienen las características de un tráfico alto, una Temperatura Media Anual Promedio entre los 25°C y 30°C para un tipo de pavimento flexible, donde la curva del IRI evidencia un deterioro en edades tempranas y tiende a mejorar en los años siguientes, no obstante, la curva se mantiene fuera de los límites aceptables.

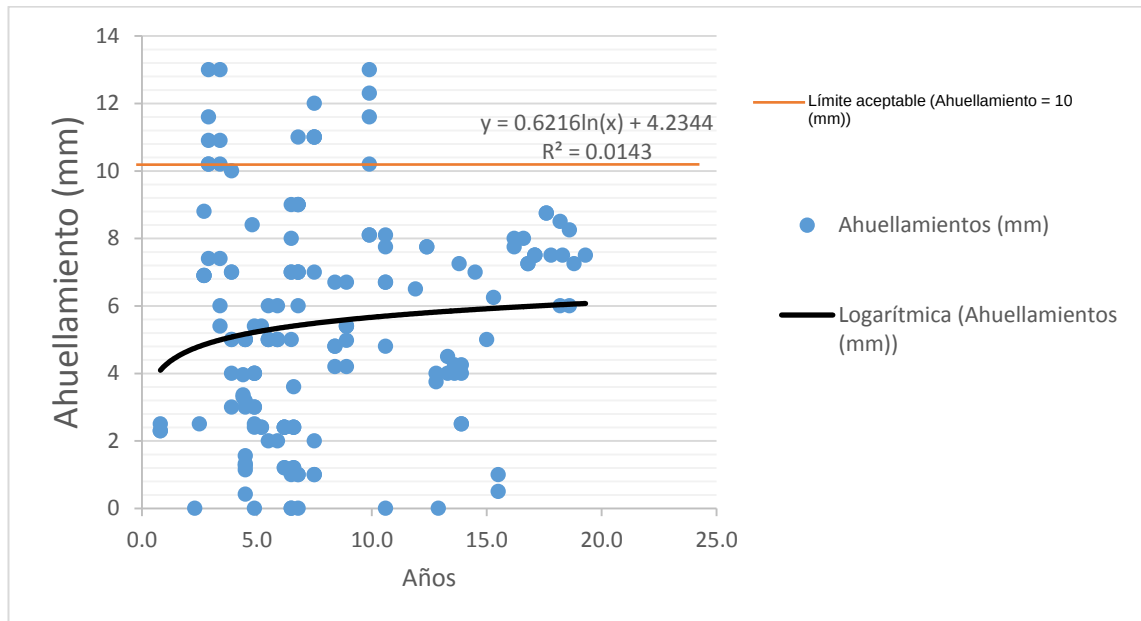
Figura 69. Curva de deterioro del grupo 30 - IRI vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Ahora, en la Figura 70 se observa el comportamiento del parámetro de ahuellamiento bajo las condiciones del grupo 30, la curva muestra un deterioro leve, que se mantiene dentro de los límites aceptables y entre los años 0 y 20, el deterioro varió levemente 2 mm.

