



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Presentación Proyecto de Grado

Generación de Curvas de Deterioro en un Tramo de 50 Kilómetros en la Autopista Medellín-Bogotá Para Cada uno de los Indicadores Establecidos en el Índice de Estado del Pavimento, Como Herramienta Para Metodologías de Mantenimiento Predictivas en Pavimentos Flexibles.

Presentado Por

Juan Pablo Ospina Benito

Director

Álvaro de la Cruz Correa Arroyave

Codirector

Antonio Preziosi Ribero

Maestría en Infraestructura Vial

Bogotá

2023

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	6
2. Introducción	7
3. Planteamiento y Justificación	11
4. Objetivos.....	19
4.1 Objetivo General	19
4.2 Objetivos Específicos	19
5. Marco Teórico y Contextual.....	20
5.1 Índice de Regularidad Internacional (IRI)	20
5.2 Ahuellamiento	22
5.3 Resistencia al Deslizamiento – Coeficiente de Fricción	23
5.4 Grietas y Fisuras	25
5.5 Inspección Visual de Pavimentos Flexibles	26
5.6 Mediciones en Campo Para los Indicadores que Hacen Parte del Índice de Estado del Pavimento.	27
5.6.1 Medición del Indicador Grietas y Fisuras	31
5.6.2 Medición del Indicador IRI	35
5.6.3 Medición del Indicador Ahuellamiento	39
5.6.4 Medición del Indicador Resistencia al Deslizamiento.....	40
5.7 Descripción del Corredor Objeto de Estudio.....	41
5.8 Descripción del Contrato de Concesión.....	49
5.8.1 Definición y Determinación del Índice de Estado Según el Contrato de Concesión ..	50
5.8.2 Determinación de las Calificaciones.	51
5.8.3 Cálculo y Periodicidad en la Evaluación del Índice de Estado.	55
5.9 Modelos de Deterioro en Pavimentos Flexibles.....	55
5.9.1 Modelos de Comportamiento Absolutos	57
6. Estado del Arte.....	58
7. Metodología.....	77
7.1 Consideraciones de la Información Recogida en Campo	77
7.2 Bitácora de Intervenciones a la Estructura de Pavimento Realizadas en el Corredor Objeto de Estudio.....	79
7.3 Recopilación de los Resultados de las Mediciones en Campo Para los Indicadores que Hacen Parte del IE.	80
7.3.1 Índice de regularidad internacional (IRI).	80
7.3.2 Grietas y fisuras.	80
7.3.3 Ahuellamiento.....	81
7.3.4 Resistencia al deslizamiento (Coeficiente de fricción).	81

7.4 Calificación de los indicadores por kilómetro	81
7.4.1 IRI	81
7.4.2 Grietas y Fisuras (% Área Afectada).....	83
7.4.3 Ahuellamiento.....	83
7.4.4 Fricción.....	85
7.5 Representación Gráfica IRI Para los 50 Kilómetros.....	86
7.6 Representación Gráfica Grietas y Fisuras (%Área Afectada) Para los 50 Kilómetros.....	89
7.7 Representación Gráfica Ahuellamiento Para los 50 Kilómetros.....	92
7.8 Representación Gráfica Fricción Para Los 50 kilómetros.....	95
8. Resultados.....	97
8.1 Ecuaciones Para el Indicador IRI	103
8.2 Ecuaciones Para el Indicador Ahuellamiento.....	112
8.3 Ecuaciones Para el Indicador Fricción (CRD).....	121
8.4 Ecuaciones Para el Indicador Porcentaje de Área Afectada (Grietas y Fisuras).....	134
9. Análisis de Resultados	144
10. Conclusiones.....	145
11. Recomendaciones.....	149
12. Bibliografía	152

Tabla de Fotografías

Fotografía 1. Vehículo equipado por Devimed para la medición de indicadores	29
Fotografía 2. Cámaras de alta resolución instaladas en el vehículo de medición.....	31
Fotografía 3. Registro de cámara derecha.....	32
Fotografía 4. Registro de cámara izquierda.....	32
Fotografía 5. Odómetro instalado en el vehículo de medición.....	35
Fotografía 6. GPS instalado en el vehículo de medición.....	35
Fotografía 7. Perfilómetro instalado en el vehículo de medición	36

Tabla de Figuras

Figura 1. Tensiones generadas por cargas móviles en la estructura de pavimento rígido y flexible.....	12
Figura 2. Relación entre el deterioro de pavimentos flexibles y el costo de rehabilitación asociado.....	14
Figura 3. TPD autopista Medellín-Bogotá desde el año 2014 hasta el año 2020.....	16
Figura 4. Modelo de cuarto de carro y sus ecuaciones.....	21

Figura 5. Representación gráfica del ahuellamiento en carpeta de rodadura y capas inferiores.

23

Figura 6. Representación gráfica de la textura superficial de un pavimento flexible.24

Figura 7. Falla en pavimento flexible de tipo “piel de cocodrilo”.....26

Figura 8. Falla en pavimento flexible de tipo “Bache”.26

Figura 9. Calibración de parámetros fotográficos.32

Figura 10. Definición de la sección transversal a medir.....33

Figura 11. Proceso de demarcación y clasificación de deterioros cada 7m.34

Figura 12. Calibración de parámetros para la medición del perfil longitudinal37

Figura 13. Calibración de parámetros para la medición del perfil longitudinal.38

Figura 14. Orden de medición del IRI en doble calzada.38

Figura 15. Grip-Tester implementado para la medición del indicador correspondiente a fricción.

41

Figura 16. Implementación del Grip-Tester en el vehículo de medición.....41

Figura 17. Ubicación del Oriente de Antioqueño y sus municipios.....45

Figura 18. Ubicación Área Metropolitana y sus municipios.....45

Figura 19. Trazado en planta del corredor objeto de estudio.....46

Figura 20. Esquema general del deterioro de un pavimento en la primera y segunda fase.56

Figura 21. Esquema típico de modelos absolutos.58

Figura 22. Curva de deterioro para el IRI, en el grupo 2.....62

Figura 23. Curva de deterioro para el Ahuellamiento, en el grupo 2.62

Figura 24. Curva de deterioro para el % de Área afectada, en el grupo 2 de la investigación de Gamboa.....63

Figura 25. Curva de deterioro para la resistencia al deslizamiento (CRD) en el grupo 2.63

Figura 26. Relación entre la condición del pavimento flexible y el tiempo.....66

Figura 27. Comportamiento de los datos calculados para el PCI en cada uno de los años.67

Figura 28. Curva de deterioro para los tramos con estructura suficiente.68

Figura 29. Curva de deterioro para los tramos con estructura media.69

Figura 30. Curva de deterioro para los tramos con estructura insuficiente.69

Figura 31. Comportamiento del IRI en diferentes estados con diferentes climas.....73

Figura 32. Modelo para curvas de deterioro en función del PCI.76

Figura 33. Esquema general del deterioro de un pavimento en la primera y segunda fase.79

Figura 34. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril izquierdo de la calzada izquierda.....87

Figura 35. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril derecho de la calzada izquierda.....88

Figura 36. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril izquierdo de la calzada derecha.....88

Figura 37. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril derecho de la calzada derecha	89
Figura 38. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril izquierdo de la calzada izquierda.	90
Figura 39. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril derecho de la calzada izquierda.....	91
Figura 40. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril derecho de la calzada derecha.....	91
Figura 41. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril izquierdo de la calzada derecha.	92
Figura 42. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril izquierdo de la calzada izquierda.....	94
Figura 43. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril derecho de la calzada izquierda.	94
Figura 44. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril derecho de la calzada derecha.	94
Figura 45. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril izquierdo de la calzada derecha.	95
Figura 46. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril izquierdo de la calzada izquierda.	96
Figura 47. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril derecho de la calzada izquierda.....	96
Figura 48. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril derecho de la calzada derecha.	97
Figura 49. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril izquierdo de la calzada derecha.....	97
Figura 50. Interfaz inicial en la página web desarrollada con la herramienta de visualización de datos.....	99
Figura 51. Lugar donde se debe seleccionar el kilómetro de interés para obtener la curva de deterioro del indicador seleccionado.	100
Figura 52. Curva de deterioro para el indicador IRI en el carril derecha de la calzada derecha en el kilómetro 1 y sus elementos.	100
Figura 53. Curva de deterioro para el indicador % de área afectada en el carril derecho de la calzada derecha en el kilómetro 6 y sus elementos.	102

Tabla de Tablas

Tabla 1. Categorías de tránsito.....	17
Tabla 2. Clasificación de deterioros en pavimentos flexibles.	28
Tabla 4. Gradientes de temperatura que se experimentan en el corredor respecto al promedio anual.....	47

Tabla 5. Valores de precipitación promedio anual para los municipios que pertenecen al corredor objeto de estudio.....	48
Tabla 6. Valores de multas por incumplimiento en índice de estado del pavimento.	49
Tabla 7. Factor de influencia en índice de estado del pavimento.	53; Error! Marcador no definido.
Tabla 8. Tabla de calificaciones para cada uno de los indicadores que componen el índice de estado.	53
Tabla 9. Relación de corredores evaluados.	66
Tabla 10. Clasificación de comportamientos de datos según su estructura.	68
Tabla 11. Factor Z0 para diferentes porcentajes de incertidumbre.	70
Tabla 12. Tratamientos para el mantenimiento recomendados según el resultado de IRI.	74
Tabla 13. Grupos de comportamientos identificados en las curvas de deterioro por kilómetro.	103
Tabla 14. Resultados indicador IRI.	105
Tabla 15. Resultados indicador Ahuellamiento.	114
Tabla 16. Resultados indicador Fricción.	123
Tabla 17. Resultados indicador % de área afectada.....	136

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula para determinar el Coeficiente F.....	53
Ecuación 2. Fórmula para determinar la profundidad máxima de ahuellamientos.	55
Ecuación 3. Fórmula para determinar el valor del Índice de Estado.	55
Ecuación 4. Ecuación para la curva de deterioro de estructura suficiente.	70
Ecuación 5. Función cuadrática para describir el deterioro de pavimentos flexibles.....	75
Ecuación 6. Determinación del IRI por hectómetro-carril.....	82
Ecuación 7. Determinación del IRI por kilómetro-carril.....	82
Ecuación 8. Determinación del % de área afectada por calzada y kilómetro.....	83
Ecuación 9. Determinación de profundidad máxima de ahuellamiento por carril, calzada y kilómetro.	84
Ecuación 10. Determinación del % de área afectada por calzada y kilómetro.....	85

1. Resumen

Este proyecto de investigación se enfocó en el análisis del deterioro de una carretera concesionada de 50 kilómetros en el departamento de Antioquia, Colombia. Se realizaron

mediciones periódicas para los cuatro indicadores que componen el índice de estado del pavimento flexible: Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Ahuellamiento, Porcentaje de Área Afectada por Grietas y Fisuras, y Coeficiente de Fricción. El objetivo fue evaluar el estado del pavimento y predecir fechas probables de incumplimiento respecto al límite establecido en el contrato de concesión. Para ello, se desarrolló una metodología que incluyó la sectorización de la carretera por kilómetro y el procesamiento y análisis de los datos recopilados. Se aplicaron modelos de regresión lineal, exponencial y logarítmica para establecer ecuaciones que describieran el comportamiento de cada indicador en función del tiempo. Además, se creó una herramienta de visualización de deterioros dinámica, que permitió a los responsables del mantenimiento de la carretera acceder y analizar de manera interactiva los datos de deterioro. Esta herramienta brindó una representación gráfica de los indicadores por kilómetro, mostrando las fechas probables de incumplimiento y las ecuaciones de regresión asociadas.

Los resultados revelaron que la mayoría de los kilómetros y carriles se encontraban en cumplimiento respecto al límite de deterioro establecido en el contrato de concesión. Sin embargo, se identificaron sectores críticos que requerían un monitoreo constante y planificación adecuada de intervenciones.

En conclusión, este proyecto proporcionó una comprensión del comportamiento del deterioro en la carretera y demostró la viabilidad de cambiar metodologías reactivas por predictivas en el mantenimiento de infraestructuras viales. La herramienta de visualización desarrollada ofreció una oportunidad para mejorar la gestión del mantenimiento de la carretera y tomar decisiones proactivas, lo que contribuye a un uso más eficiente y sostenible de los recursos.

2. Introducción

Las primeras generaciones de concesiones de carreteras en Colombia surgieron en su mayoría en la década que comprende los años 1990 y 2000. Nacieron como una esperanza

para mejorar las condiciones de competitividad y economía del país en la época. Dentro de sus respectivas planeaciones y estudios, las carreteras que se desarrollaron en esta ola generacional definieron la vida útil de las estructuras de pavimentos que las conforman de acuerdo con unas condiciones de clima y tráfico previamente determinadas en la época. Si bien es cierto que, en los contratos de concesión, se responsabiliza a los concesionarios de mantener en óptimas condiciones de servicio las carreteras sobre las que se instalaron peajes, desde aquella época hasta la actualidad dichas condiciones de tráfico y clima han cambiado notablemente. Los movimientos de carga pesada y de particulares dentro del país han aumentado considerablemente respecto a los años 90. Por otro lado, hoy en día somos testigos de cambios climáticos importantes, pues se viven tanto inviernos como veranos más largos respecto a años anteriores, hemos vivido fenómenos como los de la niña y el niño.

Debido al rápido aumento en las condiciones de producción y comercialización en Colombia, las carreteras principales que conectan los lugares estratégicos del país se han visto afectadas por un incremento considerable en los niveles de tráfico que inicialmente estaban diseñadas para resistir. Esto sumado a los cambios climáticos que afronta hoy en día la humanidad, ha generado que estas carreteras, en su mayoría no sean suficientes. El mantenimiento de las principales carreteras de Colombia es un tema de suma importancia en el panorama actual, donde se vienen haciendo unas inversiones sustanciales en desarrollo de infraestructura vial en el país con el principal objetivo de mejorar la economía y ubicarnos como un competidor a nivel dentro de la región. El proceso mediante el cual se han dado los desarrollos viales es principalmente los contratos de concesión, donde entes privados hacen grandes inversiones buscando el beneficio para la comunidad y una utilidad adecuada al nivel de su inversión. Dichos contratos se ejecutan en un marco que incluye la operación y mantenimiento durante un tiempo estipulado o hasta llegar a un valor esperado de ganancias como lo hacen los actuales proyectos de cuarta y quinta generación.

Luego, los contratos deben tener un control sobre el cumplimiento de los estándares del estado de servicio en los que se mantenga la infraestructura en el tiempo, por lo que se plantean dentro de estos una serie de indicadores que se miden con cierta periodicidad establecida y obligan al concesionario a destinar recursos al mantenimiento y de esta forma atender de manera óptima las exigencias de servicio de la vía. La atención de dichos indicadores, actualmente se hace de manera reactiva, priorizando intervenciones en lugares que ya presentan incumplimientos en los resultados de las mediciones de indicadores viales, más específicamente en los parámetros que componen el Índice de Estado (IE) del pavimento (Regularidad IRI, Ahuellamiento, Fricción y Grietas y Fisuras). Situación que conlleva un despliegue de recursos desde el momento en que se hacen los diferentes requerimientos por parte de la interventoría para no infringir el contrato e incurrir en sanciones que afectan directamente el flujo de fondos del administrador vial.

Se puede decir entonces que las condiciones en las que fueron concebidas las carreteras de primera generación han variado sustancialmente, de manera que el deterioro es casi que inminente en ellas. Son precisamente estos proyectos carreteros los que por cuestión de tiempo han tenido que lidiar frecuentemente con las consecuencias de los deterioros que se generan en las estructuras de pavimentos. Las concesiones viales de primera generación se han visto enfrentadas a este tipo de situaciones, han invertido grandes sumas de dinero para resolver los diferentes daños que se presentan en sus respectivos corredores y de esa manera, evitar incurrir en sanciones por parte de interventorías o en demandas por accidentes ligados al deterioro de un camino en específico. Tal es el caso del concesionario Devimed S.A, encargado de la operación y del mantenimiento de la autopista Medellín-Bogotá desde el año 1996. Con el fin de monitorear y controlar el nivel de servicio del corredor concesionado, se estableció dentro del contrato de Devimed, así como en el resto de los contratos de primera generación, el cumplimiento del Índice de Estado del Pavimento (IE) en el que se incluyen los siguientes parámetros: (Regularidad IRI, Ahuellamiento, Fricción y Grietas y Fisuras). Para

cada uno de estos se establecieron unos valores mínimos que debe mantener el concesionario y de esta manera garantizar un nivel de servicio aceptable para los usuarios.

La atención a los parámetros o indicadores que hacen parte del Índice de Estado del pavimento se ha llevado cabo de manera reactiva, priorizando intervenciones en lugares en los que ya se presentan incumplimientos en los resultados de las mediciones de los indicadores viales. Es decir, se ha dejado que las estructuras de pavimento lleguen a puntos de deterioro avanzados, de manera que no solo representen un riesgo de accidentalidad para los usuarios, sino que también sean causal de sanciones por parte de interventorías. Además, cuando las estructuras de pavimento flexible alcanzan este grado de deterioros, el costo de las intervenciones que se deben realizar para mejorar sus condiciones de servicio, aumenta considerablemente respecto a hacerlas en condiciones de deterioros bajos o medios.

La herramienta proyectada para describir y determinar los incumplimientos en los indicadores del pavimento son las denominadas curvas de deterioro, las cuales se desarrollan como una regresión sobre una dispersión de puntos, compuesta por datos de valores de medición en una serie de tiempo. A estos datos es necesario realizarles un análisis estadístico que finalmente pueda entregar el tipo de regresión que mejor se ajusta a la tendencia del comportamiento del deterioro para cada indicador, con el fin de encontrar una ecuación que describa lo más ajustado a la realidad el rendimiento del pavimento en cada parámetro del índice de estado y de esta forma, lograr extrapolar dicha ecuación en el futuro y proyectar el momento probable de incumplimiento y de esta manera facilitar la toma de decisiones para prevenir un mayor grado de deterioro que finalmente acarree mayores costos de mantenimiento.

Devimed concesión de primera generación, a cargo de la autopista Medellín-Bogotá desde el Km 0+000 hasta el Km 50+000 está proyectada a llevar a cabo su reversión en el año 2026. Desde el concesionario, se ha venido trabajando en la estructuración de nuevos proyectos de iniciativa privada que entrarían a una nueva ola de generación de concesiones

viales. Considerando la evolución que han tenido los modelos financieros para la estructuración de alianzas público-privadas en el tiempo y su asignación de riesgos, en su mayoría asumidos por la parte privada y su desempeño en la operación y el mantenimiento de la vía concesionada, se vuelve necesario pensar en herramientas que permitan la gestión de los indicadores con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en los contratos y evitar sanciones por parte de las interventorías que se traducen en dinero. Por esta razón, Devimed desde el año 2017 ha invertido en herramientas tecnológicas que le permiten medir en campo el estado de cada uno de los indicadores que conforman el Índice de Estado del pavimento y en caso de existan incumplimientos poder atenderlos de manera oportuna. Lo que se busca en este proyecto es desarrollar una herramienta basada en la organización y en el análisis de datos medidos en campo, que permita visualizar el comportamiento del deterioro en cada uno de los 50 kilómetros de la Autopista Medellín-Bogotá y que, a su vez, proporcione las fechas probables en las que se alcanzarían valores de incumplimiento para cada uno de los indicadores que pertenecen al índice de estado, sin la necesidad de que dichos incumplimientos se materialicen. De esta manera, la herramienta representa una oportunidad para anticiparse mediante la toma de decisiones a las consecuencias que se puedan generar a partir de los incumplimientos en los indicadores. Además, con dicha herramienta también se busca aportar a la selección objetiva de los lugares de una carretera que merecen ser intervenidos, considerando el comportamiento del deterioro en el tiempo y la asignación de recursos que requeriría la intervención respecto a su estado de deterioro. Finalmente, el propósito del desarrollo de la herramienta es conducir al cambio de metodologías de mantenimiento reactivas por unas predictivas.

3. Planteamiento y Justificación

Según Rondón & Reyes, (2007), existen dos mecanismos principales que generan la degradación de los pavimentos flexibles, estos son: la fatiga y el exceso de deformación

permanente, ambos se intentan controlar en las metodologías de diseño empíricas y mecanicistas. La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica, tal como se ilustra en la **Figura 1**. Este tipo de deformación es asociado a la respuesta resiliente que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares.

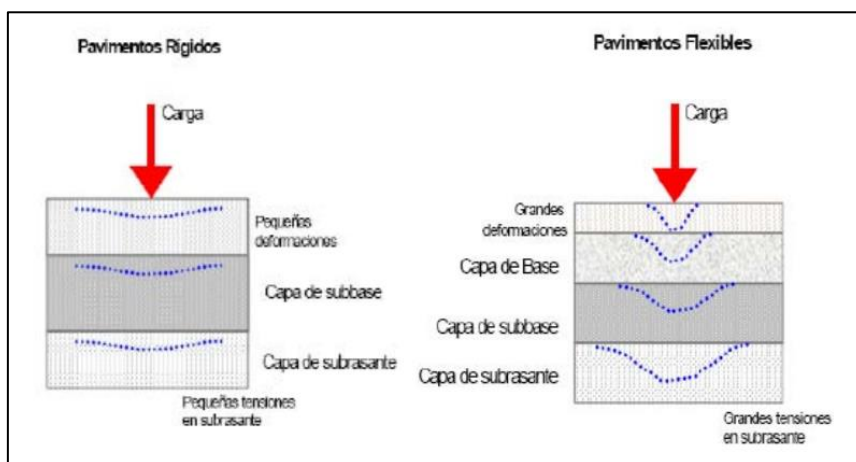


Figura 1. Tensiones generadas por cargas móviles en la estructura de pavimento rígido y flexible. **Fuente:** (Miranda, 2010).

La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos. La cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. Según las especificaciones del INVIAS, los sondeos que se deben realizar, para conocer las características mecánicas del terreno en el que se va a instalar la estructura de la vía (subrasante), deben tener un espaciamiento longitudinal de mínimo cada doscientos cincuenta metros (250 m) y deben tener una profundidad mínima de uno coma cincuenta metros (1,50 m), este valor de espaciamiento resulta arbitrario, pues es como si se tomara por cierto que en la longitud entre ensayos el terreno es homogéneo y que las características mecánicas, físicas, químicas y mineralógicas no van a variar, lo cual es muy poco probable que ocurra. Encontramos en lo anterior un factor que puede incurrir en el deterioro del pavimento pues como se ilustró en la **Figura 1**, las tensiones en los pavimentos flexibles se transmiten considerablemente a las capas inferiores, siendo mayor en la capa de subrasante. En este

punto es importante considerar, además, lo expresado por Rondón, (2007) respecto a las condiciones de tránsito y clima en Colombia, factores que además de la subrasante, también son determinantes en el diseño y deterioro de pavimentos flexibles: *“La tendencia del parque automotor por este medio de transporte en los últimos 30 años ha sido incrementar el número de ejes equivalentes y la magnitud de las cargas. Con respecto al clima, fenómenos ambientales como “El Niño” o “La Niña”, hacen que la temperatura presente variabilidad interanual de 2°C en algunas zonas del territorio nacional y que la precipitación aumente provocando períodos de lluvia de hasta dos meses más de lo normal por año.”*

Teniendo en cuenta lo anteriormente enunciado respecto a los factores que determinan los diseños de los pavimentos flexibles en Colombia, es normal que estas estructuras tiendan a deteriorarse en el tiempo, dado que se hacen cantidad de suposiciones en los métodos de diseño que despliegan en ocasiones estructuras insuficientes para las condiciones de tráfico y clima cambiantes. Además de la subrasante que usualmente, se caracteriza de manera muy general, mediante relaciones para obtener valores de ensayos extranjeros como tales como el %CBR que no se ajustan de manera precisa a las condiciones del país. Los deterioros en estas estructuras flexibles generan en primera instancia, que la probabilidad de accidentalidad en los corredores viales aumente, puesto que a medida que los daños avanzan, se generan condiciones que amenazan la seguridad de los usuarios y, por otro lado, que, para los administradores viales, las inversiones en el mantenimiento de pavimentos flexibles aumenten, pues estas son determinadas por la cantidad y severidad de los deterioros.

Es común que las decisiones respecto a las intervenciones para el mantenimiento de las estructuras de pavimento en Colombia sean tomadas de manera reactiva, es decir, cuando los daños están sumamente avanzados y son generadores de consecuencias tales como accidentalidad o sanciones a entes administradores por parte de interventorías. Permitir que el estado estructural de las mallas viales alcance altos deterioros en el tiempo, no solo trae problemas sociales o con interventorías, sino que también este tipo de situaciones representan

rubros mayores en sus respectivas reparaciones o mantenimientos, tal como se ilustra en la **Figura 2**, pues con el pasar del tiempo desde que una estructura de pavimento flexible se pone en funcionamiento, esta se va deteriorando y su vez los costos de intervención empiezan a ser mayores, hasta el punto en el que conviene optar por decisiones de gran inversión tales como la reconstrucción de la estructura entera. Cuando una estructura de pavimento flexible ha alcanzado valores cercanos al 88% del periodo de vida útil proyectado en el diseño y sus daños son sumamente notorios y peligrosos, las intervenciones para reparar estos deterioros cuestan entre cuatro o cinco veces más de lo que hubiese costado llevar a cabo las actividades de mantenimiento cuando la vida útil estaba cercana al 75%. Considerando lo anterior, no solo sería pertinente desde el punto de vista de seguridad vial estar al tanto del deterioro de las estructuras de pavimento para minimizar la probabilidad de accidentalidad con daños avanzados, sino que también se podría, interviniendo en el momento preciso, alargar la vida del pavimento con unas inversiones moderadas.

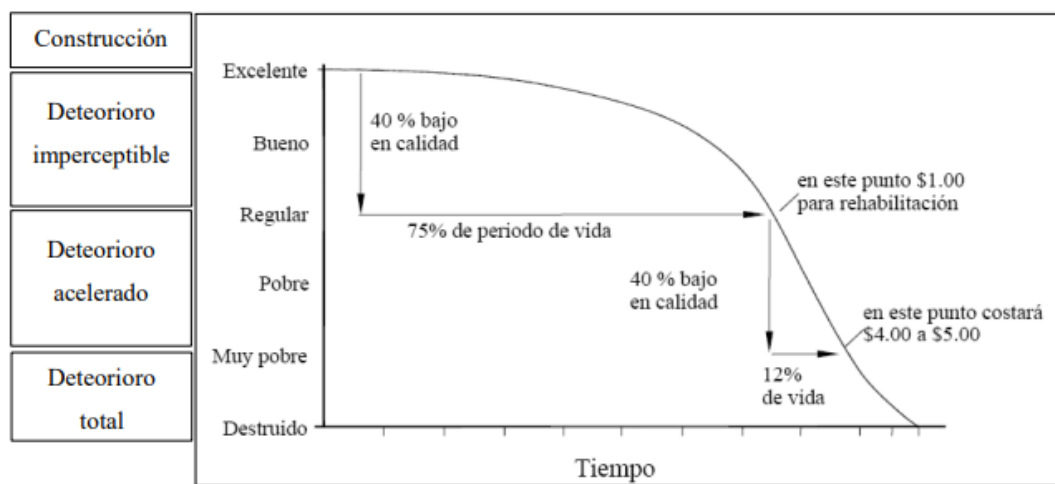


Figura 2. Relación entre el deterioro de pavimentos flexibles y el costo de rehabilitación asociado. **Fuente:**

(Miranda, 2010)

Por otro lado, las metodologías de mantenimiento reactivas en las nuevas generaciones de concesiones carreteras en Colombia pueden ser consideradas como disparadoras de riesgos, pues al implementar estas metodologías, no solo las probabilidades de accidentalidad

y sanciones aumentan, sino que también, se pueden ver afectados los flujos de caja de estos proyectos debido a las grandes inversiones que se deben realizar cuando los deterioros han avanzado de manera considerable en el tiempo. En este punto es importante resaltar que, a diferencia de las primeras generaciones, en la cuarta y quinta generación, el desembolso de los recaudos de los peajes está supeditado al desempeño que tengan los concesionarios respecto a la gestión en los indicadores de operación y mantenimiento. Considerando lo anterior, se vuelve interesante e importante estudiar herramientas que permitan facilitar la toma de decisiones objetiva respecto a las intervenciones que se llevan a cabo en las estructuras de pavimentos flexibles, pues se podría cambiar el enfoque de implementar metodologías netamente reactivas y empezar a poner en marcha metodologías predictivas y preventivas.

En el mundo existe gran cantidad de sistemas de gestión de pavimentos que, precisamente tienen como objetivo minimizar los riesgos de accidentalidad en los corredores viales y optimizar los recursos que se invierten en el mantenimiento de estructuras flexibles. Estos sistemas por lo general se basan en indicadores tales como: *IRI (índice de rugosidad internacional)*, *Grietas y Fisuras*, *Ahuellamiento* y *Coeficiente de fricción transversal*. Mediante la medición recurrente de dichos indicadores, los sistemas de gestión buscan generar herramientas que permitan facilitar la toma de decisiones objetiva respecto a las intervenciones a realizar. Un ejemplo de una de las herramientas que permiten lo anterior, son las curvas de deterioro que resultan a partir de las mediciones en campo y que representan el comportamiento de un indicador en el tiempo. Estas curvas permiten, además, representar estadísticamente el comportamiento de los indicadores para poder monitorear el deterioro de la estructura de pavimento en el tiempo y determinar el momento de intervención conveniente.

Indiscutiblemente este tipo de herramientas son útiles para los administradores viales, encargados del mantenimiento y operación de carreteras que ascienden hasta el orden nacional y que, por lo tanto, tienen mayores niveles de tráfico, aumentando las probabilidades de deterioro. Un caso de este tipo de carreteras en Colombia es la autopista Medellín-Bogotá,

para la cual sus labores constructivas, para su primer tramo de 58 kilómetros desde el municipio de Bello hasta el municipio de El Santuario iniciaron en el año 1966 y finalizaron en 1980. Pérez, 2016. Este corredor surgió como una ruta eficiente y alternativa respecto a los trayectos que se debían realizar en aquella época para conectar ambas ciudades, tales como: (Medellín-Sonsón-La Dorada-Bogotá) y (Medellín-Manizales-Bogotá). La construcción de la autopista Medellín-Bogotá, representó, en su entonces una esperanza para que Colombia entrara al mercado de América Central y a su vez ser la carretera principal que impulsara la región del Oriente Cercano en el departamento de Antioquia.

Efectivamente desde que la autopista Medellín-Bogotá entró en funcionamiento hasta la actualidad se ha convertido en una de las principales vías del país y un ejemplo de lo anterior es que para el 2020, según el Ministerio de Transporte, movilizó más de 1´455.000 toneladas, de las cuales el 59% fue en vehículos pesados de categoría C2 y de acuerdo con el “Resumen Consolidado Mensual Por Estación de Peaje de Tráfico y TPD”, se determinaron los TPD para el compendio de años entre 2014 y 2020, tal como se ilustra en la **Figura 3**.

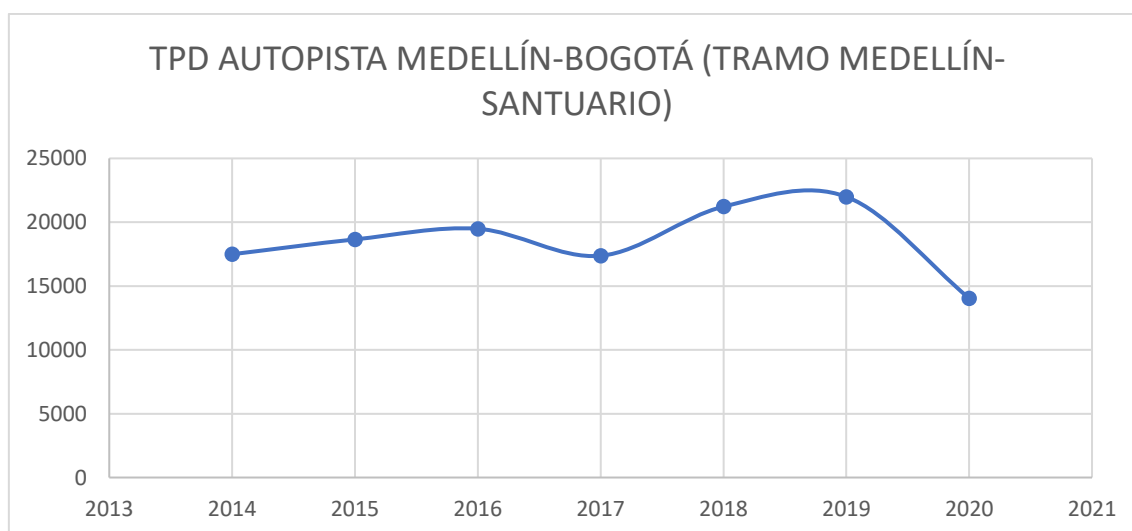


Figura 3. TPD autopista Medellín-Bogotá desde el año 2014 hasta el año 2020. **Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la **Figura 3** los tráficos promedios diarios han estado por encima de los 10.000 vehículos, lo que quiere decir que es una carretera con un volumen de tránsito alto, tal como se puede verificar en la **Tabla 1**. Cabe resaltar que en los años 2017 y 2020 se ve una disminución considerable en los TPDA y es claramente justificable pues en el año 2017 ocurrió un derrumbe a la altura del kilómetro 14, situación que demoró alrededor de cinco meses en solucionarse y por lo tanto en este tiempo el peaje estuvo cerrado. Por otro lado, en el año 2020, específicamente el 25 de marzo, se levantaron las talanqueras para dar paso libre a través del peaje sin cobro durante el periodo de aislamiento preventivo decretado por el gobierno nacional a raíz del COVID-19.

Tabla 1. Categorías de tránsito. **Fuente:** INVIAS (2008)

CATEGORÍA	TPD	N
T0	0 – 200	$< 10^6$
T1	201 – 500	$1 \times 10^6 - 1.5 \times 10^6$
T2	501 – 1000	$1.5 \times 10^6 - 5 \times 10^6$
T3	1001 – 2500	$5 \times 10^6 - 9 \times 10^6$
T4	2501 – 5000	$9 \times 10^6 - 1.7 \times 10^7$
T5	5001 – 10000	$1.7 \times 10^7 - 2.5 \times 10^7$
T6	> 10000	$2.5 \times 10^7 - 1 \times 10^8$

Considerando la cantidad empresas de carácter industrial asentadas en las márgenes de la autopista Medellín-Bogotá, con centros de operación y de producción principales tales como: Pepsi.co, Sura S.A, Argos, Akt motos, Servientrega, IMUSA, Leonisa, Indumil y Riotex, se podría concluir que una parte importante de los TPD corresponden a vehículos pesados, pues además de lo anteriormente enunciado, la autopista es la conexión principal del oriente antioqueño con el resto de Antioquia. Por lo tanto, teniendo en cuenta la importancia de este

corredor y el nivel de tráfico que posee es consecuente pensar que existe un gran riesgo de deterioro.