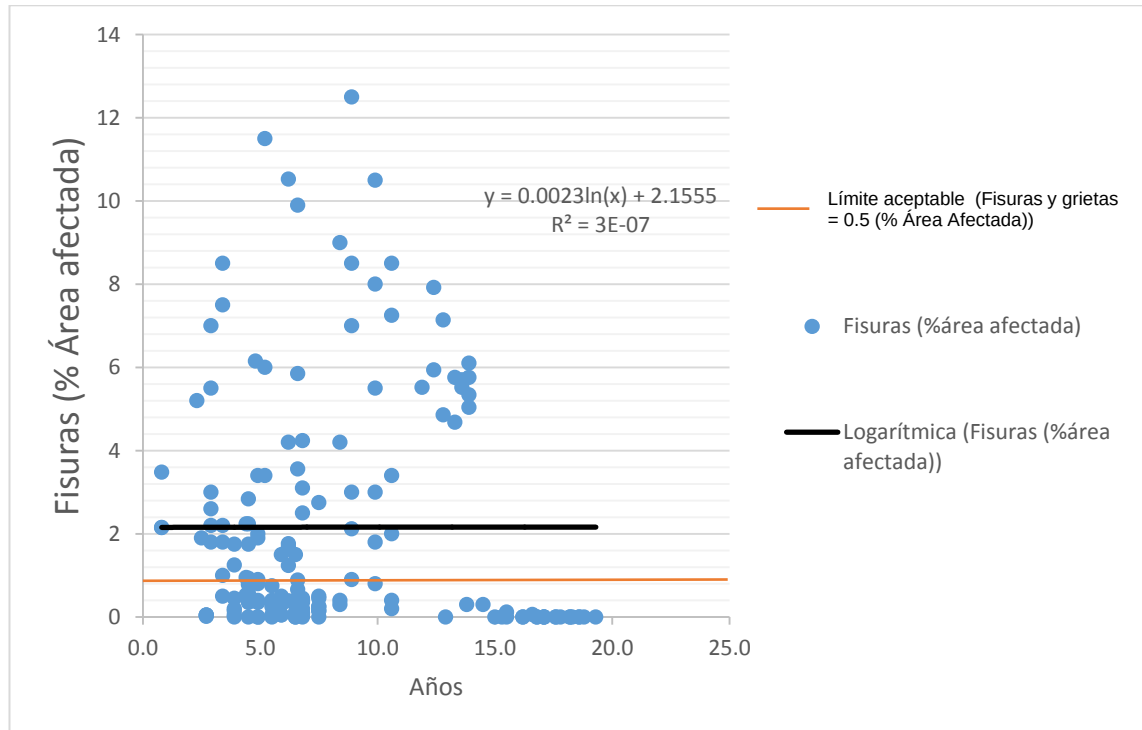
Figura 70. Curva de deterioro del grupo 30 - Ahuellamiento y deformaciones vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

De tal forma, en la Figura 71 se encuentra el comportamiento del parámetro de fisuras y grietas bajo las condiciones del grupo 30, donde la curva sigue una tendencia a ser constante durante los 20 años, manteniéndose en el rango del 2.15 % del área afectada por fisuras y grietas, de una vía con las condiciones de un clima con temperaturas altas y un tráfico alto.

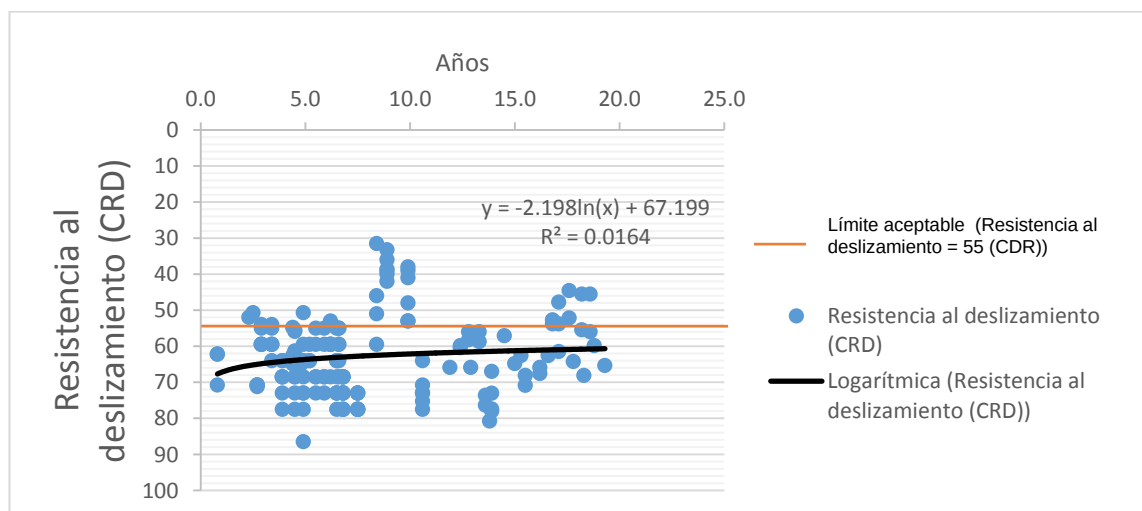
Figura 71. Curva de deterioro del grupo 30 - Fisuras y grietas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Así mismo, en la Figura 72 se muestra el deterioro del parámetro de resistencia al deslizamiento, bajo unas condiciones de un clima con una temperatura alta y un tráfico alto en un pavimento flexible; cabe anotar que la curva se mantiene a lo largo de 20 años evaluados en condiciones aceptables por la normatividad colombiana.

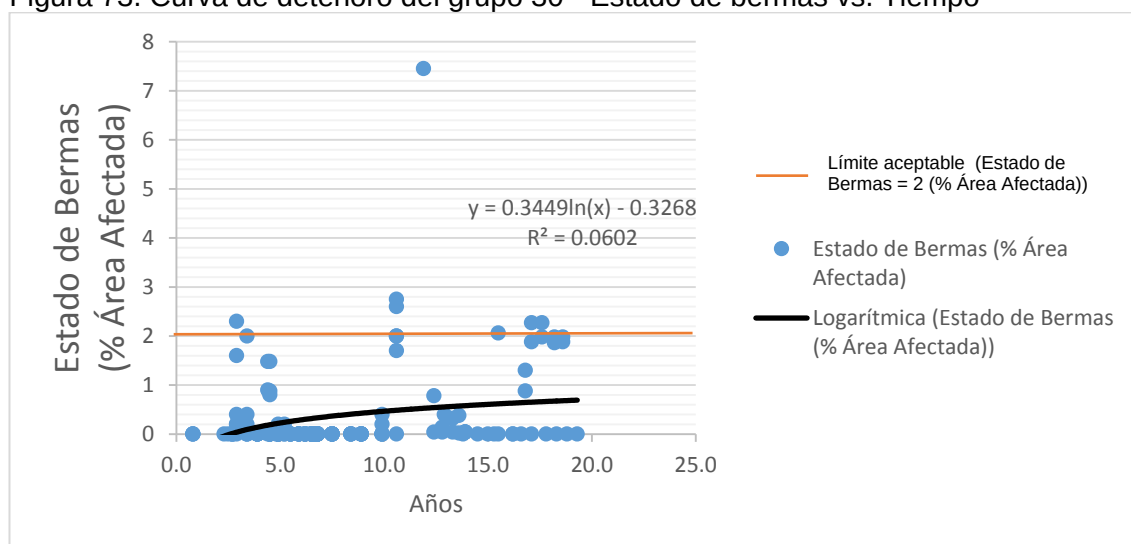
Figura 72. Curva de deterioro del grupo 30 - Resistencia al deslizamiento vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Mientras tanto, en la Figura 73 se expone el comportamiento del parámetro de estado de bermas bajo las condiciones del grupo 30, donde la tendencia de la curva es de deterioro leve, el cual en 20 años varía del 0% al 1%, estando dentro del límite aceptable en la normatividad colombiana.

Figura 73. Curva de deterioro del grupo 30 - Estado de bermas vs. Tiempo



Fuente: elaboración propia

Para terminar, en el Anexo 10 se encuentran recopilados los modelos preliminares obtenidos para cada grupo y en el anexo 11 se encuentran los reportes de los análisis por regresión lineal obtenidos con el software 2RLCA© se corrió el modelo de comportamiento.

8.13 ANÁLISIS MODELOS DE DETERIORO

Con la información agrupada y graficada se procede a analizar el comportamiento de los parámetros en cada familia, identificando en cada modelo si el mismo está dentro de los límites aceptables para cada parámetro, de acuerdo con el criterio de la Cámara Colombiana de Infraestructura (CCI)⁵⁴, y si asemeja un comportamiento de deterioro de los pavimentos, según la línea de tendencia logarítmica. Estos modelos muestran un deterioro, un mejoramiento o un mantenimiento a lo largo de la vida del proyecto, para lo cual se muestra el resumen de dicho análisis en la siguiente tabla:

⁵⁴ SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Sobre el índice de estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales [en línea]. Bogotá D.C.: Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2014.