Desde el año 1996 la autopista Medellín-Bogotá ha estado bajo la administración del concesionario Devimed S.A y desde entonces ha desempeñado las labores de operación y mantenimiento correspondientes. Esta concesión surge en la primera ola o generación de proyectos de alianzas público-privadas para proyectos carreteros en el país y se estima su reversión al estado en el año 2026. Devimed, desde que inició sus labores de administración, ha invertido importantes sumas de dinero en el mantenimiento de la infraestructura concesionada, sobre todo en la estructura de pavimento y esto responde a que se han tomado las decisiones de intervención de manera reactiva. Sin embargo, desde el año 2017 se han hecho inversiones desde el concesionario para la obtención de herramientas tecnológicas que permiten la medición del estado del pavimento, generando la posibilidad de cambio en la metodología para la toma de decisiones en cuanto a las intervenciones. Es importante resaltar que estas herramientas permiten la recolección de datos de medición y que estos a su vez no son totalmente útiles si al final de cuentas solo se utilizan para determinar los lugares en los que es notorio el daño o se está en incumplimiento respecto al contrato con la entidad concedente en este caso la ANI.

En este orden de ideas, la finalidad de este proyecto es desarrollar una herramienta que permita visualizar las curvas de deterioro para los 50 kilómetros de doble calzada de la Autopista Medellín-Bogotá; lo anterior, para cada uno de los indicadores que hacen parte del índice de estado del pavimento, considerando que se cuenta la información de mediciones recolectadas en campo por medio de herramientas tecnológicas. Estas curvas serán generadas para cada kilómetro y para cada uno de sus respectivos carriles; esto con el fin de que sirvan como apoyo para la toma de decisiones objetiva respecto a las futuras intervenciones a la estructura de pavimento de este corredor, que como se mencionó anteriormente, por sus condiciones de tráfico, tiende al deterioro constante.

Cabe resaltar que las curvas de deterioro también pueden ser consideradas como un conjunto de elementos de monitoreo del desempeño en el mantenimiento de cada indicador que tiene el administrador o concesionario. Se vuelven potencialmente interesantes y útiles en los proyectos de nuevas generaciones de concesiones carreteras en las cuales el principal enfoque es el financiero y el retorno de la inversión va ligado al desempeño que tenga el concesionario en cada uno de los indicadores de operación y mantenimiento, por lo que este tipo de herramientas permite estar al tanto del estado del pavimento en el tiempo y conocer mediante procesos estadísticos el espectro de tiempo en que es probable llegar a desempeños bajos o a incumplimientos respecto al contrato de concesión.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Generar las curvas de deterioro en un tramo de 50 kilómetros en la autopista Medellín-Bogotá para cada uno de los indicadores establecidos en el índice de estado del pavimento, como herramienta para metodologías de mantenimiento predictivas.

4.2 Objetivos Específicos

- Recolectar la información de los resultados correspondientes a las mediciones en campo para cada uno de los indicadores incluidos en el índice de estado del pavimento: Índice de rugosidad internacional (IRI), grietas y fisuras, ahuellamiento y fricción en los 50 kilómetros del corredor.
- Representar gráficamente los resultados de las mediciones para cada indicador en la autopista Medellín-Bogotá desde el km 0+000 hasta el km 50+000.
- Generar las curvas de deterioro por indicador y kilómetro mediante la asignación de un comportamiento estadístico del tipo (lineal, exponencial o logarítmico)

- Determinar para todos los kilómetros, el momento de incumplimiento de cada indicador respecto al contrato de concesión.

5. Marco Teórico y Contextual

Para la construcción de las curvas de deterioro para cada uno de los indicadores que hacen parte del índice de estado de pavimentos flexibles, es importante hacer referencia en primer lugar sobre los tipos de deterioros que se generan en estas estructuras y sus respectivas severidades, también es importante definir qué significa cada indicador y qué importancia tiene. Asimismo, es fundamental identificar los límites de cumplimiento que se establecen en el contrato de concesión del corredor en cuestión, además de cómo y con qué herramientas se miden en campo dichos indicadores.

5.1 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Según Marcobal *et al.* (2017), el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) fue establecido en el Experimento Internacional IRRE (International Road Roughness Experiment), desarrollado en Brasil, por el Banco Mundial en el año 1982. Se define como la medida del desplazamiento de la masa amortiguada respecto de la masa no amortiguada de un modelo de cuarto de carro, y se reporta en unidades de desplazamiento por longitud recorrida. El método utiliza la respuesta de un modelo matemático estandarizado sobre un perfil longitudinal medido,

Figura 4. De acuerdo con Sánchez & Solminihaç (1989), la regularidad es una de las características que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al transitar por una vía determinada. Precisamente, esta percepción de comodidad es ciertamente más valorada por los usuarios que la capacidad portante que tenga la carretera. Según Vargas (2010), cuando se realizan evaluaciones a la estructura de pavimento de carácter funcional, el IRI tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos debido a que las irregularidades superficiales del pavimento pueden generar que la velocidad de los

vehículos que transitan el corredor se vea afectada negativamente, traduciéndose en un mayor consumo de combustible y desgaste de llantas. Además, Vargas (2010) menciona que, al generarse efectos dinámicos por las irregularidades longitudinales en las carreteras, se modifica el estado de esfuerzos y deformaciones de las estructuras de pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación. Considerando lo anterior, conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio y durante su vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

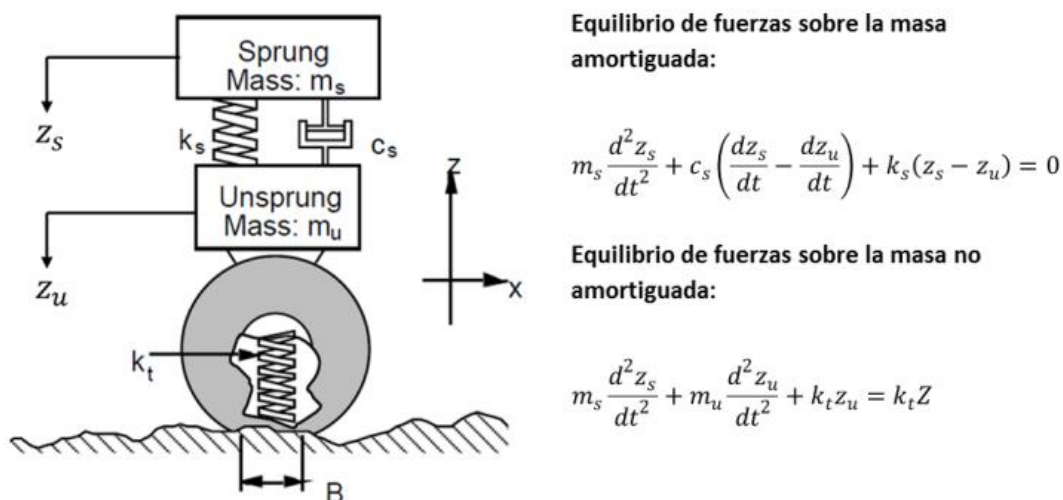


Figura 4. Modelo de cuarto de carro y sus ecuaciones. **Fuente:** (Marcobal, Díaz, Márquez & Saldaña, 2017)

El IRI es un indicador que se expresa en m/km o mm/m. Da cuenta sobre la cantidad de irregularidades acumuladas en el perfil longitudinal de un carril en tramos que por lo general no son mayores a 200m. Específicamente en Colombia, este indicador es controlado mediante la norma INV E -790 -13 y los valores que se deben cumplir para el mismo en carreteras concesionadas dependen del tipo de contrato que tenga la concesión y de la respectiva generación a la que pertenezca. El cálculo del IRI hoy en día, involucra la implementación de herramientas estadísticas, matemáticas y computacionales que permiten determinar el valor de

la regularidad. Básicamente el objetivo de las herramientas con las que se mide el IRI es derivar el perfil que se genera en cada una de las huellas por las que probablemente transitaría la mayoría de los vehículos en cada uno de los carriles que pertenezcan al corredor vial.

5.2 Ahuellamiento

De acuerdo con el Manual para la inspección de pavimentos flexibles del INVIAS, el ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria más probable de las llantas de los vehículos y se menciona que en ocasiones viene acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida. Además, resalta que este tipo de falla puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidroplaneo en las zonas de depresión donde queda retenida el agua. Este tipo de falla es atribuida, por lo general a la acumulación de deformaciones permanentes, que corresponden a las que no se recuperan cuando una estructura de pavimento flexible es sometida a cargas cíclicas.

Según Delbono & Rebollo (2017), el ahuellamiento se puede originar por varias razones y entre estas enuncia las propiedades deficientes de los materiales que componen el diseño estructural, propiedades volumétricas erróneas y por las solicitaciones sobre la estructura debidas al tránsito (cargas pesadas, bajas velocidades de circulación). Adicionalmente, resaltan que las deformaciones verticales (ahuellamiento) en un pavimento generalmente se producen por la deformación de las bases, la subrasante y/o la deformación de la propia carpeta asfáltica,

Figura 5. Por otro lado, Rondón & Reyes (2009) enuncian que la deformación permanente en materiales granulares incrementa proporcionalmente cuando se aumenta la magnitud del esfuerzo cíclico y disminuye con el aumento de la presión de confinamiento. Este tipo de falla adicionalmente puede ser consecuencia de la acción de altas temperaturas sobre mezclas asfálticas pues el grado de viscosidad en estas situaciones aumenta, permitiendo que la estructura pierda rigidez y se deforme. Además, también puede ser consecuencia de someter la carpeta asfáltica a la acción de las cargas impuestas por el tráfico de manera temprana, sin

que la mezcla asfáltica haya bajado la temperatura y alcanzado una resistencia adecuada. Este tipo de falla hace parte a su vez del índice de estado del pavimento, se mide en milímetros mediante la regla de los tres metros y el INVIAS establece la norma de ensayo I.N.V E 789-13 para establecer el ahuellamiento y las deformaciones en pavimentos flexibles.

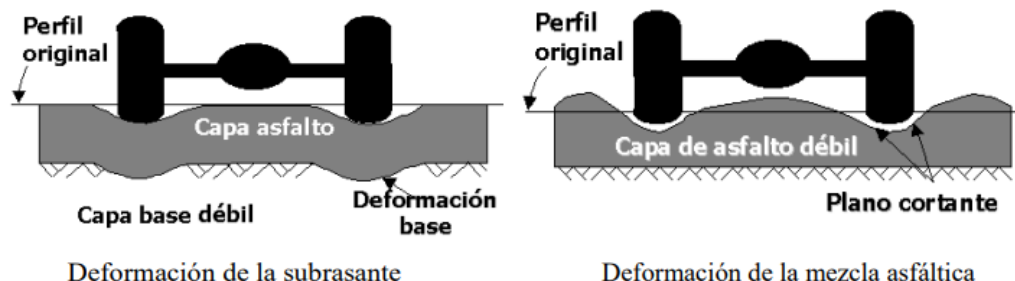


Figura 5. Representación gráfica del ahuellamiento en carpeta de rodadura y capas inferiores. **Fuente:**

(Marcobal, Díaz, Márquez & Saldaña, 2017)

5.3 Resistencia al Deslizamiento – Coeficiente de Fricción

De acuerdo con Roco *et al.* (2014) una de las principales características que debe cumplir un pavimento, es disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos de los vehículos que lo transitan, especialmente en las zonas de frenado, curvas y cuando el pavimento se encuentra mojado, siendo fundamental para la seguridad de los usuarios. Resaltan que dicha adherencia o resistencia al deslizamiento se va perdiendo en el tiempo por efecto del pulimiento de los agregados a causa del tránsito y que lo anterior, es precisamente lo que ha posicionado este indicador como uno de los integrantes en el índice de estado del pavimento.

Gaete *et al.* (1988) definieron que la resistencia al deslizamiento de un pavimento se puede establecer de acuerdo con la textura superficial y que esta a su vez está determinada por dos tipos de condiciones: microtextura y macrotextura. En la **Figura 6** se puede observar la distinción entre estas.

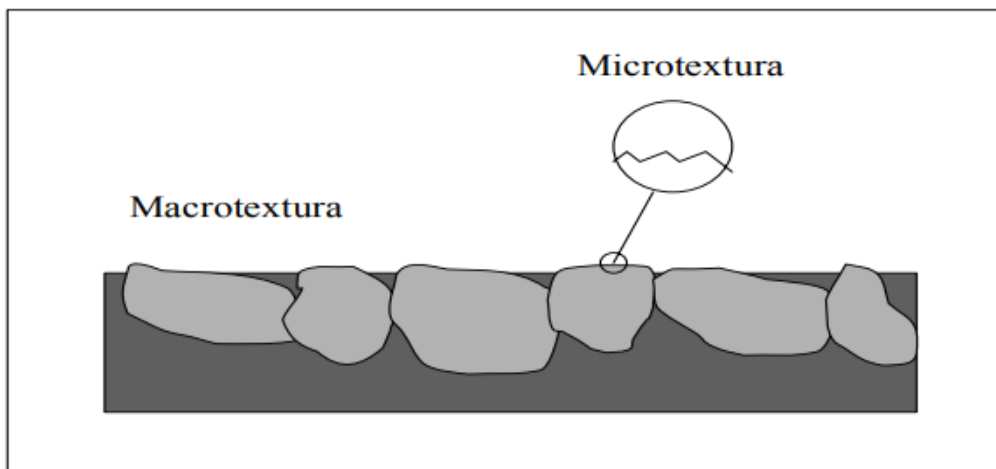


Figura 6. Representación gráfica de la textura superficial de un pavimento flexible. **Fuente:** (Roco, Fuentes & Valverde, 2014)

La macrotextura hace referencia a la textura superficial del pavimento, proveniente de la distribución del aglomerado de los agregados pétreos y a la variación de la elevación de las partículas sobre el plano base de la superficie del pavimento. Esta elevación o irregularidad determina el grado en que el neumático se adhiere a la superficie, cuando esta tiende a ser igual a la superficie base, se considera que tiene macrotextura lisa. Por otro lado, la microtextura da cuenta sobre la textura superficial propia de los agregados pétreos y se define en dos categorías: áspera y pulida. Gaete *et al.* (1988) resaltan que, en el caso de agregados pétreos de arenas y granitos con alto contenido de sílice, la resistencia al pulimiento será mayor y por lo tanto tendrán una microtextura áspera. En cambio, también mencionan que, si se trata de agregados con alto contenido de piedra caliza, el pulimiento será rápido bajo la acción del tráfico vehicular y la microtextura será pulida generando pérdidas considerables en la fricción que se genera entre los neumáticos y la carpeta asfáltica.

El agua es un factor con alta afectación en este indicador, pues cuando se generan fenómenos como el hidropneumático, la fricción entre el neumático y la carpeta de rodadura es prácticamente nula. La mayoría de las normas, en sus ensayos para determinar el Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (D), consideran una superficie húmeda, tal es el caso de la

norma de ensayo I.N.V. E-792-13 en la que además de considerar la capa de rodadura en dicha condición, se soporta en el uso del Péndulo Británico para determinar las características friccionantes de un neumático en el pavimento.

5.4 Grietas y Fisuras.

Este indicador hace referencia sobre el estado de la estructura de pavimento respecto a los deterioros que se generan en su mayoría por efectos de fatiga, es decir por la acción continua de las cargas impuestas por el tráfico. Se expresa en el porcentaje de área que abarca una grieta o fisura. Para este indicador es de suma importancia determinar la severidad de los deterioros que se encuentran, pues es lo que determina su evolución en el tiempo. En su mayoría, tienen como inicio grietas longitudinales o transversales y con el pasar del tiempo, junto con la acción del agua terminan en conjuntos de fisuras ramificadas, denominadas Piel de Cocodrilo, así como en Baches, **Figuras 7 y 8**. Este indicador puede dar indicios sobre varios aspectos de la estructura de pavimento. Primero, sobre la calidad de los materiales granulares pertenecientes a la estructura, pues si estos no corresponden en sus características mecánicas para soportar las cargas por el tráfico impuesto, van a tender a fatigarse y por lo tanto generar agrietamientos rápidamente. Segundo, este indicador, en ocasiones puede representar las repercusiones de los gradientes de temperatura a los que se ve sometida la carpeta asfáltica, aumentando su rigidez con el frío y disminuyendo con el calor. Si la rigidez aumenta, las capas asfálticas, encargadas de soportar en su fibra inferior las tracciones, pueden llegar al punto de comportarse como un material frágil, por lo que se causarían agrietamientos de manera temprana. Con el aumento de la temperatura y con la disminución consecuente de la rigidez, dichas mezclas se vuelven más susceptibles a deformarse de manera permanente, generando cambios en el estado de esfuerzos y con el tiempo agrietamientos con evoluciones desfavorables para las condiciones de seguridad y confort de los usuarios. Tercero, el indicador de grietas y fisuras también puede dar cuenta sobre la insuficiencia de los espesores de la

estructura de pavimento determinados en los diseños para soportar el nivel de tráfico de la vía y sopesar las condiciones de subrasantes con porcentajes de CBR bajos.

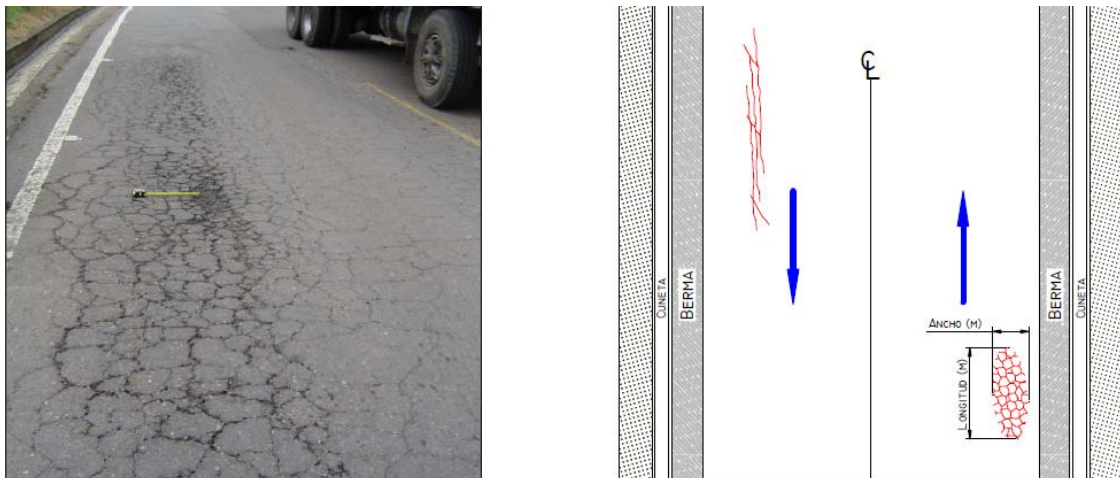


Figura 7. Falla en pavimento flexible de tipo “piel de cocodrilo”. **Fuente:** Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional.

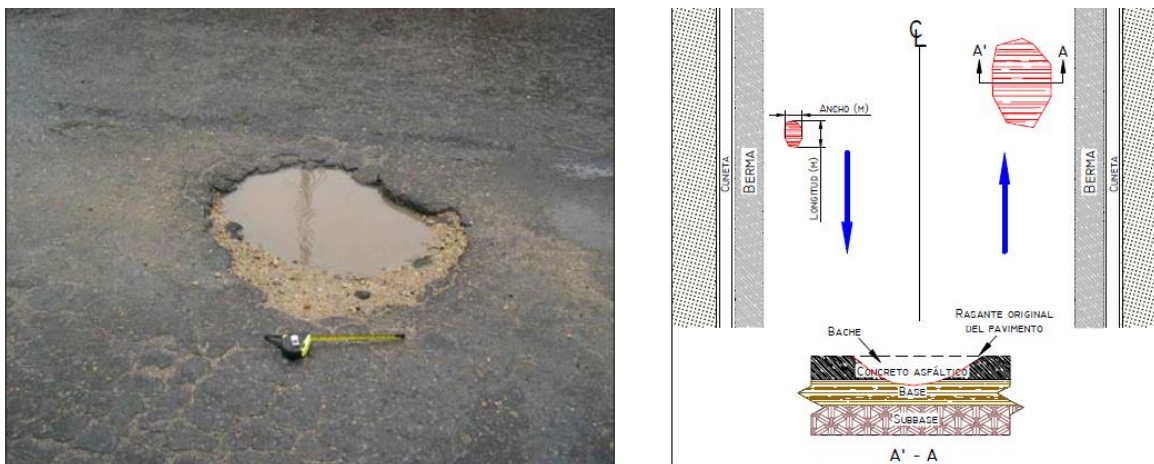


Figura 8. Falla en pavimento flexible de tipo “Bache”. **Fuente:** Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional.

5.5 Inspección Visual de Pavimentos Flexibles

Tal se cómo se mencionó en el “**Planteamiento y justificación**”, los pavimentos flexibles tienden a deteriorarse básicamente por la acción del clima y la variación del tráfico,

además de posibles dimensionamientos insuficientes en las capas que conforman la estructura de pavimentos, pues se transmiten en mayor medida las tensiones causadas por el tráfico a la subrasante.

La identificación de los daños en las estructuras de pavimentos por lo general se realiza de manera visual, situación que trae consigo un alto grado de incertidumbre pues depende de la interpretación que le den los profesionales a cargo y contando con la magnitud de los proyectos carreteros, es posible que se pasen por alto algunos tipos de deterioros, que en cierta medida pueden o no ser perceptibles para la condición visual humana. En Colombia, la Universidad Nacional en compañía del Instituto Nacional de Vías emitieron en el año 2006 un Manual para la inspección de pavimentos flexibles en el cual separan los tipos de deterioros en cinco categorías que representan las consecuencias de los fenómenos anteriormente mencionados como la fatiga y el exceso de deformación permanente, tal como se ilustra en la **Tabla 2**.

El manual define entonces para cada tipo de daño, sus posibles causas, severidades y evolución probable. De esta manera, con ayuda de este manual y con recorridos en campo, se puede obtener un veredicto acerca del estado del pavimento flexible en un determinado corredor. Especialmente para la Autopista Medellín-Bogotá, el concesionario Devimed, apoyado en herramientas tecnológicas tales como cámaras y software, ha implementado esta metodología para determinar el porcentaje de área afectada en la carpeta asfáltica.

5.6 Mediciones en Campo Para los Indicadores que Hacen Parte del Índice de Estado del Pavimento.

Devimed, dentro de sus planes de inversiones en tecnología para el desarrollo y estudio de los indicadores que hacen parte del Índice de Estado del pavimento, desde el año 2017 empezó a equipar un vehículo, tal como se muestra en la **Fotografía 1**, con herramientas que

permitieran entregar datos cuantitativos acerca de las condiciones del pavimento en cada uno de sus indicadores.

Tabla 2. Clasificación de deterioros en pavimentos flexibles. **Fuente:** Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional.

Tipos de daños según el Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional		
Categoría	Tipo de daño	Notación
Fisuras	Fisuras longitudinales y transversales	(FL, FT)
	Fisuras en juntas de construcción	(FCL, FCT)
	Fisura por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto	(FJL, FJT)
	Fisura en media luna	(FML)
	Fisuras de borde	(FBD)
	Fisuras en bloque	(FB)
	Piel de cocodrilo	(PC)
	Fisuración por deslizamiento de capas	(FDC)
	Fisuración incipiente	(FIN)
Deformaciones	Ondulación	(OND)
	Abultamiento	(AB)
	Hundimiento	(HUN)
	Ahuellamiento	(AHU)
Pérdida de las capas de la estructura	Descascaramiento	(DC)
	Baches	(BCH)
	Parche	(PCH)
Daños superficiales	Desgaste superficial	(DSU)
	Pérdida de agregado	(PA)

	Pulimiento del agregado	(PU)
	Cabezas duras	(CD)
	Exudación	(EX)
	Surcos	(SU)
Otros daños	Corrimiento vertical de la berma	(CVB)
	Separación de la berma	(SB)
	Afloramiento de finos	(AFI)
	Afloramiento de agua	(AFA)

Todos los parámetros del pavimento que componen el índice de estado tienen metodologías de medición particulares y estandarizadas por normas y manuales. Para el caso de Devimed, estas metodologías de medición son llevadas a cabo mediante el empleo de equipos de alto rendimiento y precisión, pues al tratarse de una red vial de más de 100km concesionados es conveniente contar con este tipo de herramientas. Contractualmente, la actividad de revisión de indicadores del pavimento por parte de la interventoría a Devimed se realiza 2 veces al año (semestral), entregando un informe que muestra los valores medidos de cada parámetro y expone los sectores en incumplimiento que requieren algún tipo de intervención.



Fotografía 1. Vehículo equipado por Devimed para la medición de indicadores. **Fuente:** Propia

Partiendo de las mediciones entregadas por la interventoría, Devimed ha acumulado una cantidad de información valiosa de su infraestructura concesionada, que permite estudiar la eficiencia de las intervenciones en la calificación del estado del pavimento y hacer proyecciones del comportamiento de este a las condiciones que se desee estudiar. Generando así una necesidad de mantener un estándar alto en el manejo de los datos, en la manera como se recolecta la información y como se controlan las mediciones en campo. Naciendo a su vez la necesidad de medir propiamente los indicadores ligados a al estado del pavimento, como revisión a las mediciones hechas por la interventoría, buscando una mayor confiabilidad en la medición y con el argumento principal de dar una respuesta oportuna, basada en razonamientos técnicos a los posibles incumplimientos que se reportan.

Los indicadores para los cuales Devimed cuenta con equipos que permiten su medición son: Índice de rugosidad internacional (IRI), levantamiento daños superficiales y estado de bermas, estos comprenden un 60% del cálculo del índice de estado y son los que para el caso de Devimed presentan un mayor grado de incumplimientos, lo que hace necesario corroborar los datos con los de la interventoría para tener un grado de certeza mayor respecto a los sectores a intervenir. Por otro lado, el indicador de fricción se revisa de una manera diferente a la metodología usada por la interventoría donde miden el coeficiente de resistencia al deslizamiento, para el cual la concesión Devimed cumple en aproximadamente el 100% de los sectores evaluados en los rangos exigidos. En Devimed se mide entonces, la macrotextura del pavimento, aunque es un parámetro que contractualmente no exige cumplimiento, es más riguroso en términos de seguridad vial, ya que niveles de macrotextura adecuados permiten un drenaje óptimo de la vía, lo cual expone el comportamiento de la superficie del pavimento para las condiciones más desfavorables de frenado de un vehículo en presencia de agua. En cuanto al ahuellamiento, Devimed no realiza mediciones directas sobre la vía a causa de que presentan cumplimiento en casi toda la concesión, se toman como referencia las mediciones de interventoría y en el levantamiento de daños realizan inspección visual de lugares con un

posible ahuellamiento de severidad alta, revisando con regla de tres metros en sitios puntuales los valores de este indicador.

5.6.1 Medición del Indicador Grietas y Fisuras

Tal como se puede observar en la **Fotografía 2**, el vehículo cuenta con un par de cámaras de alta resolución, ubicadas de manera tal que se puedan capturar los daños en la carpeta de rodadura desde diferentes ángulos, así como se muestra en las **Fotografías 3 y 4**. La captura de imágenes se hace de manera programada cada 7m, a una velocidad de 30km/h, en cada una de las dos calzadas que comprenden el corredor objeto de estudio. Mediante el apoyo de herramientas computacionales al interior del vehículo, es posible calibrar las condiciones de exposición, contraste y saturación de las imágenes, esto con el fin de mitigar posibles dificultades que se puedan presentar por las condiciones del clima, en especial las sombras que generan algunos elementos aledaños a la carretera tales como árboles o edificios, **Figura 9**.



Fotografía 2. Cámaras de alta resolución instaladas en el vehículo de medición. **Fuente:** Propia



Fotografía 3. Registro de cámara derecha. **Fuente:** Propia



Fotografía 4. Registro de cámara izquierda. **Fuente:** Propia

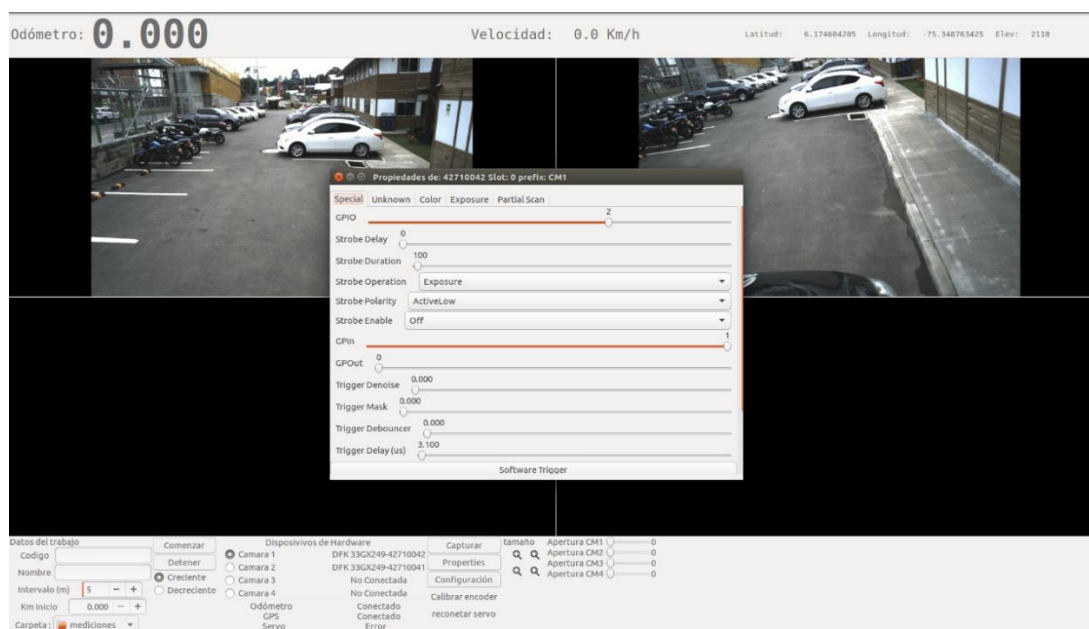


Figura 9. Calibración de parámetros fotográficos. **Fuente:** Propia.

Este procedimiento, anteriormente descrito genera en cada medición más de 14.500 imágenes, a las cuales se les debe realizar un postproceso que consiste en el análisis de los daños encontrados. Este análisis se realiza mediante el apoyo de un programa computacional desarrollado por la empresa (I³) el cual permite adaptarse a las condiciones del corredor objeto de medición mediante el ingreso de datos de entrada tales como los pertenecientes a la sección vial, **Figura 10**. Una vez se ingresan los datos descritos, se procede a cargar cada una de las imágenes y delimitar los daños encontrados, bien sea en área o en longitud, dependiendo de su envergadura. Una vez se marcan los daños, se clasifican, como se mencionó anteriormente de acuerdo con su tipología y severidad según el Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional, **Figura 11**.

Seccion Transversal de Muestra

Todas las dimensiones estan e metros

Berma Izq	Ancho de Carril	Berma Derecha
1.000	3.7	1.000
Altura de Berma Izq	Ancho linea central	Ancho linea lateral
0.000	0.120	0.120
		Altura de Berma Der
		0.000

Aceptar Cancelar

Figura 10. Definición de la sección transversal a medir. **Fuente:** propia

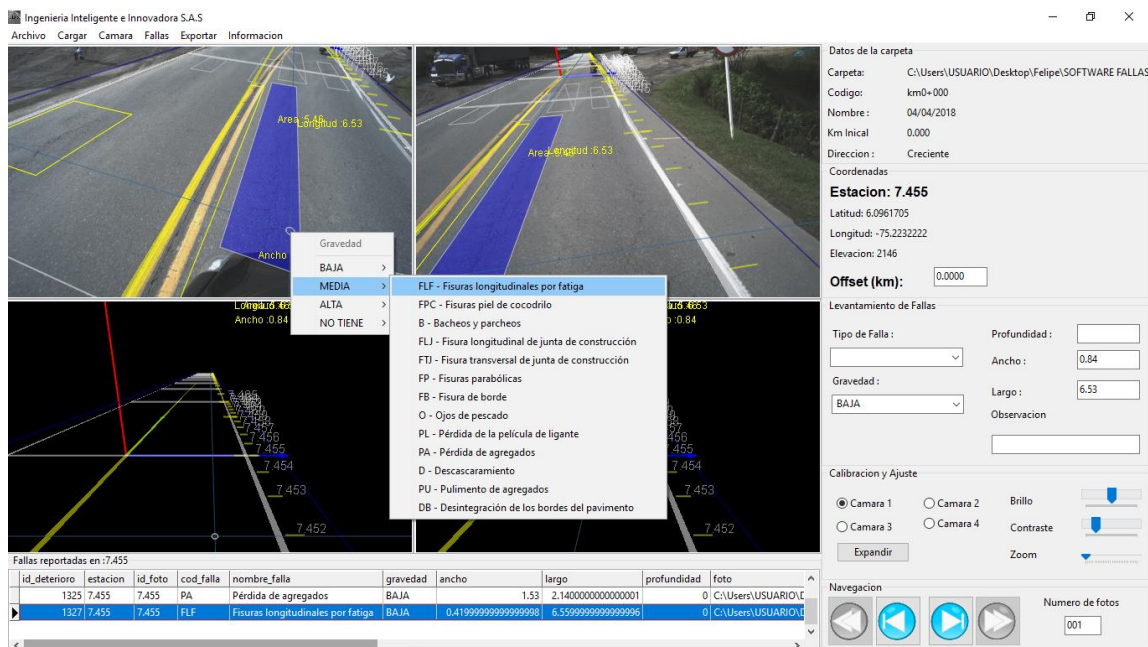


Figura 11. Proceso de demarcación y clasificación de deterioros cada 7m. **Fuente:** propia

Finalmente, el programa utilizado, almacena en una base de datos, la información sobre los abscisados en los que se identificaron los daños, junto con su tipología y severidad. Esta información es el insumo que servirá para realizar las series de tiempo acerca de las condiciones que se encuentran en cada medición a lo largo del tiempo.