Tabla 23. Resumen del comportamiento de los modelos de cada grupo

Grupo	IRI	Ahuellamiento	Fisuras y Grietas	Resistencia al Deslizamiento	Estado de Bermas
2	Mantenimiento	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable
4	Deterioro dentro del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable
6	Deterioro	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento	Mantenimiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable
10	Mantenimiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable
12	Deterioro fuera del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable
16	Deterioro fuera del límite aceptable	Deterioro dentro del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable
18	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable
22	Deterioro fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Deterioro fuera del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable
24	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Deterioro dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mantenimiento dentro del

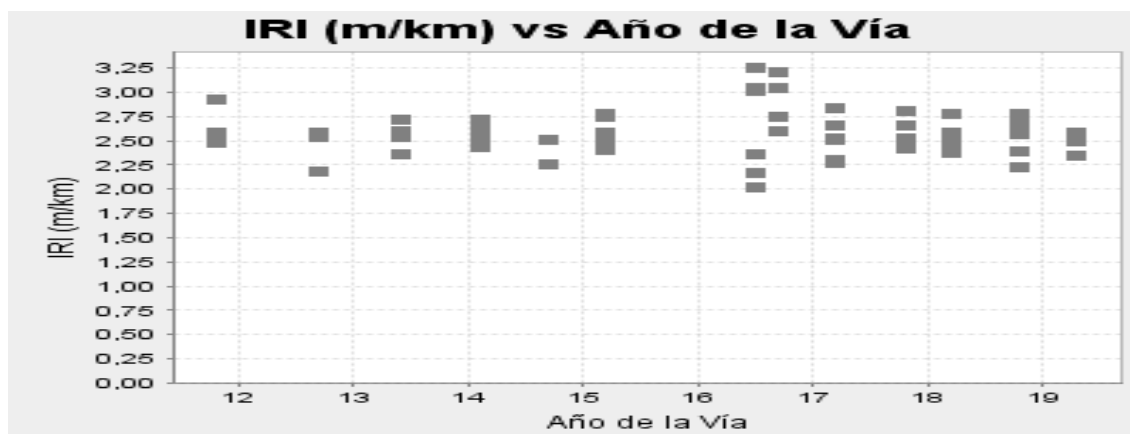
Grupo	IRI	Ahuellamiento	Fisuras y Grietas	Resistencia al Deslizamiento	Estado de Bermas
	límite aceptable		aceptable		límite aceptable
26	Deterioro dentro del límite aceptable	Deterioro dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mantenimiento dentro del límite aceptable
28	Mejoramiento o fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento fuera del límite aceptable	Mejoramiento dentro del límite aceptable	Mejoramiento o dentro del límite aceptable
30	Mejoramiento o fuera del límite aceptable	Deterioro dentro del límite aceptable	Mantenimiento o fuera del límite aceptable	Deterioro dentro del límite aceptable	Mejoramiento o dentro del límite aceptable

Fuente: elaboración propia

Posteriormente se determinó el comportamiento de estas curvas mediante un análisis de regresión lineal mediante la utilización del software 2RDATA© se corrió el modelo de deterioro bajo los supuestos de cada grupo identificado.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**⁷⁴ se pueden observar los resultados de la modelación en software 2RDATA© con base en los supuestos antes mencionados. Ahora bien, como se ha mencionado anteriormente, los modelos de deterioro aquí presentados funcionan de esta manera únicamente bajo los supuestos contemplados para cada grupo identificado cualquier cambio de los parámetros y o ecuación necesariamente generará un modelo diferente. Por eso se hace necesaria una calibración distinta del modelo, cada vez que se requiera modelar el comportamiento de un pavimento asfáltico distinto.