Es importante resaltar que esta metodología de medición debe ser correctamente ejecutada con el fin de obtener datos precisos. Para realizarla adecuadamente es necesario contar con un odómetro y un GPS que permitan que durante el recorrido en el que se capturan las imágenes, se verifique constantemente que el abscisado de la carretera coincida con el que se muestra en la herramienta computacional, pues se correría el riesgo de que dichos datos se almacenen en la base datos en abscisas que no corresponden, **Fotografías 5 y 6**. Además, es importante que el proceso de análisis sea llevado a cabo por un profesional que sepa determinar a partir de imágenes, la severidad de los daños que se presentan, pues de esto dependerá el cálculo del área afectada.



Fotografía 5. Odómetro instalado en el vehículo de medición. **Fuente:** propia



Fotografía 6. GPS instalado en el vehículo de medición. **Fuente:** Propia

5.6.2 Medición del Indicador IRI

Las mediciones para este indicador son realizadas empleando un perfilómetro láser Clase I de Dynatest, modelo 5051 Mark IV RSP, el cual permite registrar las elevaciones del perfil longitudinal, en la **Fotografía 7**, se observa el equipo utilizado.

La medición del perfil longitudinal se basa en el método de “South Dakota”, un acelerómetro que se utiliza para obtener el movimiento vertical del cuerpo del vehículo y un sensor láser que se utiliza para medir el desplazamiento entre la carrocería del vehículo y el pavimento. El perfil de la superficie del pavimento se obtiene sumando el movimiento vertical del vehículo con la distancia al pavimento. El Índice de Regularidad Superficial es calculado de acuerdo con las especificaciones establecidas por el Banco Mundial. El perfil longitudinal medido, cumple con la precisión y el sesgo especificado para Clase I, de acuerdo con la norma ASTM E-950. Además, satisface lo establecido en el método TxDOT TEX- 10001-S.



Fotografía 7. Perfilómetro instalado en el vehículo de medición. **Fuente:** Propia

Previo a la medición, se revisa el estado de los láseres, sensores y demás componentes del perfilómetro, como se puede apreciar en la **Figura 12**.

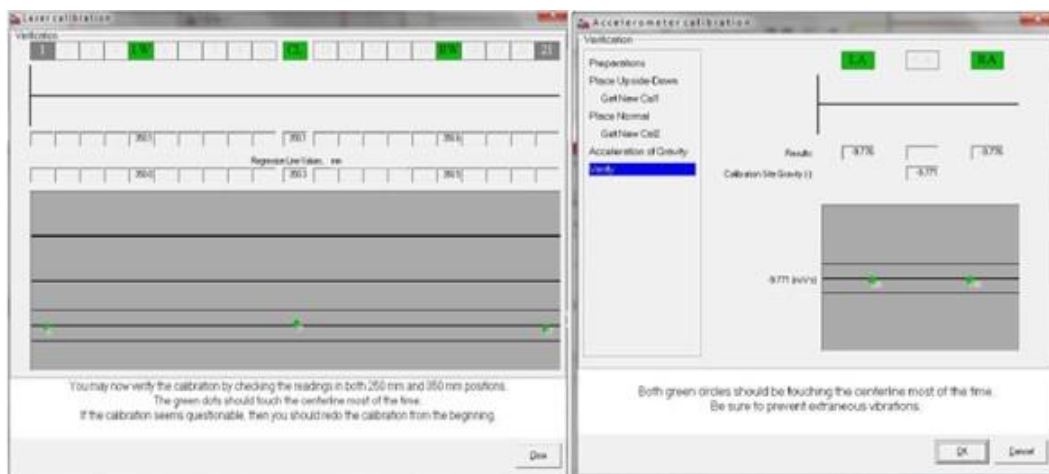


Figura 12. Calibración de parámetros para la medición del perfil longitudinal. **Fuente:** Propia

Finalmente, se realiza la calibración del odómetro “Distance Measurement Instrument (DMI)” para asegurar que la distancia viajada durante la recolección de datos sea precisa; la forma de realizar esta calibración es mediante un factor que relaciona la distancia efectiva con el conteo de pulsos del DMI. De manera similar, en la **Figura 13**, se presenta la configuración empleada en la toma de datos, donde se destaca lo siguiente:

- La lectura del perfil de la vía se almacena cada 100 milímetros.
- La velocidad del vehículo y el IRI se almacenaron cada 10 metros.
- Los datos de GPS se almacenaron cada 10 metros.



Figura 13. Calibración de parámetros para la medición del perfil longitudinal. **Fuente:** Propia

El propósito de los ensayos realizados con el perfilómetro (RSP), es medir el perfil real de la carretera para producir mediante ello, índices de calidad, tal como lo es el IRI. Este índice finalmente sirve como herramienta para la toma de decisiones respecto al mantenimiento de la infraestructura vial.

Para la obtención del Índice de Regularidad Internacional se realizó la medición mediante perfilómetro laser (RSP MK IV) el cual genera datos de perfil y de IRI para la huella derecha e izquierda de cada uno de los carriles que componen el corredor objeto de estudio, en la **Figura 14** se muestra el orden de la medición.

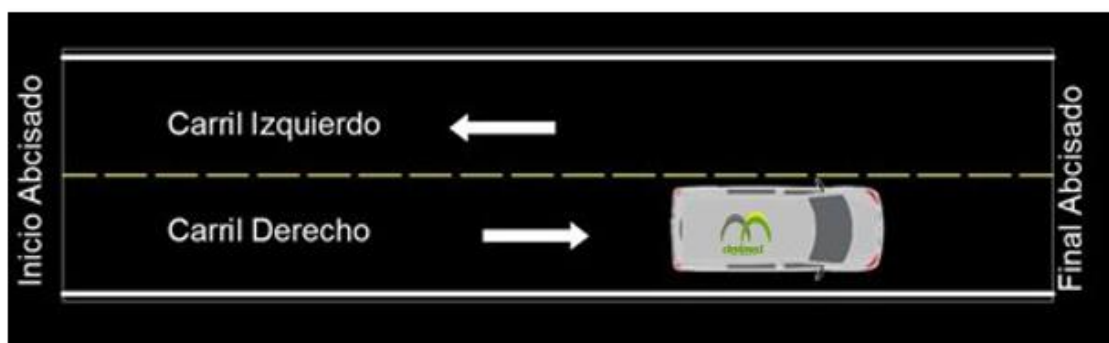


Figura 14. Orden de medición del IRI en doble calzada. **Fuente:** Propia

Es muy importante resaltar la necesidad de descartar todas las singularidades que puedan representar un sesgo en las mediciones; entendiendo como singularidad, cualquier alteración del perfil longitudinal de la vía, que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en el que se encuentra, como lo son los puentes, las juntas que se encuentran los tableros de estos, las tapas de las alcantarillas, los resaltos, los cruces de las calles y cualquier otro elemento que altere el perfil de la vía.

5.6.3 Medición del Indicador Ahuellamiento

Este parámetro de calificación hace referencia a los hundimientos que se presentan en la superficie de rodadura, ya sean puntuales o a lo largo de algunos tramos de vía, debido a la canalización del tránsito, sobrecargas de los vehículos, deficiencias en la estructura, acabado de la carpeta asfáltica o inestabilidad de la banca, los cuales terminan formando huellas apreciables sobre la superficie del pavimento, ocasionando incomodidad y en algunos casos, peligro para los usuarios de la vía.

Es muy importante resaltar que, para este indicador, Devimed S.A no cuenta con tecnología que le permita recoger información acerca del estado de este indicador. Sin embargo, para el ahuellamiento se toma la información de las mediciones realizadas por la interventoría de Devimed, (AIM Ingenieros Civiles S.A.S). Esta interventoría cuenta con un perfilómetro laser RSP Mark III que se ve en la **Fotografía 8**, el cual registra las mediciones de manera continua en todos los tramos que conforman la vía, para las dos rodadas o huellas de cada carril y por intervalos de medición de 50m.

Un RSP es un sistema modular donde se monta una serie de láseres y acelerómetros capaces de medir a intervalos de mínimo 5cm, tanto el perfil transversal como el perfil longitudinal de una vía. Dependiendo de la configuración del equipo y la cantidad de láseres viene su denominación: Donde X, es el número de láseres y Y, el número de acelerómetros. Para este caso, el perfilómetro de la interventoría cuenta con cinco láseres y dos acelerómetros

por lo tanto es un RSP L5.2. El perfil transversal y la profundidad de ahuellamiento se basan en un mínimo de 5 láseres y contractualmente su medición se realiza cada seis meses.



Fotografía 8. Perfilómetro de la interventoría para medición de ahuellamientos. Fuente: **Propia**

5.6.4 Medición del Indicador Resistencia al Deslizamiento

Al igual que en el indicador de Ahuellamiento, para el indicador de Resistencia al Deslizamiento, se toman los datos medidos por la interventoría. El coeficiente de fricción lo obtienen por medio de un Grip Tester, el cual es un equipo de medida que clasifica dentro del grupo de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento fijo; este equipo va remolcado por un vehículo y evalúa el coeficiente de fricción por medio de la medida simultánea entre la fuerza horizontal de rozamiento que se genera entre el neumático y la superficie de rodadura al desplazarse el uno sobre el otro y la fuerza normal ejercida sobre la superficie del apoyo por una rueda lisa de 10" de diámetro, que se desplaza a una velocidad 14.5% menos que la de desplazamiento del vehículo. La rueda frenada y el peso del GRIP TESTER causan pequeños movimientos vibratorios en el eje secundario, los cuales son evaluados por dos pares de medidores de esfuerzos montados en sus caras vertical y

horizontal. Las señales provenientes de estos medidores son interpretadas por la unidad procesadora de señales, la cual está montada en la parte superior del Grip Tester, y esta le transmite la información a un computador que se encuentra en la cabina del vehículo, tal como se ilustra en las **Figuras 15 y 16**.

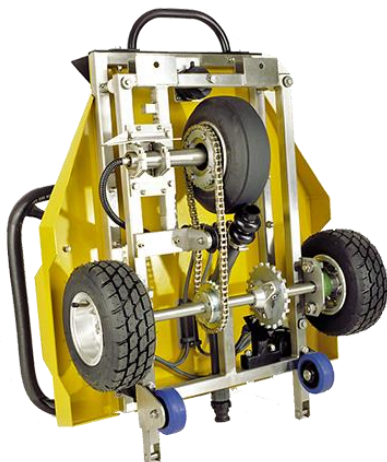


Figura 15. Grip-Tester implementado para la medición del indicador correspondiente a fricción. **Fuente:** Propia



Figura 16. Implementación del Grip-Tester en el vehículo de medición. **Fuente:** Propia

5.7 Descripción del Corredor Objeto de Estudio.

La autopista Medellín-Bogotá, en los 50km de estudio tiene como lugar de inicio el municipio de Bello, específicamente en el sector conocido como “Zamora”, **Fotografía 9** y finaliza en el municipio de El Santuario, **Fotografía 10**. Ambos municipios pertenecientes al

departamento de Antioquia. En este trayecto la autopista cuenta con dos calzadas, cada una con dos carriles de 3.65m, berma interna variable entre 0.15m y 0.20m, berma externa de 0.6m y con obras de drenaje en la mayoría de su longitud correspondientes a cunetas, cabezotes y tuberías transversales que permiten la evacuación de las aguas lluvias a los lugares de disposición. El corredor cuenta con un separador central de ancho variable pero nunca menor a 0.8m, en este lugar se encuentran instalados los postes de alumbrado público que iluminan los 50km. Desde el km 0+000 hasta el km 50+000, por la calzada derecha cuenta con dos túneles, el primero ubicado en el kilómetro 6, tal como se muestra en la **Fotografía 11**, a la altura del municipio de Copacabana, Antioquia, con una longitud de 200m y el segundo se encuentra en el kilómetro 13, **Fotografía 12**, con una longitud de 180m. Por la calzada izquierda, solo se encuentra el túnel gemelo al anteriormente mencionado en el kilómetro 13 de la calzada derecha.



Fotografía 9. Punto de inicio de la Autopista Medellín Bogotá, Municipio de Bello, sector Zamora. **Fuente:** Propia



Fotografía 10. Punto de finalización del corredor objeto de estudio en el municipio de El Santuario. **Fuente:**

Propia



Fotografía 11. Túnel del kilómetro 6. **Fuente:** *Propia*



Fotografía 12. Túneles del kilómetro 13. **Fuente:** Propia

El tramo de estudio, además de que pertenece a una zona altamente industrial, también es la vía de acceso principal a los 23 municipios pertenecientes a la subregión del Oriente Antioqueño, sobre todo para las mercancías que vienen del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y de otros departamentos al sur de Colombia, **Figura 17 y 18**. Lo anterior representa que gran parte de los vehículos que transitan por este corredor son de carga pesada, generando altas solicitudes a la estructura de pavimento flexible que conforma la totalidad del corredor. Por otro lado, el corredor objeto de estudio de la Autopista Medellín-Bogotá, además de los municipios de inicio y fin previamente mencionados, también atraviesa las jurisdicciones de los siguientes municipios antioqueños: (Copacabana, Guarne, Rionegro, San Vicente, Santuario y Marinilla), **Figura 19**. En estos municipios se presentan topografías escarpadas, por lo que el corredor, aparte de los mencionados túneles, también cuenta con 15 puentes vehiculares.

Para los municipios en los que el corredor vial atraviesa sus respectivas jurisdicciones, se investigó en el Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia los datos correspondientes a la *Temperatura Media Anual* con el fin de determinar la variación

de esta y dar una idea acerca de los gradientes de temperatura a los que se somete la carpeta asfáltica en estos sectores, pues junto con la categoría de tránsito determinan el deterioro de la estructura de pavimento, ver **Tabla 3 y 4**.

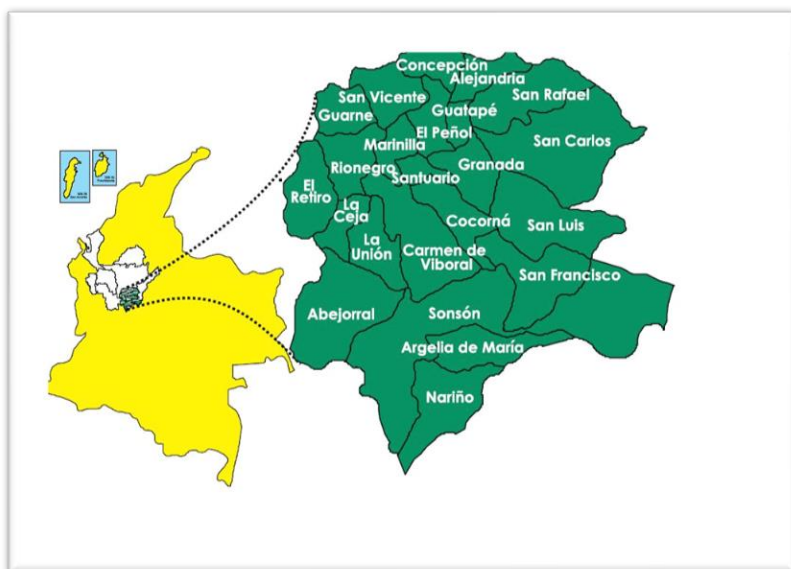


Figura 17. Ubicación del Oriente de Antioqueño y sus municipios. **Fuente:** *Orienteseperiodismodeopinión.com*



Figura 18. Ubicación Área Metropolitana y sus municipios. **Fuente:** *es.wikipedia.org*

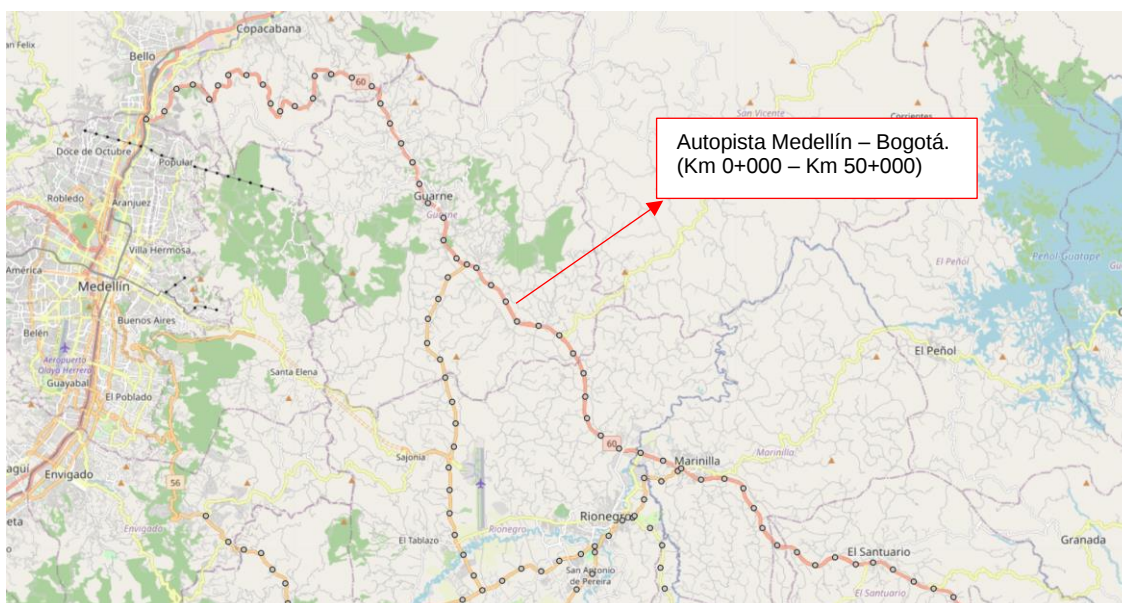


Figura 19. Trazado en planta del corredor objeto de estudio. **Fuente:** Propia

Tabla 3. Temperatura promedio anual en los municipios que hacen parte del corredor objeto de estudio. **Fuente:** Elaboración propia basada en datos del Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia

Municipios	Temperatura Mínima (C°)	Temperatura Máxima (C°)	Temperatura Promedio Anual (C°)
Bello	10.25	21.03	15.97
Copacabana	13.15	21.14	17.68
Girardota	12.88	21.47	18
Guarne	13.15	16.75	15.46
San Vicente Ferrer	13.88	18.03	16.04
Rionegro	13.02	16.86	16.26
Marinilla	14.41	18.01	16.37
El Santuario	14.15	20	15.92
Promedio del Corredor	13.11	19.16	16.46

Según Guerra (2014), los pavimentos flexibles son altamente sensibles a gradientes térmicos combinados con aplicaciones de cargas, siendo los factores más importantes en las fallas de la carpeta asfáltica. Tanto las temperaturas elevadas como las temperaturas bajas afectan a los materiales asfálticos de la carpeta de rodadura, reduciendo la estabilidad y el

módulo de rigidez. Tal como se observa en la **Tabla 4**, la temperatura promedio anual del corredor (TPA) es equivalente a 16.46 °C y el gradiente respecto a esta temperatura y la mínima promedio del corredor, fue mayor a tres grados centígrados, por lo que se podría decir que la temperatura promedio anual está más distante de la mínima promedio del corredor. Esta diferencia, en las oportunidades que se presente, generaría que la mezcla asfáltica se rigidice y por lo tanto se vuelva más frágil a la hora de soportar las tracciones en su fibra inferior, trayendo como resultado un aumento en la probabilidad de falla por fatiga, sumado al tráfico pesado y continuo que se impone sobre dicha mezcla.

Tabla 4. Gradientes de temperatura que se experimentan en el corredor respecto al promedio anual. **Fuente:**

Elaboración propia basada en datos del Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia

TPA Promedio Corredor	16.46
Gradiente TPA - Temperatura máxima promedio del corredor (°C)	2.70
Gradiente TPA - Temperatura mínima promedio del corredor (°C)	3.35

Guerra (2014), también resalta que la humedad es otra variable fundamental que afecta las estructuras de pavimento flexible pues cuando se introducen partículas de agua en las capas de rodadura, se produce un factor erosivo que afecta de 20 a 50 veces el deterioro de las capas asfálticas. Según el mismo autor, el agua afecta la resistencia de los materiales asfálticos a través de la succión o presión de poros, presentando cambios de hasta 5 veces en el módulo resiliente en estado seco. Para el caso del corredor de estudio se investigaron las precipitaciones promedio anuales para cada municipio por el que atraviesan los 50km de la Autopista-Medellín-Bogotá, con el fin de tener una idea acerca de las condiciones de humedad a las que está sometida la estructura de pavimento flexible, **Tabla 5**.

A partir de la información investigada, se podría deducir que en promedio el corredor experimenta considerables precipitaciones anuales y que esta situación aumenta las probabilidades de deterioro. Adicionalmente, en la introducción del presente trabajo, se enunciaron las características del corredor acerca del tránsito y se determinó que, según la clasificación de la **Tabla 1**, el TPD sobrepasa el límite de 10.000 vehículos/día, por lo que se clasificó como un corredor con categoría de tránsito T6 que corresponde a la categoría con mayor flujo vehicular considerada por el Instituto Nacional de Vías. Considerando las características de temperatura, precipitación y tránsito del corredor, se concluye que la estructura de pavimento objeto de estudio, es considerablemente susceptible a deterioros.

Tabla 5. Valores de precipitación promedio anual para los municipios que pertenecen al corredor objeto de estudio. **Fuente:** *Elaboración propia basada en datos del Departamento Administrativo de Planeación de la Gobernación de Antioquia*

Municipios	Precipitación promedio anual (mm/año)
Bello	1702
Copacabana	1831
Girardota	1942
Guarne	2499
San Vicente Ferrer	2199
Rionegro	2168
Marinilla	2167
El Santuario	2638
Promedio del Corredor (mm/año)	2143.25

5.8 Descripción del Contrato de Concesión.

El contrato de concesión No. 0275 de 1996, tiene como objeto: “Realizar por el sistema de concesión los estudios y diseños definitivos, las obras de rehabilitación y construcción, la operación y el mantenimiento del proyecto (Desarrollo vial del oriente de Medellín, Valle de Rionegro y conexión a Puerto Triunfo) en el departamento de Antioquia. Este contrato se les adjudicó el 16 de mayo de 1996 a las firmas Procopal S.A, Conconcreto S.A, Equipo Universal & CIA, Castro Tscherassi y Mario Huertas Cotes. Además de la conservación de la malla vial preexistente en ese entonces en el oriente antioqueño, en el alcance se incluye la rehabilitación, operación y mantenimiento de la carretera Medellín- Guarne-Santuario. En dicho alcance, se abarca la construcción de la segunda calzada en el tramo previamente mencionado, considerando túneles, intersecciones a desnivel y puentes. Respecto al mantenimiento, el contrato enuncia que el concesionario deberá sostener un nivel de servicio e *Índice de Estado del pavimento mayor a cuatro (4)*, con revisiones cada 4 meses y la verificación de su cumplimiento, será por parte de una interventoría. Específicamente para el estado del pavimento, en el contrato se resalta que, si el concesionario incumple con el índice de estado mínimo mencionado, le serán impuestas multas proporcionales a la reducción del valor del Índice de Estado, tal como se ilustra en la **Tabla 6**

Tabla 6. Valores de multas por incumplimiento en índice de estado del pavimento. **Fuente:** Contrato de concesión 0275 de 1996. ANI.gov.co

Valor Índice de Estado	Porcentaje del recaudo en los cuatro meses evaluados objeto de multa
3.5-4.0	2%
3.0-3.5	3%
2.5-3.0	4%
Menor a 2.5	6%

5.8.1 Definición y Determinación del Índice de Estado Según el Contrato de Concesión

El índice de estado del pavimento es un valor de calificación que resume mediante una ponderación de los parámetros superficiales más relevantes de una estructura de pavimento cual es el estado de servicialidad, funcionalidad, seguridad y comodidad para los usuarios de la vía, basándose en mediciones cuantitativas realizadas a los parámetros que la componen. Para el caso de Devimed este se compone de regularidad, ahuellamiento, fricción, daños superficiales y estado de bermas. Este índice de estado varía en su calificación en un rango de valores que va de 0 (malo) a 5 (Muy bueno). El índice de estado se evalúa con el objetivo principal de programar las actividades de mantenimiento necesarias para llevar la vía a un nivel de servicio de operación óptimo, otorgando los datos necesarios para la toma de decisiones.

Según el Anexo VIII del contrato de concesión número 0275 de 1996, el índice de estado se determina de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Se debe dividir la carretera en tramos mayores a 30km y estos a su vez en sectores homogéneos.
2. Evaluar los elementos de acuerdo con la sectorización realizada, asignando calificaciones de cero (0) a cinco (5) según lo estipulado en las tablas de calificación de los elementos.
3. Determinar la calificación de cada elemento para el tramo de carretera, el cual corresponde al promedio ponderado de las calificaciones de los sectores.
4. Determinar el índice de estado para el tramo de carretera, el cual corresponde a la sumatoria de los productos de calificación de cada elemento para el tramo por su respectivo Factor de Influencia, que corresponde al factor de ponderación para cada indicador, tal como se ilustra en la **Tabla 7**

5. El Índice de Estado para la carretera será el promedio ponderado de los Índices de Estado para los diferentes tramos.

5.8.2 Determinación de las Calificaciones.

El anexo número 4 del contrato de concesión se establece que las mediciones se deben realizar para determinar el estado de los indicadores y que estas a su vez, se deberán hacer solamente durante el día y cuando exista luz natural, con el fin apreciar debidamente el estado de la carretera.

5.8.2.1 Regularidad (IRI). Este indicador se mide mediante el IRI (Índice de Regularidad Internacional) y la unidad de medida es (m/km) o (mm/m) que básicamente hace referencia a la relación entre una longitud de deformación acumulada y la distancia que se recorrió para acumular dicha deformación. En la **Tabla 8** se establecen sus rangos de calificación de acuerdo con los resultados de las mediciones en campo. El contrato establece que la herramienta de medición para este indicador es el rugosímetro, es decir que es esta la herramienta que utilizará la interventoría para determinar el estado del indicador. Sin embargo, el Rugosímetro con el paso del tiempo, en varios proyectos viales sujetos a supervisión del mantenimiento de carreteras, ha venido siendo reemplazado por perfilómetros, los cuales no solo tienen mayor precisión en los resultados, sino que las mediciones se pueden realizar de manera más rápida; puesto que con los láseres que posee, va determinando el perfil de la superficie del pavimento y este a su vez realiza los cálculos para entregar el IRI de manera inmediata, cuestión que es sumamente interesante y conveniente en proyectos viales con grandes longitudes.

Se especifica además en el contrato que en caso de encontrar deterioros que se reflejen en calificaciones menores de 4.0 en el índice de estado, para un sector determinado, el concesionario tendrá un plazo de dos meses como máximo a partir del reporte del interventor, para restablecer la calificación.

Tabla 7. Factor de influencia en el índice de estado del pavimento. **Fuente:** Contrato de concesión 0275 de 1996.

ANI.gov.co

Indicador	Factor de influencia
Rugosidad	0.35
Ahuellamientos	0.20
Grietas y fisuras	0.25
Resistencia al deslizamiento	0.2

5.8.2.2 Grietas y fisuras. El proceso para la evaluación de este indicador se realiza mediante la comparación visual de las fisuras o deterioros existentes en la calzada objeto de estudio y las presentadas en un catálogo de fotografías de fallas entregado como anexo al contrato. A partir de esta comparación, es posible calcular el coeficiente “F”, pues el cálculo de este es igual a la multiplicación del área de la falla encontrada por su respectivo factor de daño, que se definen desde el 2 al 10. Siendo (2) una falla longitudinal o transversal sin ramificaciones, es decir de baja severidad y (10) cuando ya se presenta un bache o afectación directa a las capas inferiores de la estructura de pavimento. El objetivo del coeficiente F además de determinar la cantidad de área afectada, también busca establecer que porcentaje del área total está afectada, tal como lo ilustra la **Ecuación 1**.

Una vez se calcula el coeficiente F, es posible determinar una calificación que permita dar un veredicto acerca del estado del pavimento respecto al indicador de grietas y figuras, tal como se ilustra en la **Tabla 8**. Las áreas fisuradas con calificaciones menores de tres (3), deberán ser reparadas por el concesionario en un periodo menor a un (1) mes de haber

informado el interventor. En caso de presentarse desprendimientos del concreto asfáltico o baches cuya profundidad supere los 3cm, estos deberán ser reparados tan pronto como se informen.

Tabla 8. Tabla de calificaciones para cada uno de los indicadores que componen el índice de estado. **Fuente:** Contrato de concesión 0275 de 1996. ANI.gov.co

Tabla de calificaciones					
		Rango de calificación			
Elemento	Unidad de calificación	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
Rugosidad	IRI	2 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	6.5 - 12
Ahuellamientos	mm	0 - 25	25- 40	40 - 60	60 - 100
Grietas y fisuras	Coeficiente "F"	0 - 6	6 -8.	8 - 9.	9 - 10.
Resistencia al deslizamiento	CRD	100 - 45	45 - 0.0		

$$\text{Coeficiente } F = \frac{\sum \text{Área de la falla} * F}{\text{Área total evaluada}}, \quad \text{siendo } F \{2,4,6,8,10\}$$

Ecuación 1. Fórmula para determinar el Coeficiente F. **Fuente:** Elaboración propia basada en el Anexo 4 del contrato de concesión 0275 de 1996. ANI.gov.co

5.8.2.3 Ahuellamientos. La medición de la profundidad máxima de ahuellamientos y deformaciones se efectúan con la regla de 3m de longitud, colocada perpendicularmente al eje de la vía. Esta revisión se hace por carril, enfocándose en los lugares por donde se presume que hay más probabilidad de que transiten los vehículos, es decir, las denominadas “huellas”. Se establece que para determinar la calificación de este indicador se debe multiplicar cada vez que se presente el daño, la longitud en la que se presenta con la profundidad máxima del deterioro medida en dicha longitud. Adicionalmente, para la calificación de este indicador, es

necesario realizar el cociente entre la sumatoria de los deterioros encontrados por su longitud afectada y la longitud total evaluada. Tal como lo ilustra la *Ecuación 2*

El contrato no establece específicamente tiempos en los que se deban reparar este tipo de deterioros, sin embargo, este hace parte del Índice de Estado por lo que cualquier afectación en ahuellamientos puede inferir directamente y llevar este índice a valores bajos que terminen traducándose en aumentos de las probabilidades de accidentalidad y multas para el concesionario.

5.8.2.4 Resistencia al Deslizamiento. Para la medición de este indicador, el contrato establece que se deben dividir los tramos de carretera en sectores de 5km y que es precisamente a estos sectores a los que se les llevarán a cabo las mediciones de resistencia al deslizamiento cada 200m, utilizando el péndulo del T.R.R.L (Transport and Road Research Laboratory) y siguiendo las normas y especificaciones establecidas especialmente en la norma ASTM E303. Este procedimiento con el tiempo, de manera similar al IRI, se ha venido cambiando por diferentes tecnologías que permiten una medida eficiente en campo. Para la resistencia al deslizamiento, como se mencionó anteriormente, la herramienta que se ha utilizado recientemente es el Grip-Tester

Se establece en el contrato que la calificación en cada sector corresponderá al promedio de los ensayos realizados y que en caso de presentarse una calificación por debajo de cuarenta y cinco (45) para este indicador, el concesionario tendrá a lo sumo 2 meses para mejorar la condición de resistencia al deslizamiento en la longitud afectada. Los rangos de calificación de este indicador también pueden ser apreciados en la **Tabla 8**.

$$\text{Profundidad máxima de ahuellamientos} = \frac{\sum \text{Profundidad máxima de cada deterioro} * \text{longitud}}{\text{Longitud total evaluada}}$$

Ecuación 2. Fórmula para determinar la profundidad máxima de ahuellamientos. **Fuente:** *Elaboración propia basada en el Anexo 4 del contrato de concesión 0275 de 1996. ANI.gov.co*

5.8.3 Cálculo y Periodicidad en la Evaluación del Índice de Estado.

Para calcular el Índice de Estado, se debe realizar la suma de los resultados provenientes de la multiplicación de la calificación que se obtuvo en cada indicador por su factor de influencia, **Tabla 7**, así como se expone en la **Ecuación 3**. El contrato enuncia, además, que el Índice de Estado se deberá evaluar en una primera instancia con la puesta en operación del proyecto y posteriormente con una frecuencia de seis (6) meses.

$$\text{Índice de estado (IE)} = \sum \text{Calificación}_{\text{indicador}} * \text{Factor de influencia}_{\text{indicador}}$$

Ecuación 3. Fórmula para determinar el valor del Índice de Estado. **Fuente:** *Elaboración propia basada en el Anexo 4 del contrato de concesión 0275 de 1996. ANI.gov.co*

5.9 Modelos de Deterioro en Pavimentos Flexibles.

Según Solminihac *et al.* (2019), los modelos de deterioro son expresiones matemáticas que predicen la evolución del estado del pavimento en el tiempo, con base en el conocimiento de sus condiciones al momento de puesta en servicio y en cualquier momento de su vida útil. Estos autores expresan que dichos modelos permiten predecir los efectos a corto y largo plazo de las intervenciones que se realizan en las estructuras de pavimentos con el fin de estimar razonablemente las oportunidades en las que sean necesarias realizar operaciones de mantenimiento y de esta manera mantener niveles de deterioro bajos durante el transcurso del tiempo. Los modelos de deterioro pueden elaborarse a partir de análisis empíricos, mecanicistas o de una mezcla de ambos. Los modelos empíricos tienen su origen en bases de datos conformadas a partir de la medición de indicadores de pavimentos existentes. Los

modelos mecanicistas se basan en las propiedades físicas y mecánicas de las capas que conforman la estructura de pavimento.

Los modelos del comportamiento de un indicador del pavimento según su edad permiten predecir la forma en que dicho indicador evolucionará sin mediar una intervención física sobre el pavimento. A este tipo de modelos se les conoce como modelos de primera fase. Este tipo de modelos abarcan un periodo de tiempo entre la puesta en marcha del proyecto inmediatamente después de su construcción y el momento en que se lleva a cabo una reparación de importancia, tal que genere un mejoramiento en el servicio de la vía. Los modelos de segunda fase son aquellos intentan predecir, por un lado, cuál es el efecto de una determinada intervención en el pavimento respecto al servicio y, por otro lado, cómo esa intervención afecta la evolución del servicio del pavimento en el tiempo. En la **Figura 20** se pueden apreciar ambos modelos de deterioro.