Figura 74. Reporte de Análisis por regresión curva de deterioro del grupo 2 - IRI vs. Tiempo



Regresión Seleccionada

Forma de Ecuación:

$$IRI (m/km) = a + b * \exp(\text{Año de la Vía}) + c * \exp(2 * \text{Año de la Vía}) + d * \exp(3 * \text{Año de la Vía}) + e * \exp(4 * \text{Año de la Vía}) + f * \exp(5 * \text{Año de la Vía})$$

$$R^2: 0.03421$$

Parámetros Calculados

Param	Val.	Error Est.	t-valor	p-valor
a	2.52890	0.05462	46.30258	0.00000
b	0.00000	0.00000	1.27680	0.20615
c	0.00000	0.00000	-1.12617	0.26417
d	0.00000	0.00000	0.98672	0.32738
e	0.00000	0.00000	-0.90185	0.37042
f	0.00000	0.00000	0.85173	0.39744

Fuente: Reporte de análisis 2RDATA© anexo 11

Aquí se hace necesario aclarar, que este es el resultado 1 de 60 escenarios planteados para los 5 parámetros de los 12 grupos identificados, en el Anexo 11, se pueden observar los resultados de los análisis por regresión lineal realizados.

Como es de esperarse las curvas de deterioro no son las mismas, se modifican debido al comportamiento asociado a las distribuciones de las variables, aunque se cumplan exactamente los mismos supuestos, se tienen un número casi infinito de posibles curvas de deterioro en la modelación de este caso en particular y de cualquier caso en general, por lo cual se selecciona la forma de ecuación con el R^2 con mayor acercamiento a 1, para determinar la fuerza de la correlación entre el parámetro evaluado y el tiempo.

De acuerdo con lo anterior se obtienen las ecuaciones pueden llegar a determinar el comportamiento de una vía concesionada con las características de tráfico, clima y tipo de pavimento identificadas en los 12 grupos identificados en esta investigación.

9. CONCLUSIONES

En esta instancia, es posible afirmar que no se logró el objetivo de obtener las curvas tipo de deterioro de los parámetros que componen el IE en Colombia, sin embargo, se obtienen unas curvas y ecuaciones que describen el comportamiento de cada uno de los parámetros del IE, bajo unas condiciones específicas de clima, tránsito y tipo de pavimento, lo cual sirve como ayuda a los interesados a entender el comportamiento del pavimento evaluado bajo los 5 criterios del IE.

Si bien, la metodología de evaluación de concesiones en Colombia cambió para 4G, implementando el Índice de Cumplimiento, los parámetros que fueron objeto de estudio en esta investigación, se siguen conservando para la cuarta generación de concesiones viales en Colombia, pero con una menor ponderación e igualmente son reflejo del estado del pavimento evaluado, así como lo fueron durante las tres generaciones anteriores.

Así, con las ecuaciones de tendencia de las gráficas obtenidas, se puede estimar el comportamiento del pavimento, para planear las inversiones que requiera en un tiempo determinado, se mantengan las condiciones aceptables, con el propósito de que se realice la planeación con la destinación de recursos físicos y financieros con la suficiente antelación, para mantener un estado óptimo de la vía.

Además, de los tramos concesionados analizados se pudo identificar que presentan las tres condiciones de tránsito señaladas por el INVIAS, tráficos NT1, NT2 y NT3, actualmente vigentes, los cuales para el presente proyecto se identificaron con base en el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circulan en un carril, en un periodo de diseño para cada tramo, logrando la agrupación de los datos de tráfico mediante un criterio estándar para cada uno.

De igual manera, se pudo establecer que los tramos evaluados se encuentran en climas entre los 5°C y los 30°C, identificados mediante la Temperatura Media Anual Promedio (TMAP - °C) de las regiones donde se encuentran ubicados los tramos evaluados, lo cual es un margen amplio, cuyo criterio puede ser aplicado en otros países con características climáticas parecidas.