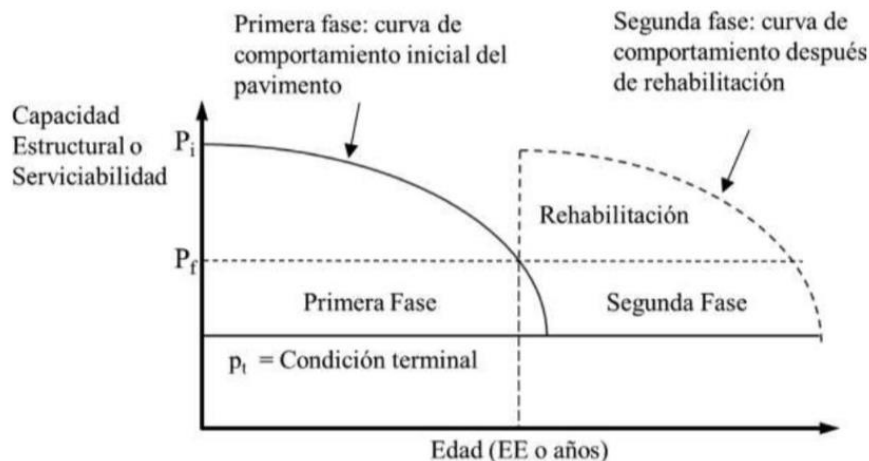


Figura 20. Esquema general del deterioro de un pavimento en la primera y segunda fase. **Fuente:** *Gestión de Infraestructura Vial, Tercera Edición. Hernán de Solminihac.*

Solminihac *et al.* (2019) enuncian que, en la primera fase, el deterioro del pavimento se produce entre la puesta en marcha de una vía hasta que se lleva a cabo una reparación de

importancia tal que mejore la serviciabilidad de vía. Actividades de restauración tales como, fresado y reparaciones de espesor parcial o total, caen dentro de esta categoría. La segunda fase de deterioro es aquella que se inicia desde la aplicación de una intervención de importancia en adelante. Cuando se realiza una rehabilitación siempre se elimina o se reduce el deterioro existente, o bien, se afecta la progresión de este, por lo que el comportamiento del pavimento en la etapa posterior a la intervención es diferente al de la primera fase, ya sea porque el deterioro inicia desde cero nuevamente o porque la progresión con que avanza el mismo es menor (o mayor) que antes de realizar una intervención

5.9.1 Modelos de Comportamiento Absolutos

Según Solminihaç *et al.* (2019) los modelos que describen el comportamiento de pavimentos flexibles en el tiempo se desarrollan usando formas funcionales continuas, por ejemplo, ***funciones logarítmicas, exponenciales, sigmoidales o lineales que permiten predecir en cualquier edad del pavimento, el comportamiento de una o varias características (en este caso indicadores) ya sean del orden estructural o funcional,***

Figura 21. Una de las limitaciones de este tipo de modelos es la complejidad de obtener datos de terreno, en cantidad y calidad. En esta historia de datos se cuenta el tránsito, los niveles de serviciabilidad del pavimento y las condiciones climáticas a lo largo del proyecto. Eventualmente puede ocurrir que se produzcan variaciones en los datos producto de los cambios tecnológicos en los sistemas de medición, que generalmente redundan en cambios en la magnitud de los valores medios de datos, así como en su varianza. Finalmente, los autores mencionados anteriormente enuncian que este tipo de modelos son útiles cuando se cuenta con series históricas extensas de datos, obtenidos bajo una condición rigurosa de seguimiento, tal como es el caso de Devimed.

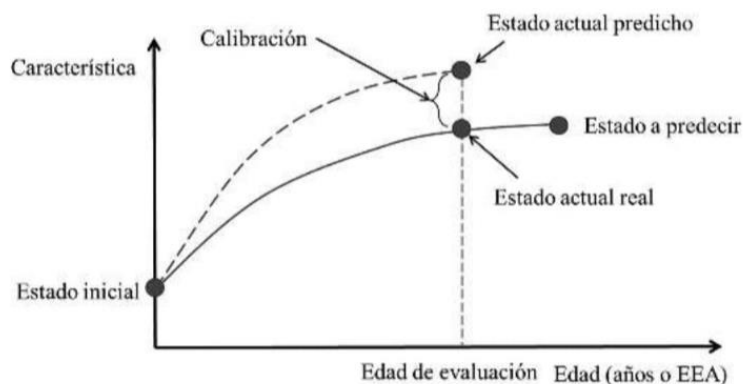


Figura 21. Esquema típico de modelos absolutos. **Fuente:** *Gestión de Infraestructura Vial, Tercera Edición.*

Hernán de Solminiha.

6. Estado del Arte

De acuerdo con Pedraza (2015), las curvas de deterioro pueden entenderse como expresiones matemáticas que representan la evolución del estado de un pavimento en el tiempo. Además permiten diagnosticar el efecto de las actividades de mantenimiento a corto y largo plazo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y de acuerdo con su progresión en el tiempo. Por otro lado, Muñoz (2017) indica que la forma en la que se describe una curva de deterioro, depende de factores como la estructura presente o su capacidad soportante, las cargas aplicadas (tráfico), así como del mantenimiento que se le realiza. Explica además que en aquellas carreteras en las que no se llevan a cabo trabajos de conservación de manera constante, la curva decae rápidamente hasta llegar a su peor condición y que es precisamente en ese punto en el que las inversiones para llevar la vía a una condición de servicio aceptable, serán mayores respecto a las que se podrían realizar en etapas tempranas de deterioro. En la **Figura 22**, se puede apreciar cómo las curvas de deterioro pueden llegar a ser una herramienta que permita planificar el manejo adecuado de los recursos; ya que, al conocer el comportamiento del deterioro de las carreteras, se pueden

programar intervenciones en un tiempo oportuno, de manera que la estructura no alcance grandes niveles de deterioro y que las inversiones respectivas que sean rentables económicamente.

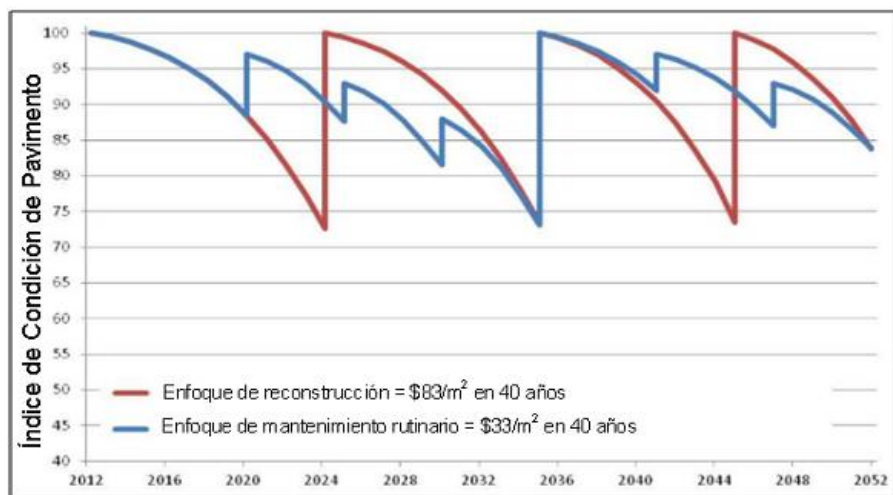


Figura 22. Deterioro del pavimento a lo largo del tiempo y su costo de intervención asociado. **Fuente:** Pedraza, (2015)

Considerando el hecho de que para realizar modelos absolutos de deterioros, tales como lo son las curvas de deterioro en pavimentos flexibles, se necesita recolectar información en campo con elementos tecnológicos o con herramientas desarrolladas empíricamente, es importante hacer referencia sobre la incertidumbre en la precisión de los datos, puesto que las metodologías de medición en las diferentes investigaciones varían, así como la tolerancia y precisión de los datos medidos. Las herramientas tecnológicas que recogen los datos, tales como perfilómetros, cámaras y griptester deben ser correctamente calibrados antes de realizar cualquier medición y estos elementos a su vez deben ser enviados constantemente a mantenimientos con el fin de que los resultados que arrojen siempre sean coherentes con la realidad. Los argumentos anteriores son importantes considerarlos en este punto ya que de estos depende en gran parte, la veracidad de los modelos agregados de deterioro de pavimentos flexibles que se han encontrado en diferentes investigaciones. Otros factores que

también son determinantes en los resultados de las investigaciones relacionadas al deterioro de pavimentos flexibles son el tráfico, el clima y la calidad de la subrasante de los corredores.

En la investigación *“Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile”* realizada por Moreno et al. (2013), se ratifica la importancia de verificar las condiciones y veracidad de la información recogida en campo:

- *“El principal requerimiento para la utilización de los modelos de deterioro es que deben ser calibrados a condiciones locales (Huang, 1993; Jain et al., 2005). Además, la calidad de los datos de entrada definen la veracidad de la información que entrega el modelo y requieren cumplir con condiciones básicas de calidad, que garanticen valores de salidas aproximados a los valores reales del deterioro.”*

En la misma investigación de Moreno et al. (2013), se concluye con un argumento que da idea respecto a los factores que determinan el comportamiento de los modelos probabilísticos de deterioro de pavimento flexibles:

- *“La investigación entrega expresiones que predicen el agrietamiento usando funciones de densidad de probabilidad, dependiendo de la gravedad del deterioro y para redes homogéneas de carreteras clasificadas por ubicación geográfica, tipo de tránsito y capacidad estructural.”*

Esta investigación demuestra que además de la calibración del entorno y los elementos de medición, es muy importante llevar a cabo una sectorización en las carreteras objeto de estudio, pues algunas condiciones claves en el deterioro tales como el clima o el tráfico pueden variar a lo largo de los proyectos y por lo tanto, afectar la precisión en los modelos de deterioro. Tal es el caso de la investigación de Gustavo Gamboa denominada “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” en la que el autor agrupa diferentes corredores viales de

diferentes olas generacionales en grupos que tengan similitudes respecto a clima, tráfico y tipo de pavimento, enfocándose principalmente en los flexibles. Gamboa agrupó 36 corredores con condiciones similares. Sin embargo, tuvo que descartar 5 debido a que no se logró encontrar información suficiente que permitiera verificar la homogeneidad de estos. Para los corredores con condiciones similares, basándose en las mediciones del índice de estado para cada concesión provenientes de una investigación previa del mismo autor, este desarrolló las curvas de deterioro para cada uno de los indicadores que se incluyen en el índice de estado (IRI, Grietas y Fisuras, Ahuellamiento y Fricción).

Gamboa deja claro en su investigación que los datos de las mediciones; es decir, el insumo para generar las curvas de deterioro datan desde el año 2008 y que en algunos tramos en específico del país no se pudieron encontrar datos referentes al índice de estado, además de que en otros tramos la nomenclatura variaba por lo que la recolección de información veraz fue complicada. Para la visualización de las curvas de deterioro el autor expone lo siguiente:

- *“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”*

Si bien es cierto que, por lo general se pueden obtener comportamientos de deterioros en pavimentos flexibles similares a los que tienen las funciones logarítmicas, los valores que obtiene el autor respecto al índice de correlación (R^2) son muy bajos, por lo que hubiese sido interesante buscar un tipo de función que se ajustara de mejor manera al comportamiento de los datos. En las **Figuras 23, 24, 25 y 26** se pueden observar las curvas de deterioro obtenidas para cada indicador incluido en el índice de estado del grupo 2 en la mencionada investigación.

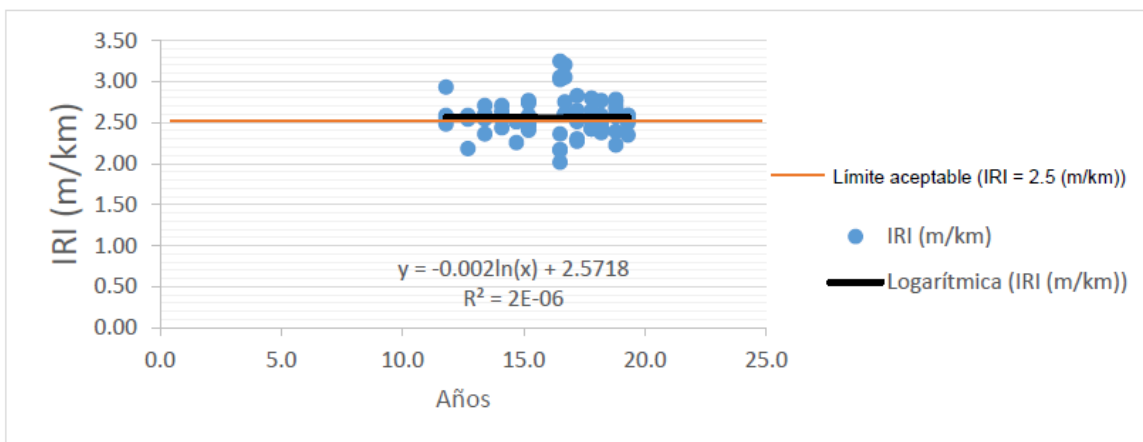


Figura 23. Curva de deterioro para el IRI, en el grupo 2. **Fuente:** Gustavo Gamboa, 2019

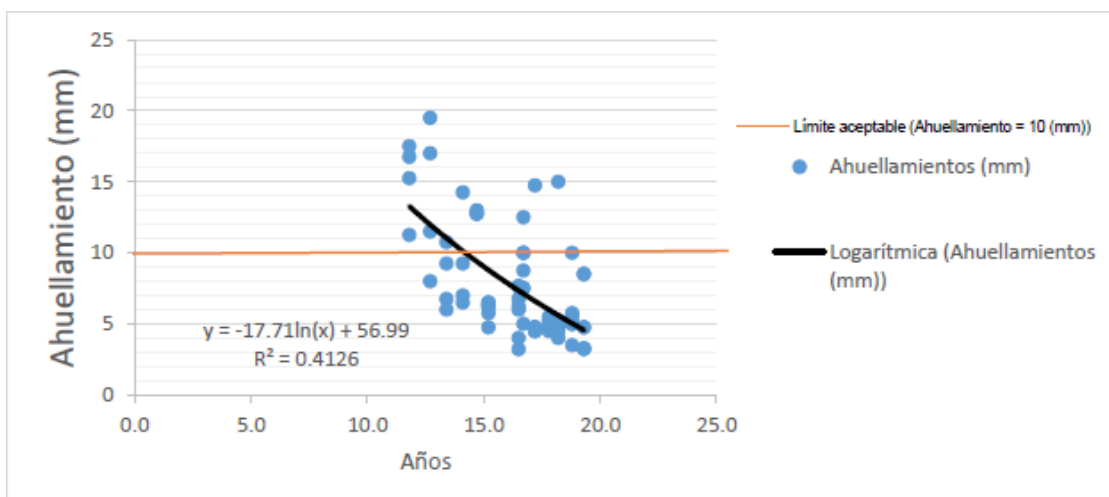


Figura 24. Curva de deterioro para el Ahuellamiento, en el grupo 2. **Fuente:** Gustavo Gamboa, 2019

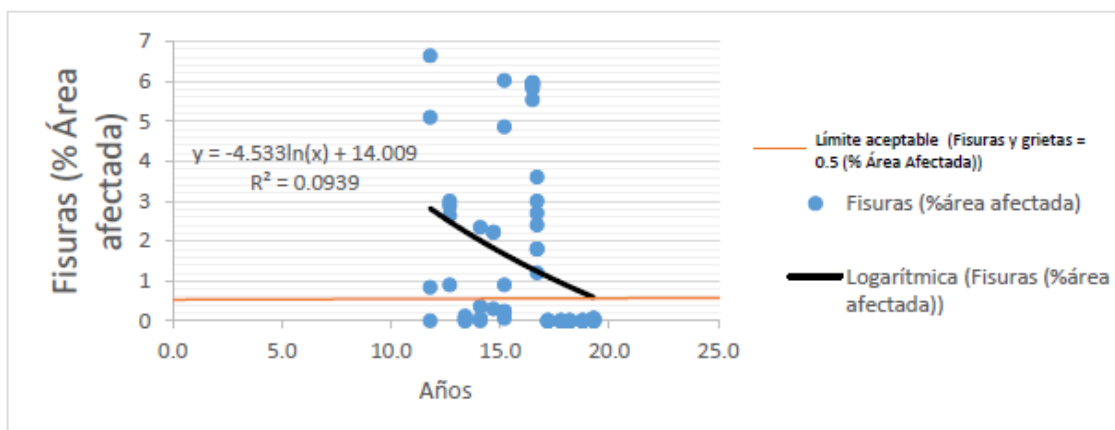


Figura 25. Curva de deterioro para el % de Área afectada, en el grupo 2. **Fuente:** Gustavo Gamboa, 2019

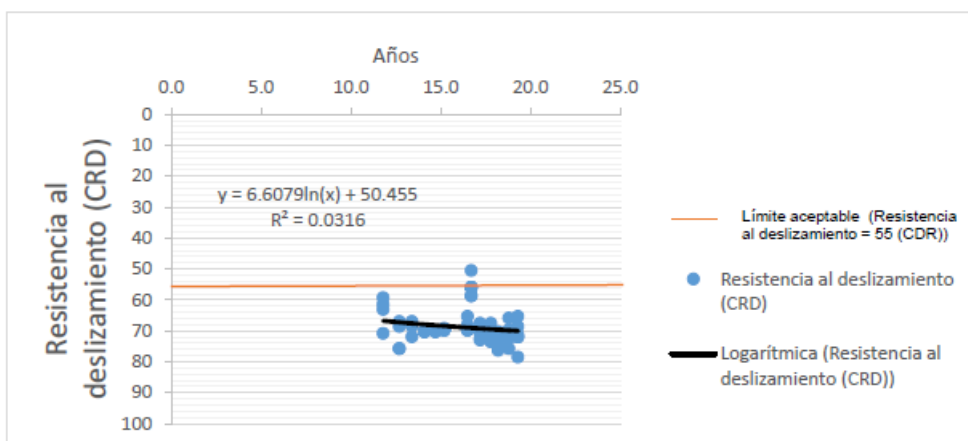


Figura 26. Curva de deterioro para la resistencia al deslizamiento (CRD) en el grupo 2. **Fuente:** Gustavo Gamboa, 2019

Gamboa en su investigación concluye:

- “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.”
- “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.”

Considerando el hecho de que en la investigación de Gamboa no se logró lo esperado y que el tema que aborda está directamente relacionado con lo que se busca en la presente investigación, es interesante traer a colación las recomendaciones que hace el autor:

- *“Aunque el estudio recopila el comportamiento del pavimento en regiones con características similares, se debe tener presente que, dado el uso de este 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.”*
- *“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.”*

Teniendo en cuenta la información con la que se concluye la investigación de Gamboa, se afirma una vez más la importancia que tiene calidad de los datos medidos en campo, pues son el insumo para la generación de las curvas de deterioro y así existan en bases de datos como las del INVIAS o las de la ANI, es importante verificar las condiciones en las que se llevaron a cabo las mediciones. Otro aspecto a considerar de esta investigación es la magnitud en la que se pretendía realizar, pues agrupar la mayoría de las concesiones del país con condiciones de tráfico y clima tan cambiantes puede traer consigo un aumento en la incertidumbre en los modelos, por lo que para poder predecir el deterioro de pavimentos flexibles, se podría presumir que es mejor trabajar con sectorizaciones de menor tamaño, con el fin de que las condiciones no varíen en gran medida.

Por otro lado, la investigación “Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre” realizada por Muñoz (2017), para la revista de Infraestructura Vial de la Universidad de Costa Rica, establece como objetivo lo siguiente:

- *“Con el presente trabajo se busca realizar una evaluacion de los caminos de la Gran Área Metropolitana, en las provincias de San Jose, Alajuela, Cartago y Heredia; de manera que se pueda conocer la condicion en la que se encuentran, así como, obtener las curvas de deterioro a partir de la informacion recolectada en campo”*

Esta investigación cuenta con un factor estadístico interesante pues desarrolla un análisis multivariable en el que se tiene en cuenta principalmente el factor de incertidumbre, pues como se ha mencionado anteriormente, es común encontrar dispersión en los datos recogidos en campo. Muñoz (2017), plantea que la generación de la curvas de deterioro y la ecuación que incluye el factor de incertidumbre son unas herramientas muy útiles, de manera que los encargados de la planificación de mantenimientos en pavimentos flexibles, puedan definir el tipo y tiempo óptimo de las inversiones que requieren las intervenciones a dichas estructuras, tal como lo expresa en los dos siguientes párrafos :

- *“La importancia del presente estudio radica en que la informacion generada es necesaria para comprender de una mejor manera como se encuentran las carreteras actualmente y su comportamiento a lo largo del tiempo. El método utilizado permite acercarse al problema y establecer una caracterizacion visual de los tipos de deterioros existentes. Con la informacion obtenida en campo y los historiales de intervencion de las carreteras, se pueden generar las denominadas curvas de deterioro.”*
- *“Como se puede observar en la **Figura 27**, las curvas permiten tener una mejor conceptualizacion de las condiciones que se estan presentando en un momento dado; y a la vez predecir la condicion a futuro. Esto implica un aporte muy significativo en lo que al tema de administracion de la infraestructura vial se refiere, ya que se podrá definir la intervencion que se requiere para cada tipo de carretera.”*

Es importante resaltar que la investigación de Muñoz (2017), se enfoca principalmente en los indicadores de ahuellamientos y grietas y fisuras, bajo la metodología del Índice de

Condición del Pavimento (PCI). En la **Tabla 9** se puede observar el desglose de las carreteras evaluadas en esta investigación:

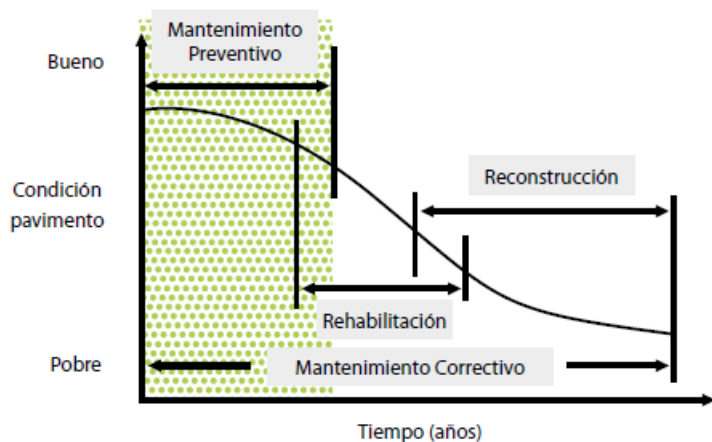


Figura 27. Relación entre la condición del pavimento flexible y el tiempo. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

Tabla 9. Relación de corredores evaluados. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

Provincia	RVC Longitud en km (1)	km Asfaltados (2)	% Asfaltados RVC-GAM (1)/(2)	Cantidad de caminos Evaluados	km Evaluados (3)	% km Asfaltados Evaluados (2)/(3)
San José	2725.37	1416.09	51.96%	62	25.04	1.77%
Alajuela	1940.11	682.43	35.17%	23	16.26	2.38%
Cartago	1559.70	597.15	38.29%	47	27.19	4.55%
Heredia	936.73	723.01	77.18%	56	31.52	4.36%

El autor para cada uno de los tramos de carretera enunciados en la **Tabla 9**, llevó a cabo el cálculo del Índice de Condición de Pavimentos de acuerdo a la metodología ASTM D-6233 y expresa que, al comparar los resultados de este procedimiento con el año respectivo de la última intervención en mantenimiento, se obtuvo lo ilustrado en la **Figura 28**

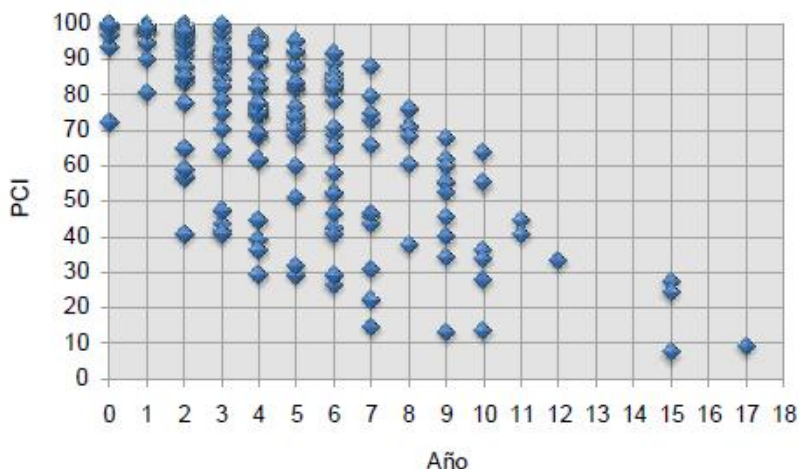


Figura 28. Comportamiento de los datos calculados para el PCI en cada uno de los años. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

Uno de los argumentos clave de esta investigación es precisamente que se tiene en cuenta el inventario de los momentos de las últimas intervenciones y los lugares donde se realizaron, pues es en estos puntos es donde se esperaría que la vida útil de la estructura vuelva a tener un comportamiento similar al que tuvo en el momento de la puesta en servicio. Si esta situación no se da, se podría deducir que existen problemas en las capas que conforman la estructura del pavimento. Justamente Muñoz (2017), de la **Figura 28** concluye lo siguiente:

- “Tras un análisis detallado de los datos de la **Figura 28**, se pudieron indentificar tres tendencias de deterioro a lo largo del tiempo. Cada una de ellas, se puede relacionar con la estructura presente en el camino. En la parte inferior del conjunto de datos, se puede observar el caso de carreteras con una estructura deficiente, donde es esperable encontrar datos de PCI bajos en periodos cortos de tiempo. Asi como, en la parte superior de la dispersion, caminos que cuentan con una estructura suficiente y un diseño adecuado.”

A partir de un análisis estadístico multivariable llamado “Cluster”, el autor buscó la división de los datos mostrados en la **Figura 28** según su similitud y obtuvo las curvas de deterioro relacionadas en la **Tabla 10** y **Figuras 29, 30 y 31**.

Tabla 10. Clasificación de comportamientos de datos según su estructura. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

	Cantidad Observaciones	R ²	Promedio	Desviación Estándar
Estructura Suficiente	129	0,878	84,00	6,439
Estructura Media	39	0,748	60,00	9,755
Estructura Insuficiente	20	0,847	38,00	6,939

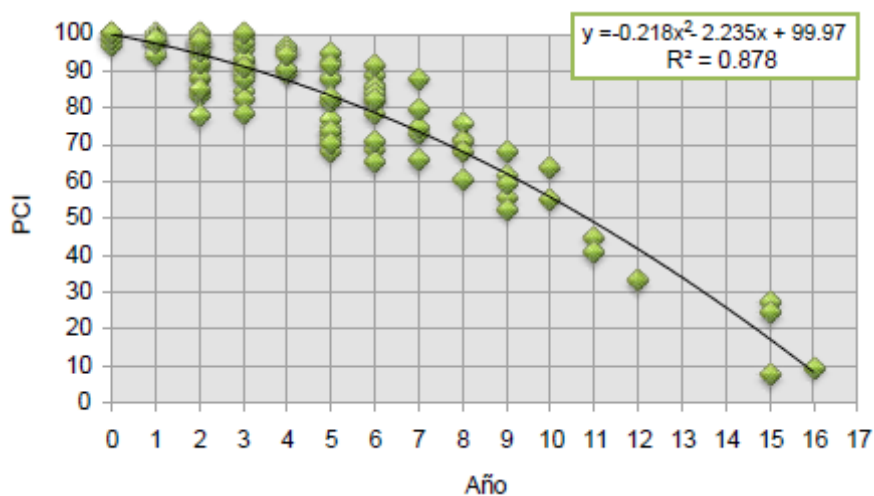


Figura 29. Curva de deterioro para los tramos con estructura suficiente. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

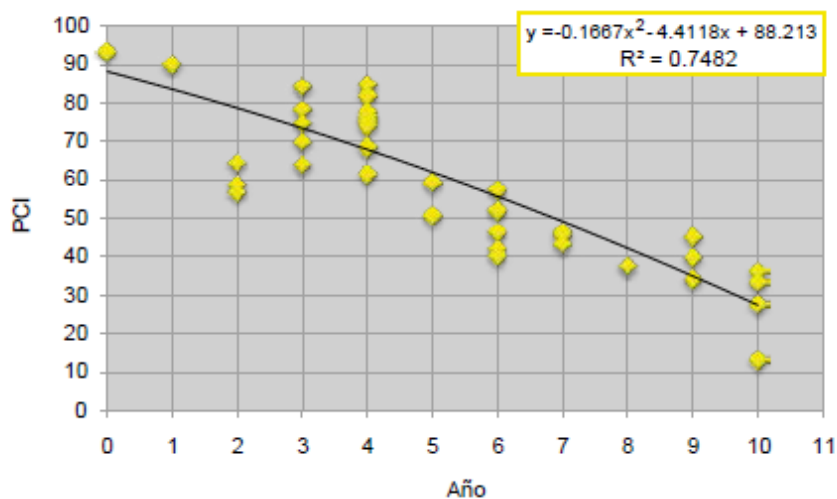


Figura 30. Curva de deterioro para los tramos con estructura media. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

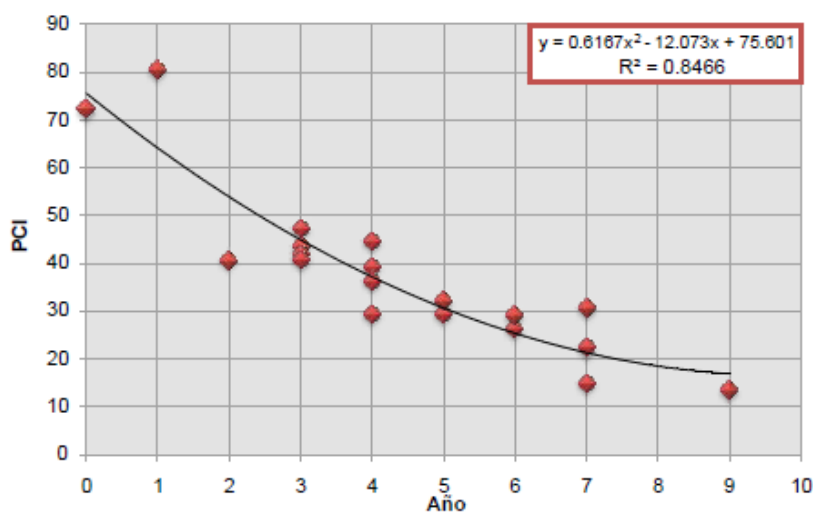


Figura 31. Curva de deterioro para los tramos con estructura insuficiente. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

El autor por medio de un análisis de varianza, en el que se acepta la hipótesis de que el modelo explica el fenómeno de estudio y un análisis del comportamiento de los residuos en el que se acepta la hipótesis de que estos vienen de una población normalmente distribuida, logra establecer un factor Z_0 para diferentes niveles de incertidumbre tal como se muestra en la

Tabla 11. Este factor afecta la ecuación determinada para la curva de deterioro con estructura suficiente, tal como se ilustra en la **Ecuación 4**

Tabla 11. Factor Z_0 para diferentes porcentajes de incertidumbre. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

Incertidumbre	Z_0
99%	-2.57583
95%	-1.95996
90%	-1.64485
85%	-1.43953
80%	-1.28155
75%	-1.15035

$$y = -0.2181 X^2 - 2.2359 X + 100 + 6.4386 Z_0$$

Ecuación 4. Ecuación para la curva de deterioro de estructura suficiente. **Fuente:** (Muñoz, 2017)

En este punto Muñoz (2017), concluye lo siguiente:

- *“La idea principal de los modelos para cada nivel de incertidumbre es tener una herramienta que permita establecer la forma en que se van deteriorando los caminos a lo largo del tiempo y a partir de ella, definir los tiempos óptimos de intervención de acuerdo con la condición en la que se encuentran. Posteriormente, luego de un proceso de evaluación de la red se puede ir ajustando el nivel de incertidumbre seleccionado, hasta alcanzar la curva de deterioro óptima encontrada para caminos con estructura suficiente.”*
- *“El desconocimiento del estado actual y la condición previa de las carreteras (historial de intervenciones), genera que se destinen los recursos de manera inapropiada. En ocasiones, se realizan intervenciones que no son las más adecuadas al tipo de deterioro que presentan las carreteras, lo que se traduce en una pérdida importante en*

el nivel de servicio a lo largo de un periodo corto de tiempo y en un costo económico significativo.”

Además de la importancia del inventario de intervenciones, el análisis estadístico en esta investigación es sumamente interesante y atinado pues como se ha venido desarrollando en esta investigación, los datos de medición traen consigo grandes incertidumbres, de manera que con este tipo de metodologías se pueden reducir considerablemente. Además, resalta factores como la destinación de recursos en intervenciones que por lo general no es la indicada, sobre todo en estructuras insuficientes, situación que genera desbalances financieros para los entes administrativos.

Esta investigación muestra claramente la utilidad que pueden llegar a tener las curvas de deterioro en la gestión del mantenimiento de pavimentos flexibles. Sin embargo, es importante recalcar que otros indicadores que también hacen parte del índice de estado y son fundamentales, no se tienen en cuenta, tales como la regularidad que se expresa por medio del IRI y la fricción. Para el caso particular el IRI se tienen dos condiciones, la primera es que si se estudia y se logra determinar por medio de alguna herramienta el momento preciso para realizar una intervención en la estructura de pavimento flexible que mejore valores de mediciones altos, estas intervenciones traerían consigo un mejoramiento directo en las condiciones que hacen parte de la metodología PCI y la fricción. La segunda condición corresponde a que por lo menos en Colombia, el IRI tiene el factor de influencia más alto dentro del calculo del Índice de Estado. Ambas condiciones hacen que la consideración del IRI dentro de las curvas de deterioro de pavimentos flexibles sea realmente importante.