Igualmente, se evidencia que la mayoría de los grupos presentan un rango no aceptable para el parámetro de IRI, también se encontró que en la mayoría de grupos donde se evaluó este parámetro, los modelos obtenidos son de deterioro a excepción de los grupos 18, 24, 28 y 30 donde los modelos son de mejoramiento, pero los mismos están por fuera del límite aceptable para este parámetro.

De ese modo, en las gráficas de ahuellamiento se presentan mayores deformaciones a edades tempranas, que van disminuyendo con el paso del tiempo, corroborando el comportamiento típico del fenómeno de ahuellamiento; esto permite validar la coherencia de la metodología. Aunado a ello, en el parámetro “estado de bermas” se demuestra, para todos los grupos, una

tendencia del deterioro a mantenerse constante a lo largo del tiempo, sin presentar valores fuera de lo aceptable.

De acuerdo con ello, el presente estudio arrojó que los grupos analizados presentan comportamientos de deterioro, mejoramiento o mantenimiento, traduciéndolos en tres tipos de modelos. Lo anterior se concluye dada la tendencia de las curvas de cada grupo, puesto que algunas se mantienen en un mismo rango y otras tienen a mejorar el valor de aceptación dependiendo del parámetro, por ejemplo, para el parámetro de ahuellamiento en los grupos 2, 4, 6, 10, 16, 18, 22 y 28 las curvas tienden a decrecer, lo que indica que con el tiempo este parámetro demuestra menores deformaciones.

Por otro lado, se obtuvieron modelos de deterioro con respecto al parámetro de "IRI" para los siguientes grupos: 4, 6, 12, 16, 22 y 26; para el parámetro "ahuellamiento" se presentan en los grupos: 12, 24, 26 y 30; para el parámetro de "fisuras y grietas" los grupos que presentan modelos de deterioro que son: 12, 16 y 22; y para la "resistencia al deslizamiento" los grupos: 10, 18 y 30. Los demás grupos se enmarcan en los modelos de mejoramiento o mantenimiento, como se evidencia en la Tabla 23.

Cabe señalar que los grupos analizados corresponden a pavimentos flexibles, debido a que los tramos en los que se encontró información solo hacían referencia a este tipo de pavimentos, por ende, no se analizaron pavimentos rígidos dada la falta de información. Las curvas representan el comportamiento de vías concesionadas, por lo cual estas también contemplan un deterioro leve en algunos casos; lo anterior se da por la intervención de los concesionarios en los tramos evaluados, dada esta condición se puede inferir que estas curvas reflejan un comportamiento de vías que han sido intervenidas a lo largo de su entrada, en operación o puesta en servicio a los usuarios.

Por último, la calibración de los modelos de comportamiento obedece al contexto particular para cada tramo de pavimento flexible a construir o rehabilitar, pues como se observó en los resultados de las modelaciones, el valor de r^2 es lejano a 1, por lo que se entiende que existe una dispersión considerable de los datos.

10.RECOMENDACIONES

En concordancia con lo investigado, se encontró en el estado del arte un estudio de características similares al propuesto, denominado S.A.V.U., el cual se desarrolló para un caso en concreto de vías urbanas en la ciudad de Bogotá. Por esta razón, teniendo en cuenta que en el presente proyecto se recopiló información del territorio nacional, se recomienda para próximos trabajos la ejecución de un estudio similar a mayor escala, en la que se evalúe la red vial del país.

Aunque el estudio recopila el comportamiento del pavimento en regiones con características similares, se debe tener presente que dado el uso de mismo en la toma de decisiones, como parte de un sistema de gestión de pavimentos, resulta necesaria la complementación con estudios de campo, para corroborar el estado actual de pavimento y realizar las proyecciones pertinentes.

Entonces, para futuros estudios se recomienda esta investigación para desarrollar modelos incrementales, dado que el presente se basa en modelos agregados que son la base para predecir el comportamiento del pavimento, en proyectos con características similares a los evaluados en este estudio. Además, se recomienda para futuras investigaciones profundizar acerca de los modelos de mantenimiento y mejoramiento, pues fueron producto de la obtención de modelos que inicialmente pretendía ser modelos de deterioro.