La investigación *“Roughness Progression Model for Asphalt Pavements Using Long-Term Pavement Performance Data”* de Meedoga & Gao (2014), establece la regularidad como un elemento determinate en el deterioro de pavimentos flexibles, afirmando lo siguiente:

- *“La popularidad del índice de regularidad ha aumentado a lo largo de los años y ahora se ha convertido en un criterio dominante para describir el comportamiento de un pavimento flexible. No solo refleja el desempeño del pavimento, sino que también está directamente relacionado con el costo de operación del vehículo (p. ej., Chesher y Harrison 1987; Archondo-Callao y Faiz 1994). Desde la perspectiva de la capacidad de servicio-desempeño, se encontró que la rugosidad está altamente correlacionada con el índice de capacidad de servicio actual (PSR) y el índice de servicio actual (PSI). Se demostró en la prueba de carretera AASHTO que más del 90% del PSI fue contribuido por la variación de la pendiente del perfil longitudinal (Haas et al. 1994)”*
- *“Algunos departamentos de transporte estatales, como el Departamento de Transporte de Carolina del Sur (SCDOT), utilizan la regularidad promedio de la trayectoria de las ruedas para calcular el valor de PSI, donde este valor está relacionado con el IRI en forma exponencial. Además, Lin y Hsiao (2003) desarrollaron una correlación entre el IRI y el deterioro del pavimento utilizando redes neuronales y encontraron que el coeficiente de correlación entre el IRI y las variables de deterioro fue de 0,944, lo que demuestra que el IRI puede representar deterioros del pavimento. Por lo tanto, es factible utilizar el IRI como índice de desempeño del pavimento.*

Los autores mencionan además, que las condiciones climáticas también son un factor de alta relevancia en los modelos de deterioro en pavimentos flexibles y precisamente debido a estas condiciones que por lo general son cambiantes, en la investigación evalúan el comportamiento del IRI en diferentes zonas ambientales tal como se ilustra en la **Figura 31**, generales e individuales. Considerando incluso las afectaciones por congelamientos, llegando a las siguientes conclusiones:

- “Se encontró que los pavimentos de asfalto en la zona de congelación tienen el mayor potencial de cambio en la regularidad de todos los factores ambientales”
- “En las zonas secas sin heladas, las tasas más altas de aumento de la regularidad se asociaron con temperaturas medias anuales más altas, una mayor cantidad de días por encima de los 32 °C y límites plásticos más altos de la subrasante”

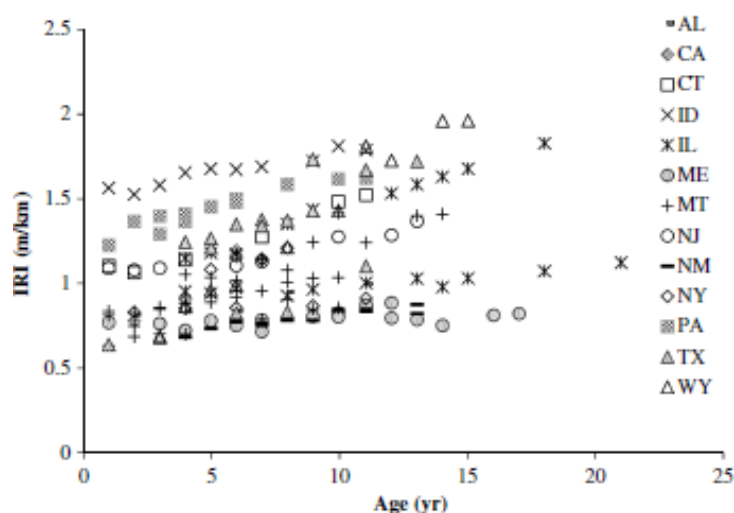


Figura 31. Comportamiento del IRI en diferentes estados con diferentes climas. **Fuente:** (Meedoga & Gao, 2014)

Además de la consideración de condiciones climáticas, para la sectorización de los corredores viales que fueron objeto de estudio. Meedoga & Gao (2014), definieron los siguientes niveles respecto a condiciones estructurales. “Nivel -1” para las estructuras de pavimento sin mantenimiento o rehabilitación durante la recolección de datos; “Nivel 0” para las estructuras recién construidas o rehabilitadas que pudieran tratarse como nuevas. “Nivel 1” para estructuras con mantenimientos menores o superficiales y “Nivel 2” para pavimentos flexibles visualmente en buen estado pero con registro de tráfico poco claro. A partir de la generación de las curvas de deterioro para el índice de regularidad internacional (IRI) los autores definen una serie de recomendaciones de mantenimientos a implementar según los

resultados obtenidos. Estas acciones a implementar solo se basan en las condiciones de IRI que se tengan, pues como se mencionó anteriormente este factor es considerado como el más importante y en el mejor de los casos, cuando el IRI es cercano a 1, no recomiendan ningún tratamiento. Cuando los valores de IRI son cercanos a 3, establecen que el tratamiento es llevar a cabo reemplazos de carpeta asfáltica y en el peor de los casos cuando la condición de IRI se es mayor a 4 y se acerca a 5, la recomendación de tratamiento es llevar a cabo un “Whitetopping”, instalar losas de concreto sobre la estructura de pavimento asfáltico. Pasando de condiciones flexibles rígidas, **Tabla 12**

Tabla 12. Tratamientos para el mantenimiento recomendados según el resultado de IRI. **Fuente:** (Meedoga & Gao, 2014)

Condition state	Description	Treatment	Improved condition state
1	In excellent pavement condition state, high ride quality without crack patching and rutting	Do nothing	—
2	Light to moderate cracking, <i>raveling</i> , polishing or flushing with good ride quality (>70) (or $IRI < 80$) and slight rutting <3 mm	1-Fog seal 2-Chip seal 3-Crack sealing	1 1 1
3	Light cracking with moderate rutting <12 mm, ride quality <70 (or $80 < IRI < 114$)	4-Slurry seal (for light cracking) 5-Thin overlay (for moderate rutting)	2 1
4	Moderate to severe distress (centerline joint deterioration, more transverse and multiple cracking, severe alligator cracking), fair ride quality [with rough IRI ($115 < IRI < 149$)], moderate to severe rutting (12 mm $<$ rutting < 25 mm)	6-Cold-in-place 7-Hot-in-place 8-Mill and resurfacing 9-Micro surfacing	3 2 2 3
5	Extremely more longitudinal and transverse cracks, and patching C/L joint deterioration), poor IRI (>150), severe rutting (>25 mm)	10-Structural overlay 11-Full depth reclamation 12-Whitetopping	1 1 1

Es importante resaltar de esta investigación que para poder concluir acerca de los tratamientos para el mantenimiento de estructuras de pavimento flexible, se debe tener un conocimiento profundo sobre las condiciones de tráfico y clima, así como de las características mecánicas de cada una de las capas que conforman la estructura, especialmente la subrasante, que en ocasiones es pobremente estudiada. Los factores constructivos también son aspectos que se deben considerar para determinar los tratamientos.

Según la investigación denominada “Influencia de las técnicas de conservación y de la incertidumbre de las curvas de deterioro en el análisis de costo de ciclo de vida de pavimentos”

flexibles” de Pedraza (2015), se entienden los modelos de deterioro en pavimento flexible cómo:

- *“Los modelos de deterioro pueden entenderse como expresiones matemáticas que representan la evolución del estado de un pavimento en el tiempo. Además, permiten diagnosticar el efecto de las actividades de mantenimiento a corto y largo plazo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y su progresión en el tiempo.”*

Además, en esta misma investigación se establece lo siguiente respecto al comportamiento que tienen en general este tipo de modelos:

- *“Aunque existen diferentes modelos que permiten predecir el deterioro de un pavimento, la función típicamente empleada para describir su deterioro progresivo está dada por la **Ecuación 5.**”*

$$g(t) = \frac{t^2}{a}$$

Ecuación 5. Función cuadrática para describir el deterioro de pavimentos flexibles. **Fuente:** (Pedraza, 2015)

- *“Donde $g(t)$ es el nivel de servicio o desempeño del pavimento en el tiempo (PCI), t es el período de análisis y (a) es una constante que depende del nivel de servicio a la falla del sistema cuando ha transcurrido su vida útil.”*

El comportamiento que se define para el deterioro de pavimentos flexibles en la investigación de Pedraza (2015), se puede observar en la **Figura 32**

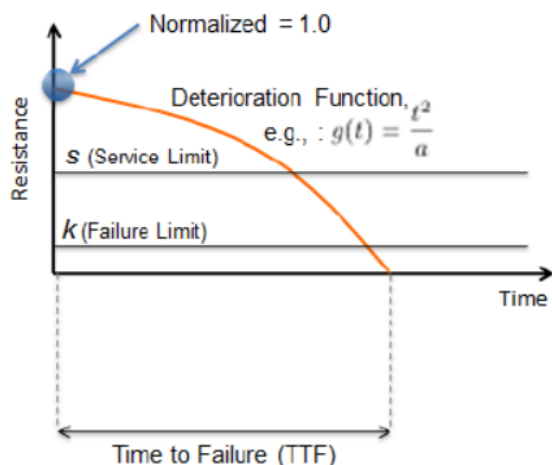


Figura 32. Modelo para curvas de deterioro en función del PCI. **Fuente:** (Meedoga & Gao, 2014)

- “El modelo de deterioro que mejor se ajusta a un pavimento es el de “función de deterioro progresivo” y depende del período de diseño. Así, la **Figura 32**, representa el comportamiento de desempeño descrito por una función cuadrática; sobre esta figura se hacen las siguientes aclaraciones: la variable *S* indica el nivel de servicio mínimo aceptable para realizar una actividad de mantenimiento y la variable *K* indica el nivel de servicio del pavimento cuando ha fallado el sistema y es necesario hacer una reconstrucción”

Es interesante de esta investigación la propuesta matemática que se plantea para el deterioro de pavimentos flexibles. Sin embargo, cuando se trabaje con datos medidos en campo, es probable que el comportamiento estos datos no necesariamente se represente por una ecuación cuadrática y se deba realizar un proceso estadístico ajustado. Por otro lado, Sherif (2020), en la investigación llamada “Modelo de predicción del índice de rugosidad internacional para pavimentos flexibles” desarrollaron un modelo de predicción IRI preciso para pavimentos flexibles utilizando regresión lineal múltiple y análisis y redes neuronales artificiales (ANN). Los modelos se desarrollaron sobre la base de Long-Term, base de datos de rendimiento del pavimento. Los datos se recopilaron para pavimentos flexibles originales,

superpuestos y de los estudios generales de pavimento (GPS-1, GPS-2 y GPS-6) y GPS-6). Los modelos propuestos (regresión y ANN) predicen el IRI en función de la edad del pavimento, el IRI inicial (IRI justo después construcción de pavimento), grietas transversales, piel de cocodrilo y desviación estándar de la profundidad de la fisura. El modelo de regresión arrojó un valor de coeficiente de determinación (r) de 0.57 mientras que el modelo ANNs resultó en un valor (r) mucho más alto, de 0,75.

7. Metodología.

7.1 Consideraciones de la Información Recogida en Campo

A la hora de recolectar datos de mediciones en campo, es de suma importancia considerar que existe la probabilidad de que se hayan almacenado datos erróneos por diferentes motivos, tal como lo es el impacto que puede generar las condiciones variables del clima durante las mediciones, pues si de manera inesperada se presentan precipitaciones, los datos para indicadores como el IRI y Grietas y fisuras pierden objetividad. Por otro lado, también es importante resaltar que la veracidad de los datos recogidos en campo también depende de las condiciones de tráfico que presente el corredor en los momentos de medición, dado que, si se presentan flujos vehiculares altos o accidentes, es prácticamente imposible la toma de mediciones continuas, lo que representa una dispersión o variabilidad en los datos. Es por lo anterior, que lo primero que se debe hacer una vez se recogen los datos es realizar una inspección profunda sobre datos puntuales que estén considerablemente alejados de la tendencia del resto de datos e identificar qué condiciones pudieron haber causado dicha variabilidad.

Otro punto que es importante resaltar respecto a la calidad de los datos es la calibración que se le debe realizar a las herramientas de medición. Si bien existen metodologías empíricas y mecanicistas con diferentes herramientas para la recolección de información sobre los

indicadores que hacen parte del índice de estado del pavimento, ambas deben garantizar que los datos que se recogen estén considerablemente ajustados a la realidad. Esto se logra mediante calibraciones en los equipos de medición, usualmente los equipos que se utilizan son importados y el procedimiento para la calibración suele ser guiado por personal extranjero perteneciente a la empresa que produce dichos equipos. Es muy importante que se cuente con las revisiones y mantenimientos que requiere cada herramienta pues de esto dependerá la calidad de los datos. Especialmente para el caso de Devimed, se verificó que cada una de las herramientas de medición contara con su respectivos mantenimientos y calibraciones desde el año en que empezaron a tomar mediciones en campo. En el **Anexo 1** se adjuntan dichos certificados.

Por otro lado, también es clave reconocer los tipos de formatos en los que las herramientas de medición entregan los datos e identificar las unidades en las que se encuentran. Un ejemplo de esto es el caso del perfilómetro que entrega mediciones de IRI en un formato denominado “.rcp”, este formato es de texto y se debe tener precaución a la hora de transferir los datos a Excel, evitando cambios en los resultados de las mediciones. De igual manera, para el caso del indicador de Grietas y Fisuras, los datos quedan almacenados en una base de datos y cualquier alteración a esta puede generar la pérdida de los datos. Un procedimiento fundamental es llevar todos los datos de las mediciones de los diferentes indicadores a un entorno común en el que se pueda trabajar con toda la información recogida en un mismo formato, en este caso la herramienta y formato que se utilizó fue Excel.

Se debe tener precaución especialmente en los momentos de medición de IRI dado que pueden existir elementos que representen alteraciones al perfil longitudinal de la vía y modifiquen los resultados de las mediciones. Tales elementos deben ser correctamente inventariados en los lugares que se presentan y corresponden por lo general reductores de velocidad como resaltos o tachas, tapas de alcantarillas o juntas de dilatación en puentes. Si no

se descartan los datos de medición en estos puntos, se tendrá una dispersión de datos que difícilmente se ajuste a un comportamiento estadístico determinado.

7.2 Bitácora de Intervenciones a la Estructura de Pavimento Realizadas en el Corredor

Objeto de Estudio.

Es de suma importancia para el desarrollo de este trabajo tener un registro de los lugares y las fechas en las que se realizaron intervenciones a la estructura de pavimento; tales como reemplazos de la carpeta asfáltica o de la estructura completa. Es conveniente manejar este registro ya que cuando se generan intervenciones en un determinado sector, la curva de deterioro va a tender a generar un aumento en la vida útil tal como se puede observar en la **Figura 33**, pues cuando se finaliza la intervención es como si se tuviera el sector en óptimas condiciones y se marcara un nuevo inicio en el deterioro.

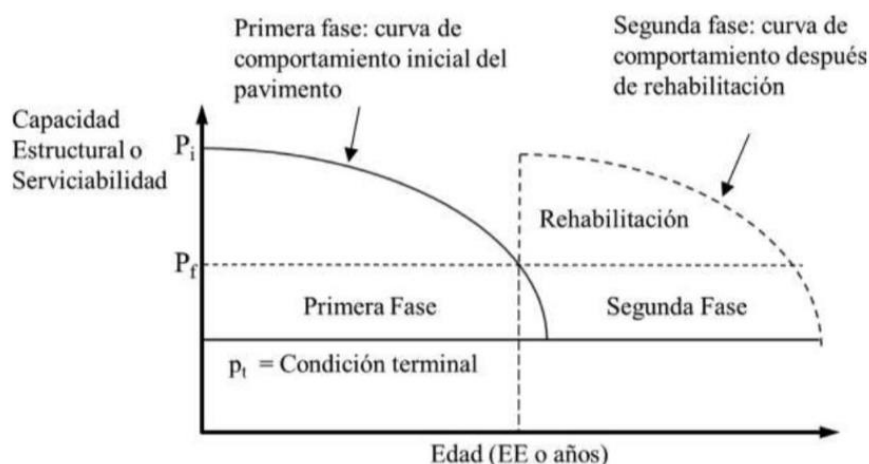


Figura 33. Esquema general del deterioro de un pavimento en la primera y segunda fase. **Fuente:** *Gestión de Infraestructura Vial, Tercera Edición. Hernán de Solminihac*

Considerando este factor, es probable que existan sectores en los que se hayan identificado deterioros en cualquier indicador en una medición en específico y que en una medición siguiente ya no se identifique el deterioro debido a una intervención. Claramente la

realización de actividades que mejoren las condiciones de la carpeta asfáltica en el corredor de estudio es un factor determinante en la generación de las curvas de deterioro. Esta bitácora de intervenciones se puede observar en el **Anexo 2_(BITACORA_INT)**.

7.3 Recopilación de los Resultados de las Mediciones en Campo Para los Indicadores que Hacen Parte del IE.

7.3.1 Índice de regularidad internacional (IRI). Para este indicador, en el corredor objeto de estudio se tienen 16 mediciones desde el año 2019 que se empezó a implementar el uso del perfilómetro en Devimed S.A. Los resultados de dichas mediciones han sido almacenados en una base de datos tipo “.rcp”. En primera instancia, se transfirió dicha base de datos a Excel, con el fin de manejar los datos en un entorno común a los otros indicadores, se verificó que existieran datos para los 50km de la autopista Medellín-Bogotá y la existencia de singularidades tales como juntas de dilatación en puentes, MH O resaltos que tuviesen un impacto en las mediciones. Véase el **Anexo 3_(RESULTADOS_MEDICIONES_IRI)**.

7.3.2 Grietas y fisuras. Considerando los resultados que se almacenan de igual manera en una base de datos, después la toma de imágenes, análisis y postproceso en el programa de la empresa I3; el cual se explica su funcionamiento en el numeral 5.6.1 del presente trabajo, se verificó la existencia y veracidad de los datos de área afectada en ambas calzadas de los 50 kilómetros del corredor objeto de estudio. Cabe resaltar que se incluyeron los resultados de 6 mediciones desde el año 2019 hasta el año 2021, dado que en este último año Devimed S.A, incursionó en una metodología de medición alternativa que a la actualidad sigue desarrollando, basada en la generación de una ortofoto del pavimento en la que se puedan identificar y a la vez georreferenciar los daños existentes en la carpeta de rodadura.

Los datos provenientes de los resultados de las mediciones para este indicador fueron transferidos a Excel y se exponen en el **Anexo 4_(RESULTADOS_MEDICIONES_GYF)**.

7.3.3 Ahuellamiento. Como se indicó anteriormente en el numeral **5.6.3**, los resultados de las mediciones para este indicador fueron tomados de los procedimientos realizados por la interventoría del proyecto, de manera que estos datos ya se encontraban debidamente organizados y en formato Excel. Se reunieron 10 mediciones desde el año 2017 hasta el 2022. Los resultados se ilustran en el **Anexo 5_ (RESULTADOS_MEDICIONES_AH)**.

7.3.4 Resistencia al deslizamiento (Coeficiente de fricción). Al igual que para el ahuellamiento y de acuerdo con lo expresado en el numeral **5.6.4**, los datos para este indicador fueron tomados de las mediciones realizadas por la interventoría del proyecto. Se reunieron un total de 10 mediciones desde el año 2017 hasta el año 2022. Los resultados de dichas mediciones reposaban en archivos de Excel, enviados en su momento al concesionario para verificar su cumplimiento respecto a lo indicado en el contrato. Las mediciones se exponen en el **Anexo 6_ (RESULTADOS_MEDICIONES_FR)**.

7.4 Calificación de los indicadores por kilómetro

Considerando los resultados de las mediciones recogidas en campo, es necesario llevar a cabo una variedad de procedimientos para la adecuación de dichos resultados a la sectorización por kilómetro planteada para este proyecto.

7.4.1 IRI

El apéndice 4 de los contratos de concesión bajo la modalidad APP, establecen el procedimiento para determinar el valor de IRI por kilómetro, para cada ola generacional. Este apéndice enuncia lo siguiente:

- “La unidad de medida será el IRI cada 100 m. Se tomarán medidas en las dos rodadas o huellas del carril, por donde circulen más vehículos pesados en cada calzada. Se debe calcular el IRI cada 100 m en ambas huellas de la llanta en m/km aproximado a un decimal. Para determinar el valor puntual del IRI se promedia las dos medidas del peor carril cada 100m”
- “El Valor medio de cada Km se obtiene como la media de los valores puntuales obtenidos cada 100 m de ese Km. El valor puntual no se exige en puentes, pasos superiores, vados, badenes, accesos, estacionamientos, enlaces, pistas de viraje, pistas de aceleración y desaceleración, bahías de paraderos y plazas de pesaje o peaje.”

El perfilómetro utilizado por Devimed para la medición de este indicador, entrega los datos de IRI cada 10m por carril, por lo que para determinar el valor de IRI del kilómetro-carril, se realiza el promedio de todas las mediciones que se incluyen en cada 100m de un kilómetro por carril y calzada, tal como lo ilustra las **Ecuaciones 6 y 7**.

$$IRI_{Hectómetro\ i,\ carril\ j,\ km\ n} = \frac{\sum \text{Mediciones cada 10m del Hectometro } i, \text{ carril } j, km\ n}{10}$$

Ecuación 6. Determinación del IRI por hectómetro-carril. **Fuente:** Elaboración propia basada en el Anexo IV del contrato de concesión 0275 de 1996.

$$IRI_{Calzada\ k,\ Carril\ j,\ Km\ n} = \frac{\sum IRI\ Hectometro\ i, Calzada\ k, Carril\ j, Km\ n}{10}$$

Ecuación 7. Determinación del IRI por kilómetro-carril. **Fuente:** Elaboración propia basada en el Anexo IV del contrato de concesión 0275 de 1996.

Siguiendo las **Ecuaciones 6 y 7**, se obtienen los resultados por kilómetro de cada uno de los 4 carriles que conforman el corredor objeto de estudio. Los resultados se encuentran en el **Anexo 7_ (IRI_KM_CARRIL)**.

7.4.2 Grietas y Fisuras (% Área Afectada)

Para determinar el área afectada en cada kilómetro del corredor objeto de estudio, se realizó, así como en los otros indicadores, la distinción de cada una de las calzadas que conforman la Autopista. La calzada derecha corresponde a la que va en sentido del abscisado (Medellín-Bogotá) y la calzada izquierda, es la que alberga el tráfico en el sentido (Bogotá-Medellín).

Una vez se separan los datos por calzada, se realiza la suma algebraica de las áreas que se encuentran con afectación en cada kilómetro y como se tienen los datos de la sección transversal de ambas calzadas, se puede determinar, como lo muestra la **Ecuación 8**, el porcentaje de área afectada por kilómetro en cada calzada.

$$\% \text{ Área afectada Km } i, \text{ Calzada } k = \frac{\sum \text{Áreas con afectación en la Calzada } k, \text{ Km } i}{\text{Área de la Calzada } k, \text{ Km } i} \times 100$$

Ecuación 8. Determinación del % de área afectada por calzada y kilómetro. **Fuente:** Elaboración propia basada en el Anexo IV del contrato de concesión 0275 de 1996.

Los resultados de la aplicación de la **Ecuación 8**, se pueden observar en el **Anexo 8_ (%AF_KM_CALZADA)**.

7.4.3 Ahuellamiento

Según el Apéndice Técnico 4 de los contratos de concesión bajo el esquema de APP, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- *“Se considerará la máxima profundidad de la rodada medida como la diferencia máxima de cota, entre las crestas y los senos de la rodada más pronunciada de cada carril. Se tomarán medidas en las dos rodadas o huellas del carril, por donde circulen más vehículos pesados en cada calzada. El valor para considerar será el peor de los dos valores obtenidos (uno de cada rodada).”*
- *“Se tomarán medidas cada 20 m, dentro de cada km. El valor correspondiente a cada km se obtendrá como media de todas las medidas de ese km. Los resultados de la auscultación se presentarán siguiendo el manual para la inspección de pavimentos flexibles y rígidos del INVIAS, de acuerdo con el caso.”*

Es importante resaltar que este apéndice da cuenta sobre los procedimientos que se deben realizar en la ola generacional de concesiones número 4. Dado que Devimed es concesión de primera generación, las mediciones para este indicador se realizan cada 50m y no cada 20m como lo establece el apéndice 4. Lo anterior es el único punto en el que difiere la determinación del valor de ahuellamiento por km. Este procedimiento se resume en la **Ecuación 9**.

$$Ahuellamiento_{km\ i, calzada\ k, carril\ j} = \frac{\sum Medidas\ desfavorables_{km\ i, calzada\ k, carril\ j}}{50}$$

Ecuación 9. Determinación de profundidad máxima de ahuellamiento por carril, calzada y kilómetro. **Fuente:**
Elaboración propia basada en el Anexo IV del contrato de concesión 0275 de 1996

Los resultados de la aplicación de la **Ecuación 9**, se pueden observar en el **Anexo 9_(AH_KM)**

7.4.4 Fricción

Para determinar el valor de medición por km para este indicador, el apéndice técnico 4 del contrato de concesión define lo siguiente:

- “Se medirá el equivalente al coeficiente CRT (Coeficiente de Rozamiento Transversal).”
- “Se tomarán medidas en una de las rodadas del carril por donde circulen más vehículos pesados, también se medirán los carriles que tenga capa de rodadura distinta. Cada 20m se dará una medida. El valor correspondiente a cada Km se obtendrá como la media de todas las medidas de ese km.”

Así mismo, como para el indicador de ahuellamiento, el anexo técnico define que las mediciones serán cada 20m para concesiones de cuarta generación. Como Devimed es de primera generación, las mediciones se realizan cada 50m, tal como lo establece su contrato con la Agencia Nacional de Infraestructura. La **Ecuación 10** ilustra el procedimiento que se debe seguir para determinar el valor de fricción por km.

$$Fricción_{km\ i, calzada\ k, carril\ j} = \frac{\sum Mediciones_{km\ i, calzada\ k, carril\ j}}{20}$$

Ecuación 10. Determinación del % de área afectada por calzada y kilómetro. **Fuente:** Elaboración propia basada en el Anexo IV del contrato de concesión 0275 de 1996

Los resultados de la aplicación de la **Ecuación 10**, se pueden observar en el **Anexo 10_ (FR_KM)**.

Con los resultados de las mediciones para cada indicador en cada uno de los kilómetros, es posible realizar la representación gráfica del comportamiento de los datos a lo

largo del tiempo. A continuación, se ilustran los resultados por indicador para los 50km objeto de estudio.

7.5 Representación Gráfica IRI Para los 50 Kilómetros

Se puede observar en las **Figuras 34, 35, 36 y 37** cómo han variado los resultados de las 16 mediciones para el indicador de Regularidad (IRI) por carril a lo largo del tiempo en el corredor objeto de estudio. Se ilustra, además, los lugares en los que se encuentran algunos elementos, llamados singularidades que alteran las mediciones en el perfil longitudinal tales como tapas de MH, juntas de dilatación en puentes y túneles, además de resaltos. Es importante resaltar la inclusión del límite de incumplimiento que para el caso en Devimed, concesión de primera generación es 3.5 m/km. Se puede concluir que, para los 50km, en las 16 mediciones tomadas desde agosto de 2019 hasta diciembre de 2022, se encontraron algunos valores que no son mayoría, en incumplimiento respecto al contrato de concesión. Estos puntos en incumplimiento efectivamente reflejan la alteración al perfil que generan las mencionadas singularidades. Los datos provenientes de las mediciones se han comportado de manera similar en las fechas de medición, describiendo casi que el mismo comportamiento en la mayoría de los casos. Sin embargo, si se quisiera pensar en una función estadística que describa una sola curva de deterioro para este indicador para cada uno de los carriles en los 50km podría resultar impreciso, puesto que a pesar de que los datos describen un comportamiento similar, llevarlos a que se ajusten a un comportamiento específico podría resultar en ecuaciones con un bajo coeficiente de determinación o correlación (R^2).

Realizar el análisis de deterioro sectorizando por kilómetro-carril no solo generaría que la población de datos a analizar se reduzca y esté más acotada al comportamiento de las mediciones en campo para cada indicador, sino que sería mucho más práctico a la hora de determinar los lugares en los que se requeriría algún tipo de intervención, pues no sería

completamente útil determinar que los 50 kilómetros en conjunto estarían próximos a incumplir algún indicador, pues viéndolo desde tal escenario, se deberían intervenir todos los kilómetros. En cambio, con el análisis por kilómetro-carril se puede establecer qué tan próximo está cada uno de ellos al incumplimiento para cada uno de los indicadores que componen el índice de estado, de manera que las personas encargadas de tomar las decisiones respecto a las intervenciones de mantenimiento lo puedan hacer en un tramos más precisos y de esta manera optimizar recursos. Además, respecto a las obligaciones de calidad en el mantenimiento que tiene Devimed con el contrato de concesión, dicha sectorización también permite llevar a cabo un seguimiento conciso al estado de la carpeta asfáltica, de manera que se puedan predecir los deterioros y de esta manera poder tomar decisiones de intervención y anticiparse a posibles accidentes o sanciones por parte de interventorías.

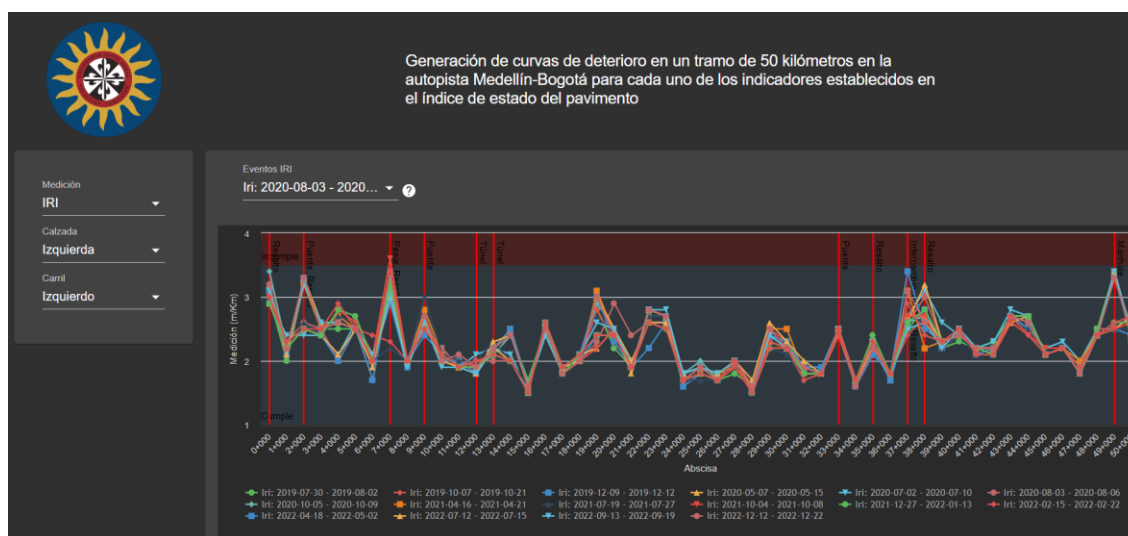


Figura 34. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril izquierdo de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

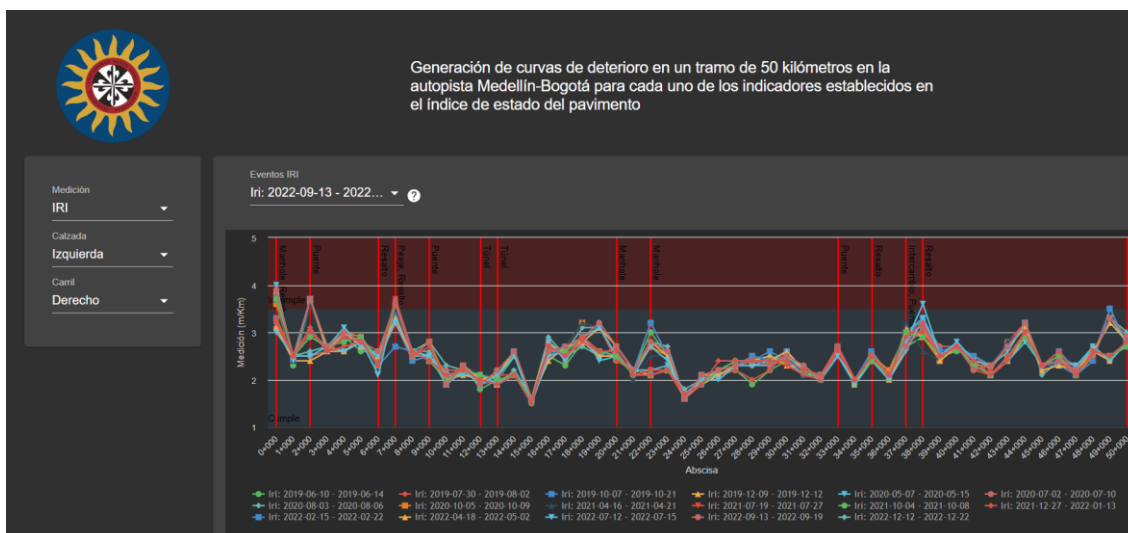


Figura 35. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril derecho de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

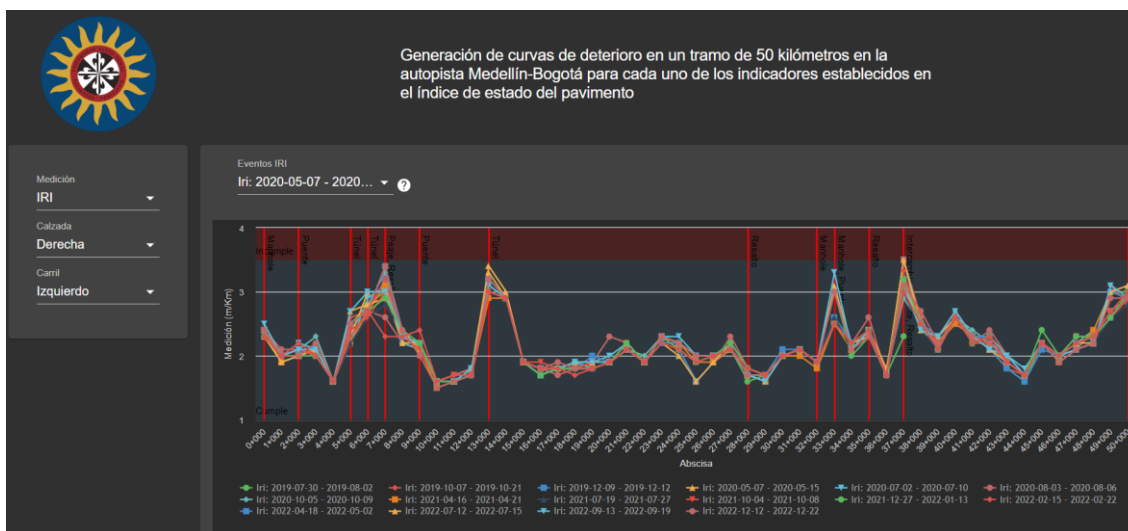


Figura 36. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril izquierdo de la calzada derecha. **Fuente:** Elaboración propia

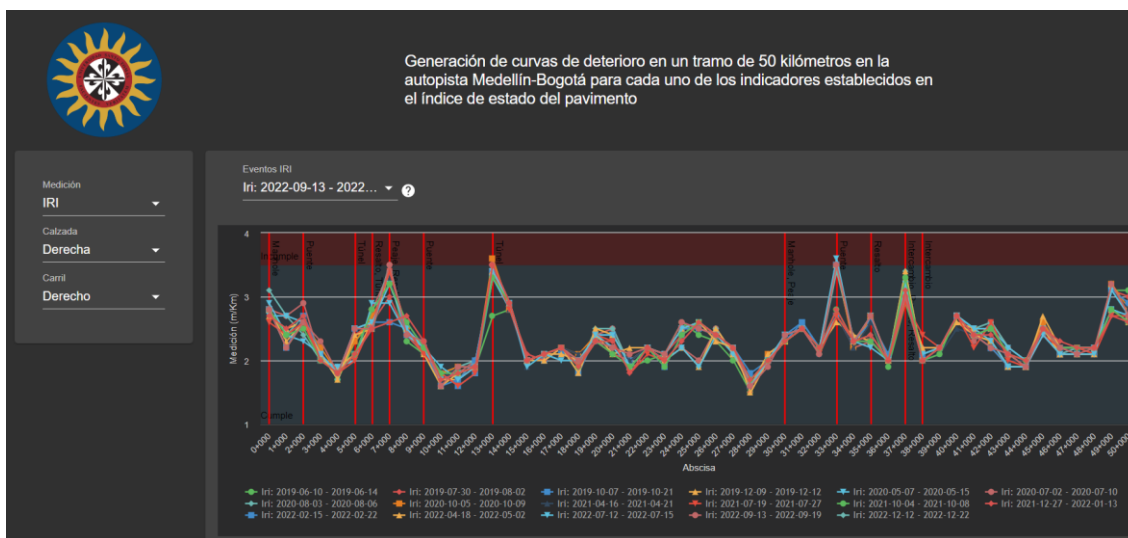


Figura 37. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para IRI en el carril derecho de la calzada derecha. **Fuente:** Elaboración propia

7.6 Representación Gráfica Grietas y Fisuras (%Área Afectada) Para los 50 Kilómetros.

Se puede observar en las **Figuras 38, 39, 40 y 41**, el estado de los 50 kilómetros por carril y calzada para el indicador de porcentaje de área afectada. Para este indicador se define el límite de incumplimiento, según la norma INVIAS como el 1% del área evaluada. Es decir, para este análisis el área afectada por kilómetro-carril no puede superar la multiplicación del ancho del carril que en este caso corresponde a 3.6m y la longitud en metros de un kilómetro. El resultado de la multiplicación anteriormente mencionada es 3600m² que corresponden al área que se está evaluando. Ahora, considerando que más del 1% de dicha área no puede estar en afectación, el límite de incumplimiento resultaría entonces de la multiplicación del área evaluada por el 1%, de manera que se obtiene y se define el límite como 36m². Considerando el límite de incumplimiento, la mayoría de los kilómetros-carril ha sobrepasado este valor en alguna de las mediciones realizadas. Es muy importante considerar que solo se cuenta a la fecha con seis mediciones para este indicador y que, además, el corredor objeto de estudio está operativo desde 1996 de manera que, en todos estos años de concesión, se han generado intervenciones de las que no se tienen registro y que marcaron un nuevo punto de partida en el

deterioro. Se han podido recolectar algunos datos de intervenciones entre los años 2019 y 2022. Sin embargo, es fundamental seguir con el registro de estas intervenciones en el tiempo y con las metodologías de medición que permitan determinar de una más precisa el comportamiento del deterioro para este indicador en cada kilómetro y sus respectivos carriles. Por otro lado, es interesante analizar la afectación de los carriles derechos, pues estos carriles son los que por lo general tienen un mayor impacto y por lo tanto un mayor deterioro puesto que los vehículos de carga pesada transitan en su mayoría por estos carriles. Además, en la configuración de los 50km de doble calzada del tramo objeto de estudio, solo se cuenta con báscula en la calzada derecha, por lo tanto, solo se controla la carga impuesta en esta calzada, lo que supondría que la calzada izquierda debería mayores áreas afectación.

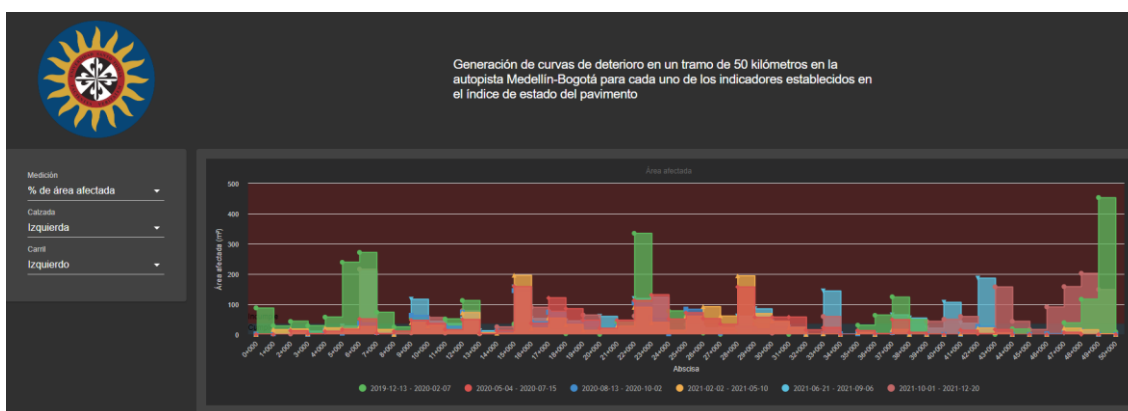


Figura 38. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril izquierdo de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

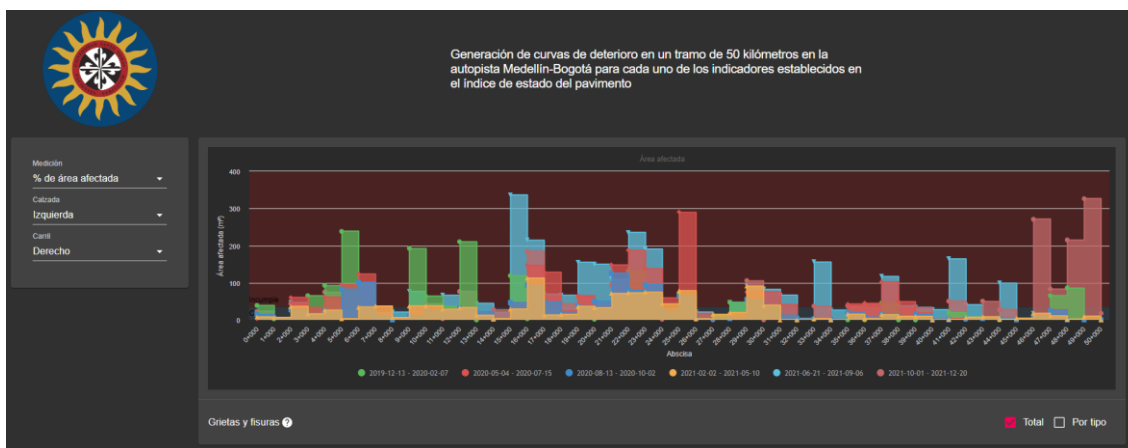


Figura 39. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril derecho de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

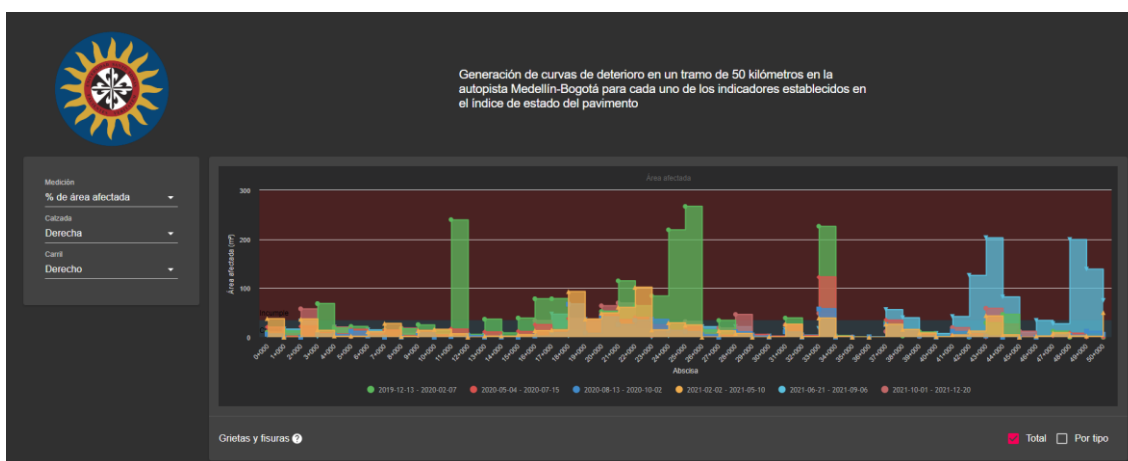


Figura 40. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril derecho de la calzada derecha. **Fuente:** Elaboración propia

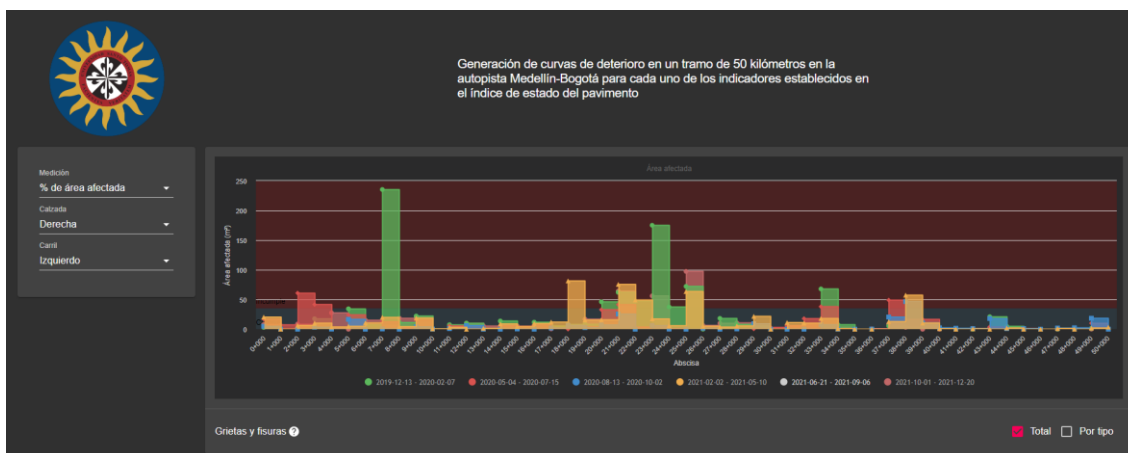


Figura 41. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para porcentaje de área afectada en el carril izquierdo de la calzada derecha. **Fuente:** *Elaboración propia*

Efectivamente se puede observar cómo los valores máximos de deterioro en la calzada izquierda son mayores que en la calzada derecha pues en calzada izquierda se cuentan con valores que rondan los 500m² en el carril derecho y los 450m² en el carril izquierdo, teniendo mayores áreas de afectación en el carril derecho. De igual manera, se puede observar como en la calzada derecha para sus carriles derecho e izquierdo se obtuvieron menores áreas de deterioro pues en el caso los valores máximos estuvieron alrededor de los 300m² y 350m². Además, de manera consecuente a la calzada izquierda, el carril derecho presentó mayores áreas de afectación que el carril izquierdo.

7.7 Representación Gráfica Ahuellamiento Para los 50 Kilómetros.

En las **Figuras 42, 43, 44 y 45** se muestra el resultado para los 50 kilómetros del corredor objeto de estudio en cada una de las calzadas y sus respectivos carriles. Es de anotar que el límite de incumplimiento de este indicador se establece según el contrato de concesión en 25mm. A pesar de que los datos presentan ciertas variaciones en las 10 mediciones de las que se tiene registro hasta la fecha, en ningún caso se ha presentado un incumplimiento para

este indicador, de manera que la máxima medición para este indicador no sobrepasó los 10mm.

Por otro lado, se puede pensar en que la dispersión que tienen los datos también puede haber sido generada por imprecisiones en las técnicas de medición, puesto que la unidad de medida es mínima y a pesar de que se toma con perfilómetros especiales y calibrados, pueden existir variaciones en dicha unidad de medida que corresponde a milímetros. También, es importante mencionar que las intervenciones a la estructura de pavimento pueden haber jugado un papel importante en el comportamiento de los datos que dan cuenta sobre deterioro de este indicador, pues como se mencionó al principio del trabajo, este tipo de deterioro se genera por acumulación de deformaciones, que por lo general está ligado a deformaciones en las capas granulares, procesos constructivos deficientes, rápida apertura al tráfico o por qué las propiedades de las mezclas asfálticas instaladas son insuficientes.

Adicionalmente, se podría afirmar que, debido a que la calzada izquierda ha sufrido mayores deterioros, al igual que los carriles derechos de ambas calzadas, estos lugares han necesitado mayores intervenciones en la estructura de pavimento, por lo tanto, en estos lugares se ha generado un riesgo para que este indicador se materialice pues si en las intervenciones existió algún problema como los mencionados en el párrafo anterior, la probabilidad de tener ahuellamientos aumenta.

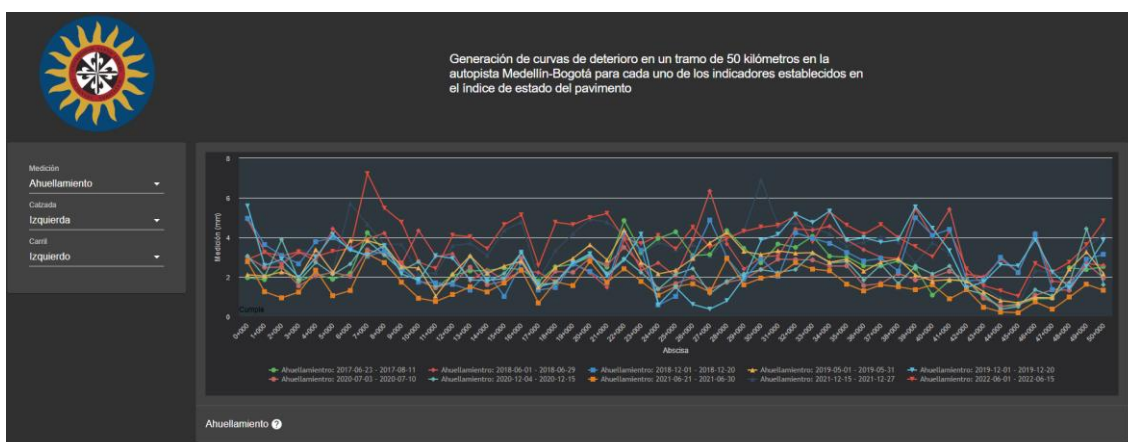


Figura 42. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril izquierdo de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia.

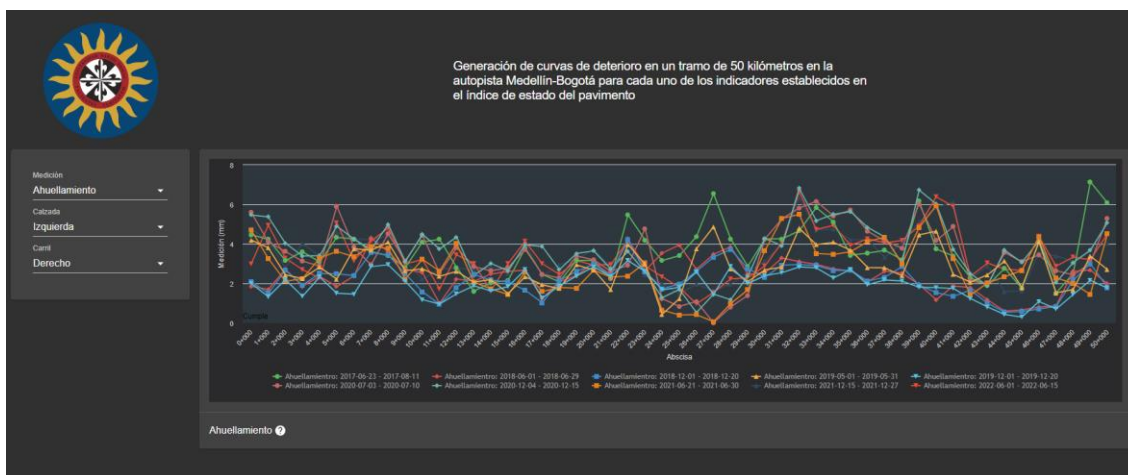


Figura 43. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril derecho de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

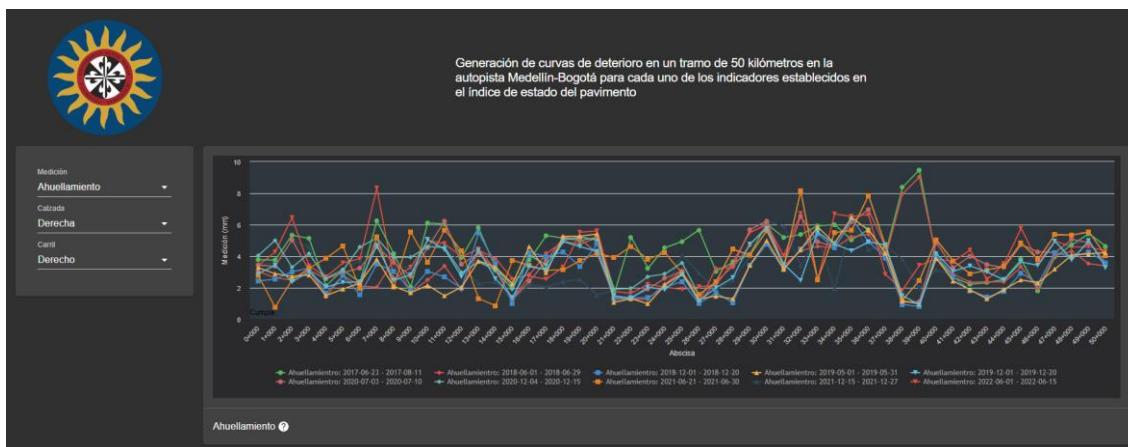


Figura 44. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril derecho de la calzada derecha. **Fuente:** Elaboración propia

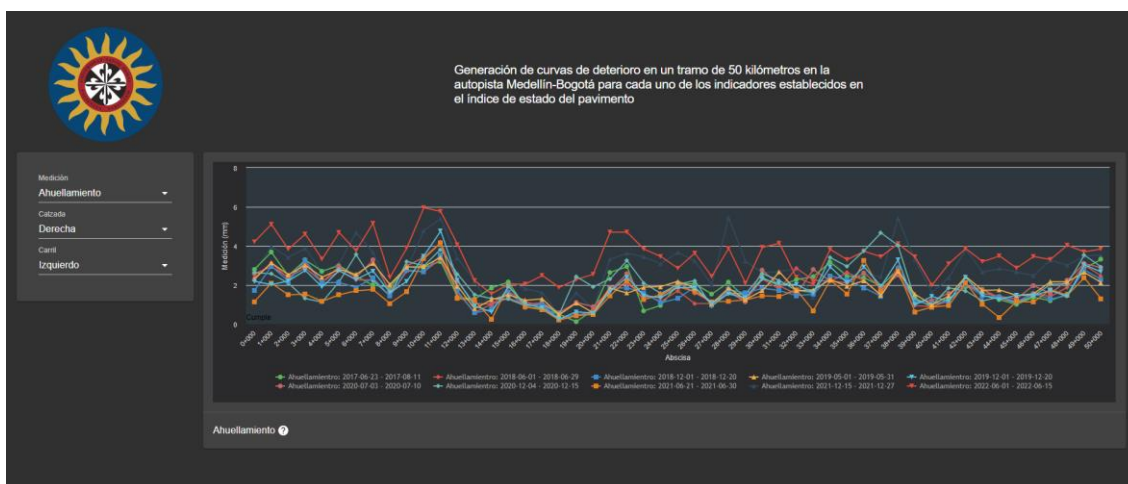


Figura 45. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Ahuellamiento en el carril izquierdo de la calzada derecha. **Fuente:** Elaboración propia

7.8 Representación Gráfica Fricción Para Los 50 kilómetros.

En las **Figuras 46, 47, 48 y 49** se puede observar el comportamiento de las 10 mediciones tomadas en campo para los 50 kilómetros que componen el corredor objeto de estudio con sus respectivas calzadas y carriles. El límite de incumplimiento establecido en el contrato de concesión para este indicador corresponde a un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento de 45. Es decir, cualquier medición que esté por debajo de 45 está en incumplimiento. Para este indicador en especial, las mediciones tienen una dispersión considerable puesto que los resultados en cada una de las mediciones que se tomaron en cada uno de los kilómetros los resultados fueron considerablemente diferentes. Lo anterior, se puede deber a imprecisiones o practicas inadecuadas a la hora de tomar mediciones. Es de anotar que tanto que los datos provenientes de las mediciones de este indicador como el ahuellamiento son provenientes de mediciones ejecutadas por la interventoría de Devimed. Además, como el resto de los indicadores las intervenciones en la carpeta de rodadura ejecutadas en el tiempo pueden impactar los resultados de las mediciones pues como estas intervenciones se realizan en diferentes lugares y momentos, se genera que la superficie de

rodadura no tenga continuidad de manera que el coeficiente de resistencia al deslizamiento cambie en los puntos donde se llevó a cabo una intervención con respecto al resto de la superficie.

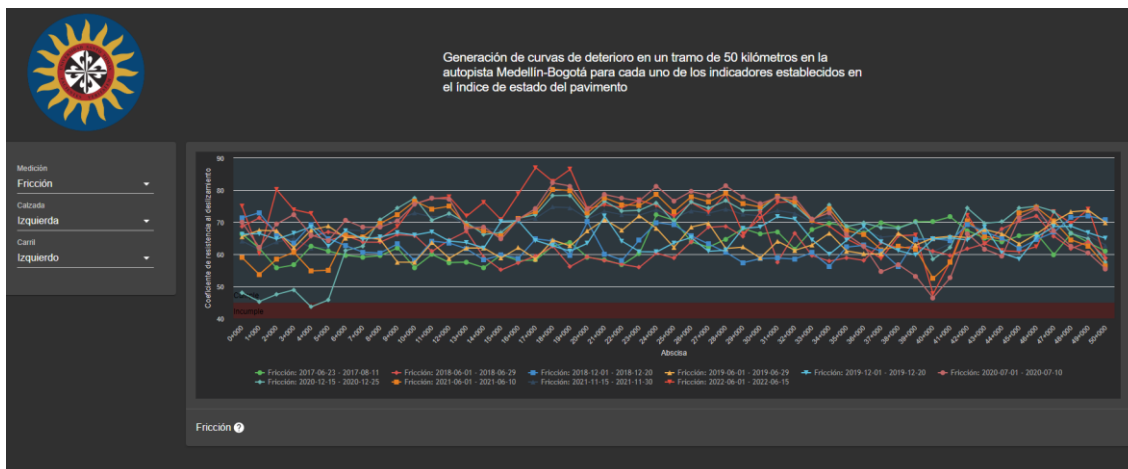


Figura 46. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril izquierdo de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

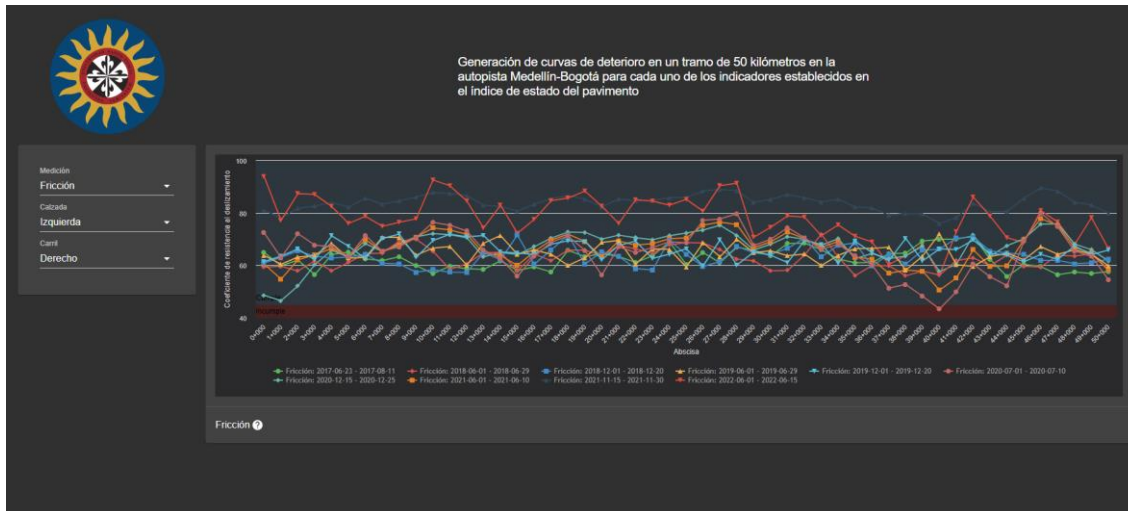


Figura 47. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril derecho de la calzada izquierda. **Fuente:** Elaboración propia

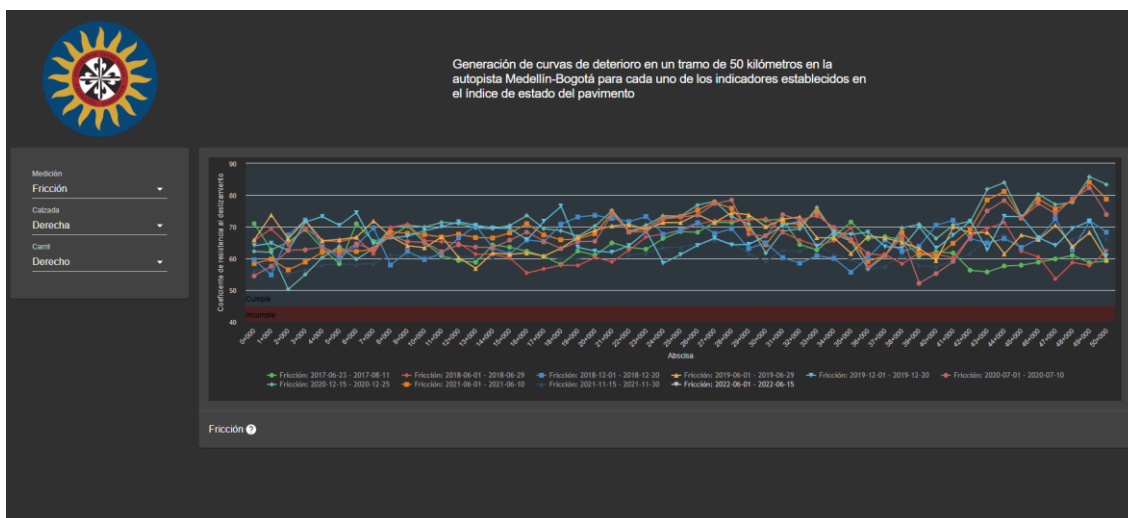


Figura 48. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril derecho de la calzada derecha. **Fuente:** *Elaboración propia*

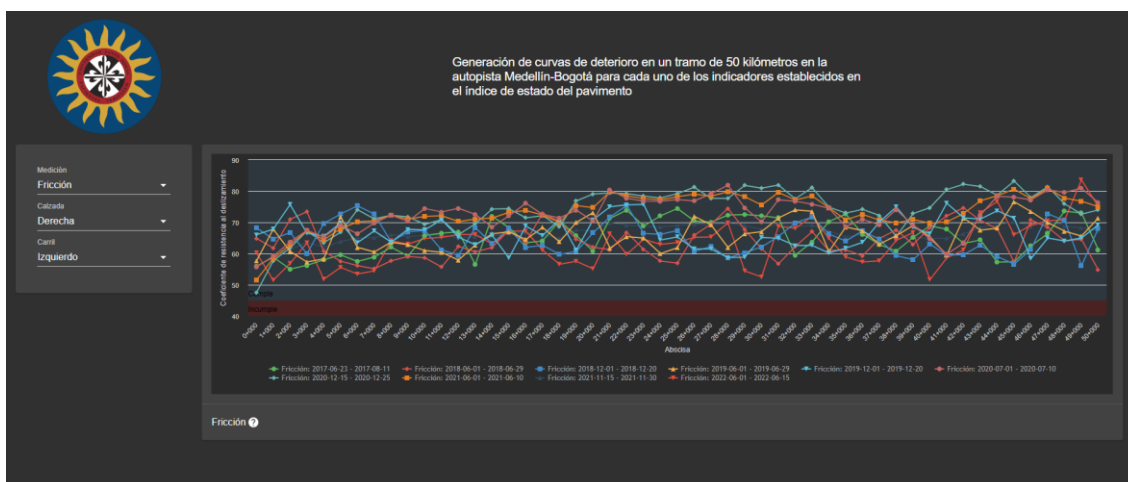


Figura 49. Representación gráfica de los resultados en las mediciones para Fricción en el carril izquierdo de la calzada derecha. **Fuente:** *Elaboración propia*

8. Resultados.

Durante el desarrollo del presente trabajo se generaron las curvas de deterioro para cada uno de los indicadores que componen el índice de estado del pavimento flexible, mediante la recolección y análisis de datos provenientes de mediciones en campo. Dichas

curvas se obtuvieron en un tramo de 50 kilómetros de la Autopista Medellín-Bogotá en el departamento de Antioquia, Colombia. La información recolectada, se sectorizó por kilómetro-carril con el objetivo de analizar de manera más acotada y precisa el comportamiento del deterioro de los indicadores.

Para generar las curvas de deterioro de manera interactiva, se desarrolló una página web que incluye una herramienta de visualización de datos programada en Python con Django y React en Typescript para la parte visual. En esta página se permite la visualización dinámica de las curvas de deterioro para cada kilómetro-carril e indicador en el tramo objeto de estudio. Asimismo, permite obtener los tipos de regresión que probablemente describen el comportamiento del deterioro, su respectivo coeficiente de correlación, el límite de incumplimiento respecto al contrato de concesión y la fecha probable en la que se llegaría a dicho incumplimiento. Esta herramienta resulta útil para las personas encargadas del mantenimiento de los pavimentos en el corredor, ya que pueden consultar rápidamente el estado de cualquier kilómetro y tomar decisiones más informadas sobre el momento adecuado para realizar mantenimientos para algún indicador, pasando de una perspectiva reactiva a una perspectiva predictiva y a la vez preventiva. Dicha herramienta puede ser visitada en el siguiente enlace: <https://curvasdeterioroautopista.jpospina.com/>.

En el momento en que se abre el enlace en internet, la interfaz corresponde con lo que se muestra en la **Figura 50**. En la parte izquierda se tiene una sección con tres opciones de selección, la primera tiene el nombre “Medición” que hace referencia al indicador que se quiere consultar, la segunda opción con el nombre “Calzada” permite elegir si se quiere consultar la calzada izquierda o derecha y de la misma manera funciona la tercera opción, que tiene el nombre “Carril”. En la parte derecha se puede observar un gráfico en el que la ordenada corresponde al valor resultante de la medición por kilómetro-carril para el indicador previamente seleccionado y en la abscisa, se tienen los kilómetros del tramo objeto de estudio. En la parte inferior del gráfico se muestran cada una de las mediciones que se han realizado para el

indicador seleccionado con su respectiva fecha y a medida que se seleccionen dichas mediciones, estas irán apareciendo en el gráfico anteriormente mencionado y de esta manera se podrá observar cómo ha sido el comportamiento de los datos por indicador en los 50 kilómetros, *tal como se ilustró en las figuras desde la 34 hasta la 49.*

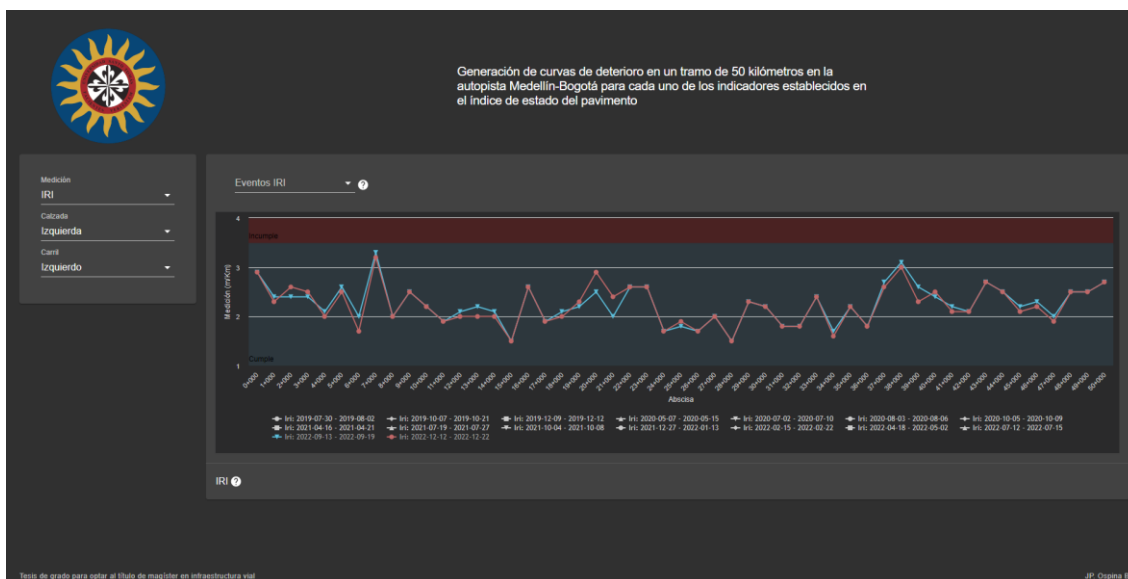


Figura 50. Interfaz inicial en la página web desarrollada con la herramienta de visualización de datos. **Fuente:**

Elaboración propia

Para visualizar las curvas de deterioro por kilómetro, se debe seleccionar en el gráfico, específicamente el kilómetro de interés, tal como lo muestra la **Figura 51**. Una vez se selecciona, en la parte inferior, surge otro gráfico en el que se obtiene el histórico de mediciones para el indicador, kilómetro y carril seleccionado previamente, ver **Figura 52**. En la ordenada se tienen los valores de medición en las unidades que le corresponden al indicador seleccionado y en la abscisa se tienen las fechas en las que se realizaron las mediciones. En la parte inferior del gráfico de la **Figura 52**, se puede observar el tipo de regresión que se podría ajustar al comportamiento de los datos, se tiene la opción de regresión lineal, exponencial y logarítmica. Al seleccionar el tipo de regresión que se desee, en el gráfico anteriormente descrito se podrá observar la función de tendencia en color rojo y en la parte inferior, se podrá

observar el coeficiente de correlación y su respectiva fórmula para cada una de las regresiones que se seleccionen, véase la **Figura 52**. Además, en la parte inferior derecha del gráfico, se puede observar el límite de incumplimiento que se establece en el contrato de concesión para el indicador seleccionado previamente, así como la fecha probable de incumplimiento respecto al contrato de concesión. Es de anotar que esta fecha depende del tipo de regresión que se seleccione.