Finalmente, resulta fundamental contar con la información técnica que permita estructurar la creación de series históricas, con la directriz correspondiente que permita la construcción de las curvas o modelos de deterioro, para los corredores viales nacionales; en tal sentido, se sugiere la toma constante de información y la elaboración de la base de datos correspondiente, en las entidades del Estado encargadas de administración, seguimiento, construcción y conservación de la red vial.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Mantenimiento rutinario. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/mantenimiento-rutinario>

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Términos que empiezan con I. s.f. Recuperado de https://www.ani.gov.co/glosario/letter_i

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Términos que comienzan con N. s.f. Recuperado de https://www.ani.gov.co/glosario/letter_n

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Probabilidad. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/probabilidad>

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA. Unidad funcional. Ministerio de Transporte. s.f. Recuperado de <https://www.ani.gov.co/glosario/unidad-funcional>

APAZA, Ciro Ernesto. Deformación en las mezclas asfálticas y su consecuente deterioro en los pavimentos asfálticos en la ciudad de Juliaca. – 2016. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Perú: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. 2017. p. 10

BENZADÓN, Miguel Ángel; DUARTE, Jorge y HERNÁNDEZ, Marcela. Diseño e Implementación de un sistema de Gestión vial y de espacio público para Bogotá, Colombia. [en línea] Costa Rica: Revista Infraestructura Vial de la Universidad de Costa Rica, febrero de 2007. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: - <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2061>

CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. Sobre el índice de estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales [en línea]. Bogotá D.C, [consultado 01 de febrero de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.infraestructura.org.co/2017/filef.php?IDe=846>

COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sala Plena. Sentencia C-068 del 2009. Magistrado Ponente: Mauricio González Cuervo.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Colombia: INVIAS, 2012, p. 265

CUARTAS PÉREZ, Luis Alberto. ¿Qué es el mantenimiento? 2008. Recuperado de https://www.academia.edu/8615299/Documento_elaborado_por_I_QU%C3%89_ES_EL_MANTENIMIENTO

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE LA FUNCIÓN PÚBLICA. Manual Técnico del Modelo Estándar de Control Interno para el Estado Colombiano MECI – DAFP – Bogotá D. C. 2014.

GAMBOA BELTRÁN, Gustavo. Análisis Comparativo de los Parámetros de Evaluación de las Cuatro Generaciones de Concesiones Viales de Colombia,” Escuela de Ingenieros Militares. Colombia. 2017.

GIORDANI, Claudio y LEONE, Diego. Pavimentos [en línea] Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. Cátedra Ingeniería Civil I, [consultado 10 de mayo de 2018]. Disponible en Internet: <https://docplayer.es/67943552-Pavimentos-docentes-ing-claudio-giordani-ing-diego-leone-1o-ano-ingenieria-civil-comision-02-turno-tarde.html>

GUTIÉRREZ, Pablo; ROMERO, Francisco y SALGADO, Jorge. Sistema de gestión y seguimiento de pavimentos. En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 2 (1987); p. 34.

HUDSON, Ronald. Una revisión de las experiencias en la administración de pavimentos urbanos en los Estados Unidos. En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 3 (1987); p. 15.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS-INVÍAS. Glosario de Manual de diseño geométrico de carreteras. Última actualización. Bogotá. 2013.

LEGUÍZAMO, Jonathan y VEGA, Julio César. Obtención de las leyes de fatiga por reflexión en mezclas asfálticas mediante el método de los elementos discretos. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 7

LIDÓN, Manuel. Modelos de deterioro de infraestructuras de transporte: Puentes y Pavimentos. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. España: Universidad Politécnica de Valencia. 2014. p. 17.