Figura 51. Lugar donde se debe seleccionar el kilómetro de interés para obtener la curva de deterioro del indicador seleccionado. **Fuente:** Elaboración propia

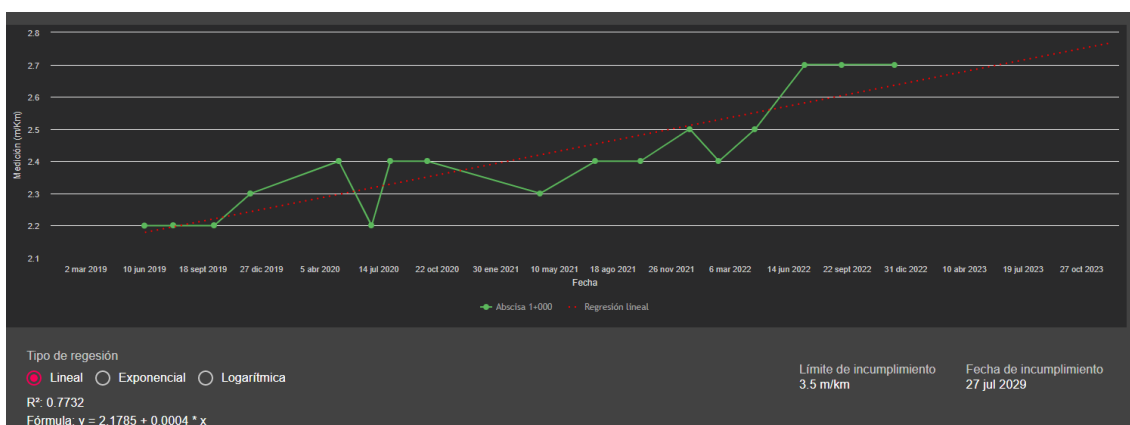


Figura 52. Curva de deterioro para el indicador IRI en el carril derecha de la calzada derecha en el kilómetro 1 y sus elementos. **Fuente:** Elaboración propia

Para el indicador IRI y de porcentaje de área afectada, se tienen unas opciones adicionales en la herramienta de visualización. Como se ha mencionado en el desarrollo de este proyecto, existen elementos que impactan la medición del indicador IRI, pues estos elementos generan alteraciones en el perfil longitudinal de manera que los valores de medición en estos puntos son altos y desde el punto de vista normativo no se deben tener en cuenta para efectos del cálculo del valor de medición por kilómetro para este indicador. Considerando lo anterior, en la parte superior izquierda del gráfico general, aparece una pestaña con el nombre “Singularidades”, la cual se puede seleccionar e inmediatamente aparecen en el gráfico los lugares en los que durante la ejecución de las mediciones se encontraron singularidades tales como resaltos, tapas de MH y juntas en puentes, entre otros. Para el indicador de porcentaje de área afectada y considerando el hecho de que todos los datos de medición obtenidos en campo para este indicador pasaron por un proceso de identificación de daños en dónde no solo se determinó el área en afectación en cada imagen tomada por las cámaras de alta resolución, sino que también se estableció a que tipo de daño pertenecía según el Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del INVIAS y Universidad Nacional, de manera que en la esquina inferior izquierda del gráfico general de los 50 kilómetros y en el que se observa la curva de deterioro por kilómetro-carril, se incorporó una opción, tal como se ve en la **Figura 53**, de visualizar la cantidad de daños de acuerdo a la tipología establecida por el manual del INVIAS que se tienen en el kilómetro-carril seleccionado. Esta información es relevante puesto que se pueden sacar conclusiones a la hora de priorizar mantenimientos en diferentes sectores debido a que cada tipo de daño tiene una evolución probable, por lo que si la mayoría de daños corresponden a pieles de cocodrilo lo más probable es que estos evolucionen de manera que se conviertan en baches, por lo que las intervenciones en los kilómetros y carriles que presenten este tipo de daños se deberían priorizar por encima de otros sectores en los que se presenten fisuras longitudinales en las que la evolución a bache se demorará más tiempo.

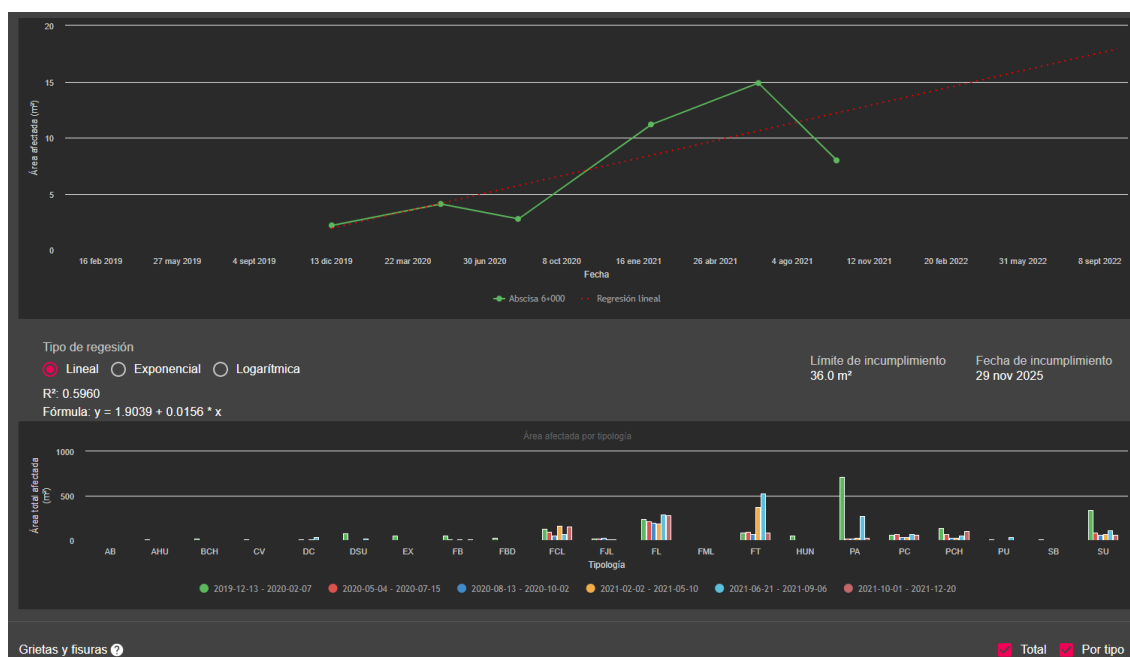


Figura 53. Curva de deterioro para el indicador % de área afectada en el carril derecho de la calzada derecha en el kilómetro 6 y sus elementos. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de la herramienta desarrollada, se lograron obtener las ecuaciones que describen el comportamiento del deterioro de cada indicador en cada uno de los kilómetros que componen el corredor objeto de estudio. No obstante, se presentó una gran dispersión en los datos, lo que dificultó la obtención de altos coeficientes de correlación que permitieran predecir con suma exactitud el momento de incumplimiento de los indicadores respecto al contrato de concesión. Esta dispersión pudo ser causada por distintos factores, como imprecisiones o prácticas inadecuadas en la toma de mediciones, así como intervenciones a la carpeta de rodadura que generan nuevos ciclos de deterioro en los sectores donde se realizaron y la falta de registro de algunas de estas intervenciones que han sido ejecutadas en el tiempo.

En este procedimiento se identificaron cinco grupos de comportamientos que se establecen en la **Tabla 13**.

8.1 Ecuaciones Para el Indicador IRI

Tal como se puede observar en la **Tabla 14**, para el indicador IRI, todos los kilómetros respecto al límite establecido en el contrato de concesión están en cumplimiento, es decir sus mediciones en el tiempo han estado por debajo de 3.5 m/km. Además, como en la mayoría de las regresiones sus datos de medición están en cumplimiento, no se considera que se llegue al incumplimiento en el corto plazo. Sin embargo, se debe tener bajo monitoreo constante sobre todos los carriles que están bajo el comportamiento del Grupo 1, pues en estos, la tendencia a llegar al incumplimiento es más rápida que en los otros carriles. Por otro lado, hay que hacer referencia sobre los carriles en donde el comportamiento de los datos sugiere el hecho de que existió algún tipo de intervención, pues en estos casos, como se ha mencionado anteriormente, se generan nuevos ciclos en el deterioro de manera que, se dificulta llegar a una conclusión precisa sobre la fecha de incumplimiento.

Tabla 13. Grupos de comportamientos identificados en las curvas de deterioro por kilómetro.

Grupo	Característica
1	Sectores en los que el comportamiento de los datos permite realizar la regresión de manera adecuada y por lo tanto se determina la fecha probable de incumplimiento.
2	Sectores en los que los datos muestran dispersión y las mediciones están en su mayoría en cumplimiento, de manera que la regresión entrega fechas muy alejadas para alcanzar el incumplimiento.
3	Sectores en los que los datos provenientes de la mediciones están en su mayoría en cumplimiento y su comportamiento genera que la regresión entregue fechas de incumplimiento en el pasado

4	Sectores en los que el comportamiento de los datos probablemente se vio afectado por intervenciones en la carpeta de rodadura, generando que la regresión entregue fechas de incumplimiento en el pasado
5	Sectores en los que se muestran algunos datos de medición en incumplimiento y su comportamiento genera que la regresión determine la fecha en la que se llegó al valor límite de cumplimiento

Es importante mencionar que, para este indicador, los hectómetros en los que se encontraron singularidades no se tuvieron en cuenta en el cálculo del IRI por kilómetro, pues en estos lugares se afecta la medición por alteraciones al perfil longitudinal de la vía y en caso de que se incluyeran en el cálculo, se tendrían valores más altos de IRI que probablemente entrarían en la faja de incumplimiento.

En términos generales se puede afirmar que para el indicador IRI, los 50 kilómetros en cada una de sus calzadas y carriles, cuentan con un comportamiento favorable al cumplimiento del límite establecido en el contrato de concesión y que llegar al incumplimiento en el corto plazo es poco probable, de manera que se puede afirmar además, que este indicador, con las mediciones realizadas hasta la fecha **no es un indicador crítico en el mantenimiento**, pues en las ecuaciones que se determinaron, se puede observar el tiempo que tendría que pasar para que los valores de ordenada alcancen el valor límite establecido en el contrato. Sin embargo, como solo se realizó en el análisis con 16 mediciones, es importante seguir con la toma de datos en campo de manera frecuente, con el fin de obtener más insumos que permitan determinar un comportamiento más ajustado a la realidad. Así mismo es fundamental llevar actualizada la bitácora de intervenciones, con fin de que estas sean un punto nuevo de partida en el deterioro, porque si los registros no están, el comportamiento de los datos se interpretará como dispersiones, dificultando la predicción de las fechas de incumplimiento.

Tabla 14. Resultados indicador IRI.

Indicador: IRI					
Km	Calzada	Carril	Ecuación	R2	Fecha de incumplimiento
1	Derecha	Derecho	$y = 2.1785 + 0.0004 * x$	0.773	27 de julio de 2029
		Izquierdo	$y = 1.9691 + 0.0 * x$	0.127	26 de marzo de 2126
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4078 + 0.0001 * x$	0.230	9 de agosto de 2061
		Izquierdo	$y = 2.0748 + 0.0002 * x$	0.673	17 de febrero de 2040
2	Derecha	Derecho	$y = 2.6097307 * e(1.2 * e-06 * x)$	0.0001	11 marzo de 2784
		Izquierdo	$y = 2.0135 + 0.0001 * x$	0.191	16 de agosto de 2071
	Izquierda	Derecho	$y = 3.9075 + -0.0011 * x$	0.800	26 de junio de 2020
		Izquierdo	$y = 3.3998 + -0.0008 * x$	0.789	2 de abril de 2019
3	Derecha	Derecho	$y = 2.149 + -0.0001 * x$	0.420	7 de julio de 1991
		Izquierdo	$y = 2.131 + -0.0001 * x$	0.146	15 de mayo de 1972
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6489182 * e(2.4 * e-06 * x)$	0.0027	20 de julio de 2339
		Izquierdo	$y = 2.5394 + -0.0001 * x$	0.365	3 de enero de 1994
4	Derecha	Derecho	$y = 1.7448 + 0.0001 * x$	0.346	21 de junio de 2081
		Izquierdo	$y = 1.6 + 0.0000 * x$	0.000	N/A
	Izquierda	Derecho	$y = 3.0775 + -0.0003 * x$	0.637	25 de diciembre de 2015
		Izquierdo	$y = 2.7245 + -0.0003 * x$	0.213	21 de abril de 2013
5	Derecha	Derecho	$y = 2.4756 + -0.0004 * x$	0.663	28 de octubre de 2011
		Izquierdo	$y = 2.6 + -0.0003 * x$	0.583	4 de febrero de 2012
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6965 + 0.0001 * x$	0.494	4 de octubre de 2035
		Izquierdo	$y = 2.4978 + 0.0001 * x$	0.1263	13 de enero de 2071
6	Derecha	Derecho	$y = 2.51699 * e(6.8 * e-05 * x)$	0.3519	16 de septiembre de 2032
		Izquierdo	$y = 2.7538704 * e(1.4 * e-06 * x)$	0.0002	27 de mayo de 2561
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5384031 * e(-0.000113 * x)$	0.5640	29 de agosto de 2011

		Izquierdo	$y = 2.1532 + -0.0002 * x$	0.3800	30 de junio de 2004
7	Derecha	Derecho	$y = 3.3232 + -0.0002 * x$	0.0984	20 de enero de 2017
		Izquierdo	$y = 3.2226 + -0.0003 * x$	0.2230	24 de abril de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 3.3482559 * e (4.81e-05 * x)$	0.0780	18 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = 2.8368 + 0.0004 * x$	0.1644	24 de junio de 2024
8	Derecha	Derecho	$y = 2.406 + 0.0001 * x$	0.2668	5 de julio de 2046
		Izquierdo	$y = 2.3559 + -0.0001 * x$	0.1495	8 de mayo de 1974
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4495 + 0.0001 * x$	0.6550	16 de octubre de 2040
		Izquierdo	$y = 1.9447 + 0.0001 * x$	0.3369	8 de agosto de 2092
9	Derecha	Derecho	$y = 2.147 + 0.0001 * x$	0.1541	27 de julio de 2076
		Izquierdo	$y = 2.0990765 * e (3.81e-05 * x)$	0.1347	28 de abril de 2056
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5678 + -0.0 * x$	0.0017	24 ene 1838
		Izquierdo	$y = 2.6977 + -0.0001 * x$	0.1261	26 de febrero de 2002
10	Derecha	Derecho	$y = 1.6212 + 0.0002 * x$	0.5626	15 de junio de 2051
		Izquierdo	$y = 1.580803 * e (6.7e-06 * x)$	0.0157	22 de abril de 2342
	Izquierda	Derecho	$y = 1.8884927 * e (0.000107 * x)$	0.6229	26 de marzo de 2035
		Izquierdo	$y = 1.9553137 * e (8.43e-05 * x)$	0.7424	23 de junio de 2038
11	Derecha	Derecho	$y = 1.7977 + -0.0 * x$	0.0100	15 jul 1825
		Izquierdo	$y = 1.5823708 * e (5.43e-05 * x)$	0.5069	5 de agosto de 2059
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2731 + -0.0001 * x$	0.2448	2 de mayo de 1976
		Izquierdo	$y = 1.9981 + -0.0001 * x$	0.3066	20 de marzo de 1972
12	Derecha	Derecho	$y = 1.8979763 * e (1.14e-05 * x)$	0.0230	11 de enero de 2167
		Izquierdo	$y = 1.7236423 * e (7e-06 * x)$	0.0104	31 de agosto de 2295
	Izquierda	Derecho	$y = 1.8801 + 0.0002 * x$	0.4993	27 de septiembre de 2048
		Izquierdo	$y = 1.8244238 * e (6.95e-05 * x)$	0.3820	4 de abril de 2045
13	Derecha	Derecho	$y = 3.3289 + 0.0 * x$	0.0105	26 de mayo de 2029
		Izquierdo	$y = 3.1744767 * e (-2.52e-05 * x)$	0.0649	13 de diciembre de 2008

	Izquierda	Derecho	$y = 2.099 + -0.0001 * x$	0.3208	29 de mayo de 1989
		Izquierdo	$y = 2.23 + -0.0001 * x$	0.2449	13 de enero de 1984
14	Derecha	Derecho	$y = 2.8689 + -0.0 * x$	0.1307	14 de septiembre de 1979
		Izquierdo	$y = 2.9151854 * e (-4.9e-06 * x)$	0.0524	29 de junio de 1917
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6678 + -0.0005 * x$	0.7120	29 de septiembre de 2014
		Izquierdo	$y = 2.5046 + -0.0005 * x$	0.7141	9 de agosto de 2013
15	Derecha	Derecho	$y = 2.0013665 * e(-5.7e-06 * x)$	0.0124	21 feb 1751
		Izquierdo	$y = 1.9 + 0.0 * x$	0.0000	N/A
	Izquierda	Derecho	$y = 1.5730262 * e(3.4e-06 * x)$	0.0027	25 de enero de 2657
		Izquierdo	$y = 1.64926 * e(-8.72e-05 * x)$	0.7811	13 de diciembre de 1995
16	Derecha	Derecho	$y = 2.0659 + 0.0 * x$	0.0255	20 de mayo de 2256
		Izquierdo	$y = 1.7631289 * e(5.1e-06 * x)$	0.0036	5 de abril de 2389
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4646016 * e(0.0001072 * x)$	0.8021	25 de mayo de 2028
		Izquierdo	$y = 2.4498307 * e(5.19e-05 * x)$	0.5554	29 de mayo de 2038
17	Derecha	Derecho	$y = 2.1412324 * e(2.56e-05 * x)$	0.1738	1 de febrero de 2072
		Izquierdo	$y = 1.8223 + -0.0 * x$	0.1535	21 de septiembre 1890
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6526 + -0.0001 * x$	0.2096	21 de agosto de 2002
		Izquierdo	$y = 1.8028258 * e (3.03e-05 * x)$	0.1985	9 de julio de 2079
18	Derecha	Derecho	$y = 2.0412 + -0.0001 * x$	0.4467	14 de agosto de 1990
		Izquierdo	$y = 1.8574802 * e (-2.83e-05 * x)$	0.1281	12 de marzo de 1958
	Izquierda	Derecho	$y = 2.9475 + -0.0001 * x$	0.0392	11 de abril de 1996
		Izquierdo	$y = 2.0295 + 0.0 * x$	0.0317	20 de septiembre de 2196
19	Derecha	Derecho	$y = 2.3041417 * e (4.05e-05 * x)$	0.3297	4 de septiembre de 2047
		Izquierdo	$y = 1.8468777 * e (2.7e-06 * x)$	0.0010	19 de noviembre de 2668
	Izquierda	Derecho	$y = 3.249 + -0.0006 * x$	0.8103	15 de mayo de 2018
		Izquierdo	$y = 3.0256 + -0.0006 * x$	0.6214	19 de julio de 2017
20	Derecha	Derecho	$y = 2.1013901 * e (0.0001158 * x)$	0.6894	3 de julio de 2031

	Izquierda	Izquierdo	$y = 1.854263 * e (6.44e-05 * x)$	0.2361	28 de julio de 2046
		Derecho	$y = 2.5511 + 0.0 * x$	0.0136	25 de mayo de 2104
		Izquierdo	$y = 2.2991435 * e (9.62e-05 * x)$	0.3899	13 de julio de 2031
21	Derecha	Derecho	$y = 2.0304 + -0.0001 * x$	0.3002	10 de septiembre de 1988
		Izquierdo	$y = 2.0796052 * e (3.9e-05 * x)$	0.4820	22 de febrero de 2056
	Izquierda	Derecho	$y = 2.1807198 * e (-1.59e-05 * x)$	0.0542	24 de noviembre de 1937
		Izquierdo	$y = 1.8235072 * e (9.57e-05 * x)$	0.3114	27 de marzo de 2038
22	Derecha	Derecho	$y = 2.1569 + 0.0 * x$	0.1018	28 de mayo de 2111
		Izquierdo	$y = 1.9112576 * e (-4.2e-06 * x)$	0.0165	3 de abril 1624
	Izquierda	Derecho	$y = 3.138154 * e (-0.0003637 * x)$	0.8892	14 de agosto de 2018
		Izquierdo	$y = 2.8376 + -0.0003 * x$	0.4397	3 de agosto de 2012
23	Derecha	Derecho	$y = 2.1234248 * e (-6.26e-05 * x)$	0.5719	28 de julio de 1997
		Izquierdo	$y = 2.2656 + 0.0 * x$	0.0183	30 de diciembre de 2243
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5805 + -0.0003 * x$	0.6214	3 de agosto de 2011
		Izquierdo	$y = 2.7393 + -0.0002 * x$	0.4710	5 de diciembre de 2005
24	Derecha	Derecho	$y = 2.5789 + -0.0003 * x$	0.7022	20 de junio de 2010
		Izquierdo	$y = 2.2408 + -0.0001 * x$	0.6341	16 de octubre de 1995
	Izquierda	Derecho	$y = 1.5669915 * e (7.75e-05 * x)$	0.7342	2 de noviembre de 2047
		Izquierdo	$y = 1.7688 + -0.0001 * x$	0.2359	30 de septiembre de 1951
25	Derecha	Derecho	$y = 2.6772 + -0.0004 * x$	0.3813	14 de enero de 2014
		Izquierdo	$y = 2.0911 + -0.0004 * x$	0.7341	15 de septiembre de 2008
	Izquierda	Derecho	$y = 2.0715186 * e (-6.03e-05 * x)$	0.3727	17 de agosto de 1995
		Izquierdo	$y = 1.9196 + -0.0001 * x$	0.3113	18 de octubre de 1976
26	Derecha	Derecho	$y = 2.3220348 * e (4.77e-05 * x)$	0.5335	24 de diciembre de 2042
		Izquierdo	$y = 2.019 + -0.0001 * x$	0.4518	4 de enero de 1969
	Izquierda	Derecho	$y = 2.1079 + 0.0001 * x$	0.0879	4 de junio de 2081
		Izquierdo	$y = 1.7352 + -0.0 * x$	0.0681	19 abr 1835

27	Derecha	Derecho	$y = 2.1724 + -0.0 * x$	0.0213	10 jun 1849
		Izquierdo	$y = 2.0720521 * e (4.93e-05 * x)$	0.4625	29 de agosto de 2048
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2528 + 0.0001 * x$	0.3999	1 de junio de 2060
		Izquierdo	$y = 1.9241 + 0.0001 * x$	0.1581	29 de noviembre de 2089
28	Derecha	Derecho	$y = 1.5215 + 0.0002 * x$	0.6608	29 de marzo de 2053
		Izquierdo	$y = 1.6608 + 0.0001 * x$	0.5069	23 de septiembre de 2068
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2492 + 0.0001 * x$	0.1481	19 de febrero de 2043
		Izquierdo	$y = 1.6122 + -0.0001 * x$	0.3250	3 de octubre de 1961
29	Derecha	Derecho	$y = 2.0054 + 0.0 * x$	0.0076	24 de junio de 2428
		Izquierdo	$y = 1.6402413 * e (2.74e-05 * x)$	0.1460	7 de abril de 2095
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2773 + 0.0002 * x$	0.4709	20 de septiembre de 2039
		Izquierdo	$y = 2.491947 * e (-8.6e-05 * x)$	0.4602	8 de octubre de 2008
30	Derecha	Derecho	$y = 2.3415 + -0.0 * x$	0.0291	8 may 1852
		Izquierdo	$y = 1.9967566 * e (7.6e-06 * x)$	0.0593	15 de septiembre de 2222
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5746 + -0.0002 * x$	0.4741	5 de octubre de 2004
		Izquierdo	$y = 2.2928566 * e (-3.92e-05 * x)$	0.1581	13 de enero de 1990
31	Derecha	Derecho	$y = 2.5156 + -0.0 * x$	0.0060	5 nov 1576
		Izquierdo	$y = 2.0937 + 0.0 * x$	N/A	N/A
	Izquierda	Derecho	$y = 2.1329933 * e (2.73e-05 * x)$	0.1331	8 de enero de 2069
		Izquierdo	$y = 1.8976894 * e (-4.63e-05 * x)$	0.1770	17 de mayo de 1983
32	Derecha	Derecho	$y = 2.1393 + 0.0 * x$	0.0647	23 de marzo de 2141
		Izquierdo	$y = 1.9009 + -0.0012 * \log(x)$	0.0074	N/A
	Izquierda	Derecho	$y = 2.0367704 * e (-1.1e-06 * x)$	0.0004	18 feb 718
		Izquierdo	$y = 1.8080257 * e (3.9e-06 * x)$	0.0071	24 de febrero de 2478
33	Derecha	Derecho	$y = 3.6677984 * e (-0.0002837 * x)$	0.8139	22 de noviembre de 2019
		Izquierdo	$y = 3.1403659 * e (-0.00021 * x)$	0.6938	1 de marzo de 2018
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6386709 * e (-9.1e-06 * x)$	0.0228	25 de diciembre de 1933

		Izquierdo	$y = 2.5202 + -0.0001 * x$	0.4184	14 de mayo de 1982
34	Derecha	Derecho	$y = 2.289 + -0.0 * x$	0.0001	12 dic 782
		Izquierdo	$y = 2.1034631 * e(3.94e-05 * x)$	0.2926	23 de diciembre de 2054
	Izquierda	Derecho	$y = 1.9511 + 0.0 * x$	0.2768	14 de diciembre de 2105
		Izquierdo	$y = 1.6916 + -0.006 * \log(x)$	0.0430	30 de julio de 2019
35	Derecha	Derecho	$y = 2.7108 + -0.0003 * x$	0.6721	6 de abril de 2013
		Izquierdo	$y = 2.3235969 * e(3.06e-05 * x)$	0.1334	20 de marzo de 2056
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4733841 * e(-1.8e-06 * x)$	0.0007	6 jul 1484
		Izquierdo	$y = 2.1948 + 0.0001 * x$	0.0867	20 de diciembre de 2080
36	Derecha	Derecho	$y = 1.9973675 * e(2.1e-06 * x)$	0.0024	22 de diciembre de 2761
		Izquierdo	$y = 1.7152 + -0.0 * x$	0.0524	26 nov 1676
	Izquierda	Derecho	$y = 2.056898 * e(1.5e-06 * x)$	0.0004	10 de noviembre de 3009
		Izquierdo	$y = 1.7633685 * e(1.61e-05 * x)$	0.0808	3 de mayo de 2136
37	Derecha	Derecho	$y = 2.9579609 * e(7e-05 * x)$	0.3394	6 de enero de 2026
		Izquierdo	$y = 2.7768 + 0.0005 * x$	0.5431	9 de abril de 2023
	Izquierda	Derecho	$y = 2.7246599 * e(8.11e-05 * x)$	0.3583	22 de noviembre de 2027
		Izquierdo	$y = 2.6009 + 0.0002 * x$	0.0991	29 de mayo de 2031
38	Derecha	Derecho	$y = 2.1187846 * e(-3.18e-05 * x)$	0.0650	3 de abril de 1976
		Izquierdo	$y = 2.4880334 * e(3.2e-06 * x)$	0.0014	17 de enero de 2313
	Izquierda	Derecho	$y = 2.9801587 * e(5.85e-05 * x)$	0.1103	19 de diciembre de 2026
		Izquierdo	$y = 2.603066 * e(6.52e-05 * x)$	0.0768	3 de enero de 2032
39	Derecha	Derecho	$y = 2.1938511 * e(-4e-06 * x)$	0.0125	11 dic 1701
		Izquierdo	$y = 2.3272664 * e(-8.95e-05 * x)$	0.7038	5 de febrero de 2007
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4351412 * e(4.11e-05 * x)$	0.2959	17 de agosto de 2043
		Izquierdo	$y = 2.1861515 * e(6.31e-05 * x)$	0.3288	29 de diciembre de 2039
40	Derecha	Derecho	$y = 2.6969 + -0.0035 * \log(x)$	0.0118	10 de junio de 2019
		Izquierdo	$y = 2.6283043 * e(-1.35e-05 * x)$	0.1011	17 de mayo de 1961

	Izquierda	Derecho	$y = 2.6926 + 0.0 * x$	0.0192	3 de julio de 2209
		Izquierdo	$y = 2.382 + 0.0001 * x$	0.1873	5 de octubre de 2071
41	Derecha	Derecho	$y = 2.405869 * e(3.8e-06 * x)$	0.0025	14 de julio de 2286
		Izquierdo	$y = 2.3225 + -0.0001 * x$	0.3271	5 de enero de 1982
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4162823 * e(-3.4e-05 * x)$	0.1304	23 de agosto de 1989
		Izquierdo	$y = 2.1896 + -0.0 * x$	0.1207	7 de septiembre de 1936
42	Derecha	Derecho	$y = 2.1819 + 0.0003 * x$	0.8358	29 de julio de 2030
		Izquierdo	$y = 2.0814 + 0.0002 * x$	0.7688	20 de febrero de 2038
	Izquierda	Derecho	$y = 2.3246 + -0.0002 * x$	0.6816	1 de enero de 2003
		Izquierdo	$y = 2.2534947 * e(-6.16e-05 * x)$	0.5799	10 de enero de 2000
43	Derecha	Derecho	$y = 1.8636524 * e(0.0001271 * x)$	0.8086	3 de enero de 2033
		Izquierdo	$y = 1.8462 + 0.0001 * x$	0.3197	28 de octubre de 2066
	Izquierda	Derecho	$y = 2.786501 * e(-0.0001141 * x)$	0.6744	20 de diciembre de 2013
		Izquierdo	$y = 2.698431 * e(-1.02e-05 * x)$	0.0407	29 de octubre de 1949
44	Derecha	Derecho	$y = 1.8855642 * e(4.07e-05 * x)$	0.4528	28 de enero de 2061
		Izquierdo	$y = 1.6514 + 0.0001 * x$	0.3765	15 de mayo de 2094
	Izquierda	Derecho	$y = 3.2054 + -0.0002 * x$	0.6255	9 de diciembre de 2015
		Izquierdo	$y = 2.6896 + -0.0002 * x$	0.3921	2 de octubre de 2006
45	Derecha	Derecho	$y = 2.4090638 * e(4.68e-05 * x)$	0.3074	18 de abril de 2041
		Izquierdo	$y = 2.1802 + 0.0 * x$	0.0845	17 de julio de 2106
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2639877 * e(4.6e-06 * x)$	0.0055	7 de junio de 2280
		Izquierdo	$y = 2.0947 + 0.0 * x$	0.1111	20 de marzo de 2155
46	Derecha	Derecho	$y = 2.0939 + 0.0001 * x$	0.5980	24 de enero de 2054
		Izquierdo	$y = 1.9584294 * e(1.85e-05 * x)$	0.1323	22 de septiembre de 2105
	Izquierda	Derecho	$y = 2.3619 + 0.0001 * x$	0.3643	16 de junio de 2044
		Izquierdo	$y = 2.1928945 * e(9.7e-06 * x)$	0.1172	18 de octubre de 2151
47	Derecha	Derecho	$y = 2.0939 + 0.0001 * x$	0.7184	13 de marzo de 2057

	Izquierda	Izquierdo	$y = 2.0909524 * e(7.14e-05 * x)$	0.6031	26 de abril de 2039
		Derecho	$y = 2.1412432 * e(2.13e-05 * x)$	0.0804	16 de julio de 2082
		Izquierdo	$y = 1.8257 + 0.0001 * x$	0.2949	13 de abril de 2071
48	Derecha	Derecho	$y = 2.0870666 * e(4.43e-05 * x)$	0.6048	4 de junio de 2051
		Izquierdo	$y = 2.2104535 * e(4.13e-05 * x)$	0.2873	2 de enero de 2050
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4636418 * e(5.91e-05 * x)$	0.6388	17 de septiembre de 2035
		Izquierdo	$y = 2.4058358 * e(8.5e-06 * x)$	0.0418	19 de octubre de 2139
49	Derecha	Derecho	$y = 3.2001 + -0.0004 * x$	0.6720	21 de marzo de 2017
		Izquierdo	$y = 3.0975434 * e(-0.0001497 * x)$	0.7096	6 de mayo de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 3.595 + -0.001 * x$	0.8651	8 de septiembre de 2019
		Izquierdo	$y = 3.5429 + -0.001 * x$	0.8180	12 de septiembre de 2019
50	Derecha	Derecho	$y = 2.9097539 * e(-9.84e-05 * x)$	0.6012	21 de abril de 2014
		Izquierdo	$y = 2.9263113 * e(-4.1e-06 * x)$	0.0042	18 de diciembre de 1900
	Izquierda	Derecho	$y = 2.7752 + 0.0 * x$	0.0282	24 de enero de 2086
		Izquierdo	$y = 2.3276049 * e(0.0001164 * x)$	0.7045	3 de marzo de 2029

8.2 Ecuaciones Para el Indicador Ahuellamiento

Teniendo en cuenta que la unidad de medida de este indicador son milímetros, es importante considerar la posibilidad de que durante la ejecución de las mediciones existan circunstancias que afecten los resultados, puesto que como la unidad de medida es tan pequeña que se vuelve muy sensible a la hora de tomar las mediciones. Se menciona lo anterior con el fin de generar una reflexión acerca de la variación de los datos en el tiempo, pues los resultados de ahuellamiento en un mismo punto cambian en algunos milímetros cada vez que se realiza una medición, algunas veces los datos de profundidad de deformación son mayores y en algunos casos menores. De acuerdo con la unidad de medida de este indicador, estas variaciones podrían ser normales. Ahora bien, para este indicador se observa cómo todos

los carriles presentan cumplimiento respecto al contrato de concesión pues los resultados son menores al límite establecido que corresponde a 25mm en cada una de las huellas, tal como lo ilustra el comportamiento de las ecuaciones que se muestran en la **Tabla 15**

De manera similar al IRI, existen ciertos carriles en los que el comportamiento de los datos podría sugerir que en un determinado momento se realizaron intervenciones que modificaran del comportamiento del indicador en el tiempo, generando un nuevo origen de deterioro y a su vez, dispersión en los datos. Sin embargo, la mayoría de los carriles por kilómetro y calzada, se comportaron según lo establecido en los Grupos 2,3 y 4, dando un idea respecto al comportamiento de los datos en el tiempo y su posible deterioro, por lo que se puede decir que en términos generales para el indicador Ahuellamiento, los 50 kilómetros en cada una de sus calzadas y carriles, cuentan con un comportamiento favorable al cumplimiento del límite establecido en el contrato de concesión y que llegar al incumplimiento en el corto plazo es poco probable, de manera que se puede afirmar además, que este indicador, con las mediciones realizadas hasta la fecha **no es un indicador crítico en el mantenimiento**, pues en las ecuaciones que se determinaron, se puede observar el tiempo que tendría que pasar para que los valores de ordenada alcancen el valor límite establecido en el contrato. Sin embargo, como solo se realizó en el análisis con 10 mediciones, es importante seguir con la toma de datos en campo de manera frecuente, con el fin de obtener más insumos que permitan determinar un comportamiento más ajustado a la realidad. Así mismo es fundamental llevar actualizada la bitácora de intervenciones, con fin de que estas sean un punto nuevo de partida en el deterioro, porque si los registros no están, el comportamiento de los datos se interpretará como dispersiones, dificultando la predicción de las fechas de incumplimiento.