NIEVES HURTADO, A., & DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ, F. C.. Probabilidad y estadística para ingeniería: Un enfoque moderno. México: McGraw - Hill. 2010 p. 73

PICADO MUÑOZ, Greivin. Desarrollo de las curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre. [en línea] Costa Rica: Revista Infraestructura Vial de la Universidad de Costa Rica, julio de 2016. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/27762>

RÍOS MARÍN, José Gonzalo y MARTÍNEZ ARIAS, Iván Darío. Sistema de administración de Pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. [en línea] Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2_28.pdf

RODRÍGUEZ MORENO, M; THEBOUX ZEBALLOS, G y GONZÁLEZ VACCAREZZA, A. Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile [en línea] Santiago de Chile: Revista de la Construcción, noviembre de 2013 Volumen 12, No. 2 [consultado 27 de julio de 2018]. Disponible en Internet:

https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000200012

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño. Bogotá D.C.: Ecoe Ediciones, 2015, p. 521.

SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Sobre el Índice de Estado en los contratos de la tercera generación de concesión de carreteras nacionales [en línea]. Bogotá D.C.: Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2014.

SÁNCHEZ MEJÍA, Felipe. Análisis de la Evolución de los Criterios de Evaluación Técnica y su Influencia en el Estado de las Carreteras Concesionadas en Colombia. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil – Infraestructura Vial. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, 2016. p. 49

SOLMINIHAC, Hernán de; ECHAVEGUREN, Tomás y BUSTOS, Marcelo. Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos, En: Revista de Ingeniería de Construcción. Chile. Vol. 21, No. 3 (2006), p. 158.

SOLMINIHAC TAMPIER, Hernán de. Gestión de Infraestructura Vial. Universidad Católica de Chile. 3ra Edición, 2003; p. 223.

TECHNOLOGY AND MANAGEMENT LTD. Sistema de Administración de Vías Urbanas (S.A.V.U) para la Malla Vial de Bogotá – Colombia [en línea]: 6.- Elaboración del subsistema de gestión y mantenimiento. Bogotá: Cía T&M -. [consultado 1 de agosto de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.construdata.com/BancoConocimiento/S/savu/savu6.htm>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA E INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles. Bogotá D.C.: octubre de 2006.

VALDÉS, G., PÉREZ, F. y CALABI, A. La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro [en línea] España: Revista Ingeniería de Obras Civiles, enero de 2012 Volumen 1. [consultado 9 de septiembre de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.rioc.cl/index.php/RIOC/article/viewFile/1.3/2>

VIDELA, Carlos y ECHEVERRÍA, Gerardo. Administración de la conservación de pavimentos: un caso de transferencia y adaptación tecnológica. En: Revista de Ingeniería de Construcción. No. 10. Chile (1991), p. 92.

VERA SILVA, Jonathan. Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión. Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 6

Y QI, F. WANG, A, EL GENDY y LOU, X. Evaluation of pavement warranty thresholds base on survey study and analysis of pavement Management System data. En: Advances in Transportation Studies: an international Journal Section A 45 (2018) pp. 55-73.

ZHENG Xiaoyan, EASA Said M., YANG Zhengxian, JI Tao, JIANG Zhenliang. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. En: Journal of Cleaner Production. China - 213 (2019) 659 672.

ANEXOS

- Anexo 1** Clasificaciones por grupos.
- Anexo 2** Transito Promedio Diario (TPD) de los tramos analizados.
- Anexo 3** Temperatura Media Anual Promedio de los tramos analizados.
- Anexo 4** Tramos Analizados por tipo de pavimento.
- Anexo 5** Consolidado de los datos de TPD, TMAP y tipo de pavimento por cada tramo de proyecto.
- Anexo 6** Clasificación de tramos por TMAP.
- Anexo 7** Cálculo del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circulan en el carril y el periodo de diseño (N) de cada tramo analizado.
- Anexo 8** Clasificación de tramos de acuerdo al Nivel de Transito (NT).
- Anexo 9** Calificaciones y mediciones de los Parámetros que componen el IE.
- Anexo 10** Modelación preliminar de los datos en Excel.
- Anexo 11** Resultados de los análisis por regresión lineal en 2R DATA.