Es importante mencionar que para este indicador no se obtuvieron carriles que se comportaran según lo establecido en el Grupo 1, lo que refuerza la afirmación de que este indicador no es crítico en el mantenimiento puesto que el comportamiento de los datos no tiende al deterioro en el corto plazo.

Tabla 15. Resultados indicador Ahuellamiento.

Indicador: Ahuellamiento					
Km	Calzada	Carril	Ecuación	R2	Fecha de incumplimiento
1	Derecha	Derecho	$y = 3.004 + 0.0002 * x$	0.014	23 de enero de 2276
		Izquierdo	$y = 2.8066 + 0.0004 * x$	0.055	9 de junio de 2182
	Izquierda	Derecho	$y = 2.3372 + 0.0011 * x$	0.212	3 de diciembre de 2071
		Izquierdo	$y = 2.5983 + -0.0001 * x$	0.0078	6 de enero de 1463
2	Derecha	Derecho	$y = 3.0455 + 0.0008 * x$	0.1004	5 de septiembre de 2092
		Izquierdo	$y = 2.0702 + 0.0004 * x$	0.152	15 de noviembre de 2158
	Izquierda	Derecho	$y = 2.7634 + 0.0001 * x$	0.018	12 de julio de 2440
		Izquierdo	$y = 2.6657 + -0.0 * x$	0.0002	25 de noviembre 1773
3	Derecha	Derecho	$y = 3.6995 + -0.0001 * x$	0.007	16 de agosto de 1514
		Izquierdo	$y = 2.8822 + 0.0001 * x$	0.0026	10 de septiembre de 2735
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2891 + 0.0004 * x$	0.062	27 de julio de 2185
		Izquierdo	$y = 2.081 + 0.0002 * x$	0.023	5 de agosto de 2326
4	Derecha	Derecho	$y = 1.468 + 0.0009 * x$	0.496	7 de diciembre de 2090
		Izquierdo	$y = 2.1878 + -0.0 * x$	0.0002	17 de abril de 1591
	Izquierda	Derecho	$y = 2.6675 + 0.0002 * x$	0.052	28 de mayo de 2365
		Izquierdo	$y = 2.8037 + 0.0 * x$	0.0027	3 de enero de 3264
5	Derecha	Derecho	$y = 2.4375 + 0.0006 * x$	0.254	24 de diciembre de 2115
		Izquierdo	$y = 2.4283 + 0.0004 * x$	0.066	5 de julio de 2186
	Izquierda	Derecho	$y = 2.3829 + 0.0013 * x$	0.247	20 de diciembre de 2064
		Izquierdo	$y = 3.2763 + -0.0005 * x$	0.075	12 de agosto de 1904
6	Derecha	Derecho	$y = 1.7903 + 0.001 * x$	0.390	19 de abril de 2078
		Izquierdo	$y = 1.8536 + 0.0009 * x$	0.334	7 de octubre de 2085
	Izquierda	Derecho	$y = 3.0151 + 0.0003 * x$	0.034	7 de marzo de 2214
		Izquierdo	$y = 2.7698 + 0.0004 * x$	0.033	5 de marzo de 2179

7	Derecha	Derecho	$y = 3.4296 + 0.0015 * x$	0.265	15 de agosto de 2057
		Izquierdo	$y = 1.8617 + 0.001 * x$	0.354	18 de abril de 2079
	Izquierda	Derecho	$y = 3.522 + 0.0002 * x$	0.043	10 de marzo de 2355
		Izquierdo	$y = 3.1103 + 0.001 * x$	0.205	13 de mayo de 2080
8	Derecha	Derecho	$y = 3.5875 + -0.0005 * x$	0.134	5 de agosto 1897
		Izquierdo	$y = 1.5901 + 0.0001 * x$	0.023	4 de enero de 2666
	Izquierda	Derecho	$y = 3.2744 + 0.0007 * x$	0.428	14 de febrero de 2097
		Izquierdo	$y = 3.3098 + 0.0003 * x$	0.056	14 de octubre de 2208
9	Derecha	Derecho	$y = 1.4549 + 0.0015 * x$	0.509	29 de marzo de 2061
		Izquierdo	$y = 2.6649 + 0.0002 * x$	0.023	22 de noviembre de 2412
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5772 + 0.0002 * x$	0.069	3 de junio de 2383
		Izquierdo	$y = 2.0823 + 0.0007 * x$	0.219	6 de diciembre de 2108
10	Derecha	Derecho	$y = 3.7852 + 0.0004 * x$	0.027	2 de enero de 2180
		Izquierdo	$y = 2.171 + 0.0014 * x$	0.594	14 de julio de 2062
	Izquierda	Derecho	$y = 2.8287 + 0.0001 * x$	0.0059	13 de octubre de 2422
		Izquierdo	$y = 2.5388 + -0.0003 * x$	0.035	10 de diciembre de 1807
11	Derecha	Derecho	$y = 3.7366 + 0.0007 * x$	0.071	29 de diciembre de 2101
		Izquierdo	$y = 2.9265 + 0.0013 * x$	0.708	24 de noviembre de 2064
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2754 + 0.0 * x$	0.000	2 de marzo de 8293
		Izquierdo	$y = 1.899 + -0.0 * x$	0.0006	19 de mayo de 158
12	Derecha	Derecho	$y = 2.327 + 0.0008 * x$	0.251	5 de septiembre de 2097
		Izquierdo	$y = 1.1499 + 0.0011 * x$	0.544	1 de diciembre de 2075
	Izquierda	Derecho	$y = 2.1023 + 0.0009 * x$	0.277	9 de mayo de 2090
		Izquierdo	$y = 1.9493 + 0.0005 * x$	0.084	11 de septiembre de 2148
13	Derecha	Derecho	$y = 5.4512 + -0.0015 * x$	0.445	10 de agosto de 1982
		Izquierdo	$y = 0.515 + 0.0007 * x$	0.544	12 de junio de 2107
	Izquierda	Derecho	$y = 1.7985 + 0.0005 * x$	0.492	21 de octubre de 2136

		Izquierdo	$y = 1.6439 + 0.0009 * x$	0.321	13 de diciembre de 2088
14	Derecha	Derecho	$y = 3.6593 + -0.0008 * x$	0.292	14 de agosto de 1941
		Izquierdo	$y = 1.2724 + -0.0002 * x$	0.084	3 de noviembre de 1737
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2208 + 0.0 * x$	0.0003	10 de agosto de 6005
		Izquierdo	$y = 1.9665 + 0.0002 * x$	0.046	4 de julio de 2279
15	Derecha	Derecho	$y = 2.01 + -0.0001 * x$	0.009	17 de agosto de 1561
		Izquierdo	$y = 1.6914 + 0.0001 * x$	0.019	8 de noviembre de 2825
	Izquierda	Derecho	$y = 2.0084 + 0.0003 * x$	0.076	23 de febrero de 2262
		Izquierdo	$y = 1.3159 + 0.0012 * x$	0.337	1 de julio de 2073
16	Derecha	Derecho	$y = 3.9957 + -0.0007 * x$	0.221	5 de junio de 1929
		Izquierdo	$y = 0.754 + 0.0004 * x$	0.393	14 de abril de 2167
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5131 + 0.0007 * x$	0.2035	11 de febrero de 2109
		Izquierdo	$y = 1.9617 + 0.0013 * x$	0.551	2 de agosto de 2067
17	Derecha	Derecho	$y = 4.742 + -0.0013 * x$	0.731	28 de octubre de 1975
		Izquierdo	$y = 0.647 + 0.0005 * x$	0.372	4 de febrero de 2139
	Izquierda	Derecho	$y = 1.4846 + 0.0007 * x$	0.185	15 de diciembre de 2115
		Izquierdo	$y = 1.621 + 0.0 * x$	0.0004	21 de agosto de 5476
18	Derecha	Derecho	$y = 5.5749 + -0.0012 * x$	0.497	11 de noviembre de 1974
		Izquierdo	$y = 0.1395 + 0.0004 * x$	0.252	6 de mayo de 2180
	Izquierda	Derecho	$y = 1.8853 + 0.0003 * x$	0.253	25 de abril de 2204
		Izquierdo	$y = 1.4986 + 0.0009 * x$	0.276	18 de septiembre de 2088
19	Derecha	Derecho	$y = 4.8012 + -0.0003 * x$	0.032	9 de marzo de 1833
		Izquierdo	$y = 0.1059 + 0.001 * x$	0.514	27 de julio de 2086
	Izquierda	Derecho	$y = 2.7566 + 0.0001 * x$	0.011	4 de mayo de 2624
		Izquierdo	$y = 2.2745 + 0.0006 * x$	0.173	20 de septiembre de 211
20	Derecha	Derecho	$y = 5.3499 + -0.0008 * x$	0.172	18 de julio de 1952
		Izquierdo	$y = 0.3326 + 0.0007 * x$	0.304	7 de diciembre de 2120

	Izquierda	Derecho	$y = 2.96 + 0.0001 * x$	0.046	30 de noviembre de 2467
		Izquierdo	$y = 2.2148 + 0.0011 * x$	0.464	23 de febrero de 2073
21	Derecha	Derecho	$y = 1.1332 + 0.0006 * x$	0.219	13 de febrero de 2119
		Izquierdo	$y = 1.5597 + 0.0008 * x$	0.224	28 de enero de 2097
	Izquierda	Derecho	$y = 2.0894 + 0.0004 * x$	0.393	29 de mayo de 2180
		Izquierdo	$y = 1.3756 + 0.0014 * x$	0.394	25 de agosto de 2064
22	Derecha	Derecho	$y = 2.651 + -0.0005 * x$	0.040	23 de octubre de 1895
		Izquierdo	$y = 1.7549 + 0.001 * x$	0.390	13 de marzo de 2081
	Izquierda	Derecho	$y = 4.6116 + -0.0008 * x$	0.308	20 de diciembre de 1948
		Izquierdo	$y = 4.3391 + -0.0006 * x$	0.242	27 de marzo de 1930
23	Derecha	Derecho	$y = 1.8141 + 0.0004 * x$	0.057	5 de julio de 2193
		Izquierdo	$y = 0.6984 + 0.0013 * x$	0.5611	13 de mayo de 2070
	Izquierda	Derecho	$y = 3.4003 + -0.0003 * x$	0.062	25 de diciembre de 1839
		Izquierdo	$y = 2.9761 + -0.0001 * x$	0.0019	30 de mayo de 893
24	Derecha	Derecho	$y = 3.0518 + -0.0004 * x$	0.061	9 de enero de 1869
		Izquierdo	$y = 0.655 + 0.0011 * x$	0.608	6 de junio de 2076
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4881 + -0.0007 * x$	0.172	7 de marzo de 1930
		Izquierdo	$y = 1.9885 + 0.0002 * x$	0.0063	5 de febrero de 2356
25	Derecha	Derecho	$y = 3.6966 + -0.0005 * x$	0.136	22 de mayo de 1909
		Izquierdo	$y = 1.4774 + 0.0007 * x$	0.410	9 de junio de 2107
	Izquierda	Derecho	$y = 3.0715 + -0.0012 * x$	0.461	8 de junio de 1969
		Izquierdo	$y = 2.3137 + 0.0 * x$	0.0001	4 de septiembre de 6907
26	Derecha	Derecho	$y = 2.5864 + -0.0007 * x$	0.0733	7 de diciembre de 1924
		Izquierdo	$y = 1.2843 + 0.0009 * x$	0.429	29 de mayo de 2093
	Izquierda	Derecho	$y = 3.913 + -0.0019 * x$	0.658	12 de julio de 1986
		Izquierdo	$y = 2.6711 + 0.0001 * x$	0.0025	13 de abril de 2642
27	Derecha	Derecho	$y = 2.6035 + -0.0004 * x$	0.139	30 de septiembre de 1843

	Izquierda	Izquierdo	$y = 0.906 + 0.0004 * x$	0.263	20 de diciembre de 2165
		Derecho	$y = 5.1631 + -0.0028 * x$	0.619	18 de febrero de 1998
		Izquierdo	$y = 4.1962 + -0.0014 * x$	0.183	6 de septiembre de 1975
28	Derecha	Derecho	$y = 2.4019 + 0.0006 * x$	0.104	7 de julio de 2113
		Izquierdo	$y = 1.1696 + 0.0011 * x$	0.249	30 de septiembre de 2074
	Izquierda	Derecho	$y = 4.0688 + -0.0017 * x$	0.612	15 de noviembre de 1982
		Izquierdo	$y = 3.3605 + -0.0003 * x$	0.025	5 de junio de 1841
29	Derecha	Derecho	$y = 3.9651 + 0.0004 * x$	0.101	17 de junio de 2153
		Izquierdo	$y = 1.024 + 0.0006 * x$	0.303	24 de enero de 2128
	Izquierda	Derecho	$y = 2.5638 + -0.0003 * x$	0.164	20 de abril de 1826
		Izquierdo	$y = 2.3014 + 0.0004 * x$	0.063	9 de noviembre de 2156
30	Derecha	Derecho	$y = 5.4883 + 0.0002 * x$	0.082	3 de junio de 2237
		Izquierdo	$y = 1.895 + 0.0005 * x$	0.190	23 de marzo de 2141
	Izquierda	Derecho	$y = 3.1266 + 0.0001 * x$	0.0079	12 de marzo de 2508
		Izquierdo	$y = 2.3444 + 0.0011 * x$	0.183	30 de abril de 2076
31	Derecha	Derecho	$y = 3.6706 + 0.0002 * x$	0.0137	4 de diciembre de 2329
		Izquierdo	$y = 1.5921 + 0.0007 * x$	0.276	22 de abril de 2110
	Izquierda	Derecho	$y = 3.2253 + 0.0006 * x$	0.151	13 de abril de 2111
		Izquierdo	$y = 2.8674 + 0.0004 * x$	0.060	24 de septiembre de 2165
32	Derecha	Derecho	$y = 4.2485 + 0.0012 * x$	0.130	20 de febrero de 2065
		Izquierdo	$y = 2.0191 + 0.0 * x$	0.0022	23 de mayo de 3546
	Izquierda	Derecho	$y = 3.14 + 0.0019 * x$	0.507	5 de agosto de 2049
		Izquierdo	$y = 3.6977 + 0.0001 * x$	0.0061	29 de marzo de 2445
33	Derecha	Derecho	$y = 6.0748 + -0.0016 * x$	0.4437	14 de junio de 1985
		Izquierdo	$y = 2.2133 + -0.0004 * x$	0.168	2 de octubre de 1867
	Izquierda	Derecho	$y = 3.9845 + 0.0003 * x$	0.020	14 de enero de 2207
		Izquierdo	$y = 4.0559 + -0.0004 * x$	0.078	1 de noviembre 1859

34	Derecha	Derecho	$y = 5.1122 + -0.0002 * x$	0.011	6 de diciembre de 1784
		Izquierdo	$y = 2.3786 + 0.0004 * x$	0.186	23 de febrero de 2156
	Izquierda	Derecho	$y = 3.4498 + 0.0007 * x$	0.102	20 de octubre de 2105
		Izquierdo	$y = 3.4016 + 0.0002 * x$	0.015	27 de marzo de 2260
35	Derecha	Derecho	$y = 5.2839 + 0.0005 * x$	0.157	3 de febrero de 2130
		Izquierdo	$y = 2.2285 + 0.0001 * x$	0.030	18 de marzo de 2436
	Izquierda	Derecho	$y = 2.9509 + 0.0009 * x$	0.224	28 de junio de 2084
		Izquierdo	$y = 3.1178 + 0.0001 * x$	0.0031	9 de abril de 2780
36	Derecha	Derecho	$y = 5.2904 + 0.0008 * x$	0.133	21 de noviembre de 2087
		Izquierdo	$y = 1.9874 + 0.0008 * x$	0.509	21 de marzo de 2097
	Izquierda	Derecho	$y = 2.2881 + 0.0012 * x$	0.396	3 de febrero de 2069
		Izquierdo	$y = 2.5984 + 0.0002 * x$	0.009	28 de agosto de 2385
37	Derecha	Derecho	$y = 4.2761 + -0.0 * x$	0.0013	10 de marzo de 448
		Izquierdo	$y = 1.3314 + 0.0009 * x$	0.270	18 de abril de 2087
	Izquierda	Derecho	$y = 2.66 + 0.0007 * x$	0.262	17 de octubre de 2099
		Izquierdo	$y = 2.4708 + 0.0005 * x$	0.091	5 de mayo de 2141
38	Derecha	Derecho	$y = 5.6647 + -0.0028 * x$	0.332	23 de octubre de 1998
		Izquierdo	$y = 2.3944 + 0.001 * x$	0.383	26 de abril de 2081
	Izquierda	Derecho	$y = 2.4185 + 0.0007 * x$	0.356	10 de mayo de 2103
		Izquierdo	$y = 2.6007 + 0.0002 * x$	0.016	2 de junio de 2333
39	Derecha	Derecho	$y = 6.1828 + -0.003 * x$	0.29	27 de abril de 2000
		Izquierdo	$y = 0.6472 + 0.001 * x$	0.328	9 de mayo de 2087
	Izquierda	Derecho	$y = 3.4177 + 0.001 * x$	0.101	15 de marzo de 2076
		Izquierdo	$y = 4.0883 + -0.0009 * x$	0.107	11 de junio de 1951
40	Derecha	Derecho	$y = 4.0588 + 0.0001 * x$	0.015	22 de diciembre de 2461
		Izquierdo	$y = 0.7656 + 0.0004 * x$	0.453	10 de mayo de 2171

	Izquierda	Derecho	$y = 1.6666 + 0.0025 * x$	0.551	29 de agosto de 2042
		Izquierdo	$y = 2.6673 + 0.0001 * x$	0.0038	9 de febrero de 2497
41	Derecha	Derecho	$y = 2.5592 + 0.0005 * x$	0.440	1 de marzo de 2132
		Izquierdo	$y = 0.8944 + 0.0007 * x$	0.438	24 de diciembre de 2105
	Izquierda	Derecho	$y = 1.4666 + 0.0021 * x$	0.506	11 de septiembre de 2048
		Izquierdo	$y = 3.2389 + -0.0002 * x$	0.010	23 de junio de 1773
42	Derecha	Derecho	$y = 1.8286 + 0.0011 * x$	0.567	18 de junio de 2073
		Izquierdo	$y = 1.5924 + 0.0009 * x$	0.423	19 de septiembre de 2091
	Izquierda	Derecho	$y = 1.8545 + 0.0001 * x$	0.027	26 de noviembre de 2549
		Izquierdo	$y = 1.7983 + -0.0 * x$	0.0014	31 de mayo de 1022
43	Derecha	Derecho	$y = 1.8727 + 0.0008 * x$	0.327	4 de diciembre de 2098
		Izquierdo	$y = 1.3506 + 0.0004 * x$	0.155	9 de junio de 2162
	Izquierda	Derecho	$y = 1.1438 + 0.0008 * x$	0.381	23 de diciembre de 2099
		Izquierdo	$y = 1.5216 + -0.0002 * x$	0.053	14 de septiembre 1677
44	Derecha	Derecho	$y = 2.021 + 0.0007 * x$	0.4356	11 de junio de 2105
		Izquierdo	$y = 0.9302 + 0.0007 * x$	0.235	20 de octubre de 2106
	Izquierda	Derecho	$y = 1.5887 + 0.0006 * x$	0.069	27 de junio de 2130
		Izquierdo	$y = 1.9643 + -0.0007 * x$	0.130	15 de diciembre de 1923
45	Derecha	Derecho	$y = 2.9677 + 0.001 * x$	0.294	11 de mayo de 2078
		Izquierdo	$y = 0.746 + 0.0008 * x$	0.491	14 de noviembre de 2099
	Izquierda	Derecho	$y = 0.8883 + 0.001 * x$	0.291	29 de enero de 2086
		Izquierdo	$y = 1.6835 + -0.0006 * x$	0.154	21 de julio de 1907
46	Derecha	Derecho	$y = 1.766 + 0.0014 * x$	0.760	6 de noviembre de 2061
		Izquierdo	$y = 1.1162 + 0.0007 * x$	0.359	19 de febrero de 2110
	Izquierda	Derecho	$y = 1.9052 + 0.0012 * x$	0.207	16 de noviembre de 2069

		Izquierdo	$y = 2.6248 + -0.0004 * x$	0.028	3 de marzo de 1869
47	Derecha	Derecho	$y = 3.7883 + 0.0007 * x$	0.328	31 de marzo de 2102
		Izquierdo	$y = 0.972 + 0.001 * x$	0.638	30 de marzo de 2081
	Izquierda	Derecho	$y = 0.6728 + 0.0012 * x$	0.607	28 de abril de 2071
		Izquierdo	$y = 1.1464 + 0.0003 * x$	0.074	22 de febrero de 2231
48	Derecha	Derecho	$y = 4.1873 + 0.0004 * x$	0.201	6 de marzo de 2150
		Izquierdo	$y = 1.2189 + 0.0009 * x$	0.440	26 de septiembre de 2086
	Izquierda	Derecho	$y = 1.9976 + 0.0005 * x$	0.182	23 de marzo de 2156
		Izquierdo	$y = 1.8528 + 0.0 * x$	0.000	6 de marzo 21027
49	Derecha	Derecho	$y = 4.4397 + 0.0004 * x$	0.100	25 de abril de 2174
		Izquierdo	$y = 2.7098 + 0.0004 * x$	0.2447	3 de julio de 2189
	Izquierda	Derecho	$y = 4.5305 + -0.0012 * x$	0.227	25 de agosto de 1971
		Izquierdo	$y = 2.5319 + 0.0004 * x$	0.105	25 de julio de 2160
50	Derecha	Derecho	$y = 3.8977 + -0.0 * x$	0.0017	25 de marzo de 191
		Izquierdo	$y = 2.4797 + 0.0003 * x$	0.0433	1 de diciembre de 2250
	Izquierda	Derecho	$y = 3.1611 + 0.0006 * x$	0.055	9 de julio de 2111
		Izquierdo	$y = 2.2489 + 0.0006 * x$	0.085	10 de octubre de 2125

8.3 Ecuaciones Para el Indicador Fricción (CRD)

De manera similar a los indicadores IRI y Ahuellamiento. Este indicador muestra en el comportamiento de la mayoría de los datos una tendencia al cumplimiento del límite establecido en el contrato de concesión que corresponde a 45. Es decir, las ecuaciones presentadas en la tabla 16, en su mayoría el primer término o bien conocido como la constante, está por encima de este límite y los valores que acompañan el siguiente término son muy pequeños de manera que la probabilidad de que se necesite una intervención general para este indicador en específico en el corto plazo es muy poco probable. Sin embargo, se debe tener

bajo monitoreo constante sobre todos los carriles que están bajo el comportamiento del Grupo 1, pues en estos la tendencia a llegar al incumplimiento es más rápida que en los otros carriles con otros grupos de comportamiento.

Por otro lado, es importante resaltar que la mayoría de los datos de medición pertenecientes a cada uno de los carriles que componen los 50 kilómetros, se encuentran dentro del comportamiento establecido en el Grupo 2, de manera que los resultados de las mediciones están en su mayoría en cumplimiento y estos a su vez, generan un comportamiento en el que la regresión arroja la fecha de incumplimiento en el pasado, es decir el indicador está tendiendo a mejorar en el tiempo y no a deteriorarse. Este comportamiento también fue muy común para el indicador ahuellamiento y es probable que como lo fue para este, que las intervenciones hayan causado un impacto que finalmente generara este resultado, pues cuando se realizan estas actividades, comienza un nuevo inicio en el deterioro, de manera que las mediciones que se realizan tienden a mejorar el comportamiento del deterioro del indicador.

A pesar de que se debe tener un monitoreo especial y constante en los pocos carriles que se comportan de manera consecuente con lo establecido para el Grupo 1, es posible afirmar que en términos generales para el indicador Fricción, los 50 kilómetros en cada una de sus calzadas y carriles, cuentan con un comportamiento favorable al cumplimiento del límite establecido en el contrato de concesión y que llegar al incumplimiento en el corto plazo, para la mayoría de los carriles es poco probable, de manera que se puede afirmar además, que este indicador, con las mediciones realizadas hasta la fecha **no es un indicador crítico en el mantenimiento**, pues en las ecuaciones que se determinaron y se clasificaron como pertenecientes al Grupo 2, se puede observar el tiempo que tendría que pasar para que los valores de ordenada alcancen el valor límite establecido en el contrato. Sin embargo, como solo se realizó en el análisis con 10 mediciones, es importante seguir con la toma de datos en campo de manera frecuente, con el fin de obtener más insumos que permitan determinar un comportamiento más ajustado a la realidad. Así mismo es fundamental llevar actualizada la

bitácora de intervenciones, con fin de que estas sean un punto nuevo de partida en el deterioro, porque si los registros no están, el comportamiento de los datos se interpretará como dispersiones, dificultando la predicción de las fechas de incumplimiento.

Tabla 16. Resultados indicador Fricción.

Indicador: Fricción (CRD)					
Km	Calzada	Carril	Ecuación	R2	Fecha de incumplimiento
1	Derecha	Derecho	$y = 65.9028 + -0.0039 * x$	0.148	15 de abril de 2032
		Izquierdo	$y = 65.1472 + -0.0046 * x$	0.284	21 de junio de 2019
	Izquierda	Derecho	$y = 56.7832 + 0.006 * x$	0.139	11 de febrero de 2012
		Izquierdo	$y = 69.6647 + -0.0076 * x$	0.291	28 de abril de 2026
2	Derecha	Derecho	$y = 67.5299 + -0.0068 * x$	0.514	6 de julio de 2026
		Izquierdo	$y = 65.4587 + -0.0019 * x$	0.033	22 de marzo de 2026
	Izquierda	Derecho	$y = 56.6545 + 0.0107 * x$	0.340	4 julio de 2014
		Izquierdo	$y = 60.6709 + 0.0035 * x$	0.053	3 de marzo de 2005
3	Derecha	Derecho	$y = 72.4208 + -0.0071 * x$	0.381	3 de enero de 2028
		Izquierdo	$y = 61.9311 + 0.0024 * x$	0.0697	22 de febrero de 1998
	Izquierda	Derecho	$y = 54.2638 + 0.0131 * x$	0.585	16 de julio de 2015
		Izquierdo	$y = 58.5733 + 0.0045 * x$	0.131	15 de abril de 2009
4	Derecha	Derecho	$y = 67.06 + -0.0038 * x$	0.2597	20 de abril de 2033
		Izquierdo	$y = 63.3751 + -0.0015 * x$	0.0297	21 de mayo de 2051
	Izquierda	Derecho	$y = 58.726925 * e(0.0001628 * x)$	0.5946	31 de diciembre de 2012
		Izquierdo	$y = 65.6460135 * e(-3.87e-05 * x)$	0.0279	11 de marzo de 2044
5	Derecha	Derecho	$y = 63.1381 + -0.0004 * x$	0.0041	30 de junio de 2137

	Izquierda	Izquierdo	$y = 60.4118 + 0.8222 * \log(x)$	0.0920	23 de junio de 2017
		Derecho	$y = 59.5700941 * e(0.0001154 * x)$	0.3972	28 de octubre de 2010
		Izquierdo	$y = 65.1901109 * e(-6.01e-05 * x)$	0.1035	15 de mayo de 2034
6	Derecha	Derecho	$y = 70.4258 + -0.0056 * x$	0.4320	10 de noviembre de 2029
		Izquierdo	$y = 57.6703 + 1.0805 * \log(x)$	0.1065	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 58.846125 * e(0.0001615 * x)$	0.6669	5 de diciembre de 2012
		Izquierdo	$y = 62.6798 + 0.0026 * x$	0.2164	28 de septiembre de 1998
7	Derecha	Derecho	$y = 67.1349 + -0.0028 * x$	0.1738	29 de marzo de 2039
		Izquierdo	$y = 58.548 + 0.9724 * \log(x)$	0.1015	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 60.888164 * e(0.0001159 * x)$	0.4428	2 de mayo de 2010
		Izquierdo	$y = 61.1457 + 0.0032 * x$	0.4229	9 de agosto de 2003
8	Derecha	Derecho	$y = 64.4776804 * e(4.09e-05 * x)$	0.0986	1 de junio de 1993
		Izquierdo	$y = 60.9996 + 0.0049 * x$	0.3332	11 de agosto de 2008
	Izquierda	Derecho	$y = 62.6278135 * e(0.000113 * x)$	0.4521	19 de junio de 2009
		Izquierdo	$y = 60.8052 + 0.005 * x$	0.5719	11 de noviembre de 2008
9	Derecha	Derecho	$y = 71.5873 + -0.0072 * x$	0.3511	23 de julio de 2027
		Izquierdo	$y = 58.2466 + 1.2147 * \log(x)$	0.3395	23 de junio de 2017

	Izquierda	Derecho	$y = 58.1443735 * e(0.0001725 * x)$	0.6287	30 de mayo de 2013
		Izquierdo	$y = 61.2752 + 0.0061 * x$	0.4713	12 de marzo de 2010
10	Derecha	Derecho	$y = 66.541 + -0.0029 * x$	0.1011	17 de enero de 2038
		Izquierdo	$y = 63.7355 + 0.003 * x$	0.1425	27 de agosto de 2000
	Izquierda	Derecho	$y = 55.1749623 * e(0.0002637 * x)$	0.8720	13 de mayo de 2015
		Izquierdo	$y = 56.0301 + 0.0125 * x$	0.7066	24 de enero de 2015
11	Derecha	Derecho	$y = 61.2958 + 0.5329 * \log(x)$	0.0867	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 61.8102 + 0.0045 * x$	0.2090	8 de mayo de 2007
	Izquierda	Derecho	$y = 54.8074078 * e(0.0002611 * x)$	0.8666	30 de mayo de 2015
		Izquierdo	$y = 59.0099 + 0.01 * x$	0.7905	16 de agosto de 2013
12	Derecha	Derecho	$y = 66.6727 + -0.0038 * x$	0.0770	18 de abril de 2033
		Izquierdo	$y = 62.5031301 * e(4.63e-05 * x)$	0.1306	20 de enero de 1998
	Izquierda	Derecho	$y = 54.4235108 * e(0.0002422 * x)$	0.8398	1 de mayo de 2015
		Izquierdo	$y = 57.4413 + 0.0112 * x$	0.7388	8 de junio de 2014
13	Derecha	Derecho	$y = 63.9376 + -0.0008 * x$	0.0058	1 de mayo de 2085
		Izquierdo	$y = 60.2222 + 0.0055 * x$	0.4091	2 de diciembre de 2009
	Izquierda	Derecho	$y = 60.5665988 * e(0.000116 * x)$	0.4366	19 de junio de 2010
		Izquierdo	$y = 59.4831 + 0.0067 * x$	0.7347	19 de julio de 2011
14	Derecha	Derecho	$y = 64.8811 + -0.0013 * x$	0.0333	2 de octubre de 2060
		Izquierdo	$y = 67.0341 + 0.0002 * x$	0.0007	10 abr 1706

	Izquierda	Derecho	$y = 59.2460641 * e(0.0001425 * x)$	0.4545	11 de marzo de 2012
		Izquierdo	$y = 54.7689 + 0.0099 * x$	0.8849	9 de octubre de 2014
15	Derecha	Derecho	$y = 63.0068 + 0.0012 * x$	0.0288	20 de diciembre de 1974
		Izquierdo	$y = 66.9233924 * e(2.08e-05 * x)$	0.0346	2 de marzo de 1965
	Izquierda	Derecho	$y = 58.4153938 * e(0.0001078 * x)$	0.2616	6 de noviembre de 2010
		Izquierdo	$y = 57.1448048 * e(0.0001137 * x)$	0.6366	22 de septiembre de 2011
16	Derecha	Derecho	$y = 60.3119 + 0.0053 * x$	0.3466	7 de agosto de 2009
		Izquierdo	$y = 63.2938 + 0.0046 * x$	0.3239	5 de septiembre de 2006
	Izquierda	Derecho	$y = 57.5266775 * e(0.0001551 * x)$	0.6158	21 de febrero de 2013
		Izquierdo	$y = 55.6885 + 0.0115 * x$	0.8464	10 de diciembre de 2014
17	Derecha	Derecho	$y = 59.7616 + 0.687 * \log(x)$	0.1087	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 64.794 + 0.488 * \log(x)$	0.0592	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 56.5492773 * e(0.0002086 * x)$	0.8368	24 de junio de 2014
		Izquierdo	$y = 55.5317277 * e(0.0002074 * x)$	0.7902	14 de septiembre de 2014
18	Derecha	Derecho	$y = 57.8612 + 1.2038 * \log(x)$	0.1988	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 69.6458 + -0.0031 * x$	0.1149	3 de agosto de 2039
	Izquierda	Derecho	$y = 61.2044527 * e(0.0001645 * x)$	0.6390	11 de mayo de 2012

		Izquierdo	$y = 59.5397952 * e(0.0001827 * x)$	0.7050	13 de abril de 2013
19	Derecha	Derecho	$y = 61.9934 + 0.4983 * \log(x)$	0.0630	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 65.6015 + 0.0018 * x$	0.0250	6 de abril de 1986
	Izquierda	Derecho	$y = 57.528891 * e(0.0002002 * x)$	0.6997	13 de febrero de 2014
		Izquierdo	$y = 55.8890249 * e(0.000229 * x)$	0.7125	20 de noviembre de 2014
20	Derecha	Derecho	$y = 61.5818 + 0.5967 * \log(x)$	0.0823	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 60.7572 + 1.1738 * \log(x)$	0.1331	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 59.4698889 * e(0.0001336 * x)$	0.3540	6 de octubre de 2011
		Izquierdo	$y = 60.2412 + 0.0083 * x$	0.6829	15 de junio de 2012
21	Derecha	Derecho	$y = 64.5987 + 0.4555 * \log(x)$	0.0224	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 68.1927 + 0.0036 * x$	0.0870	10 de noviembre de 1999
	Izquierda	Derecho	$y = 62.0231482 * e(0.0001238 * x)$	0.5815	20 de mayo de 2010
		Izquierdo	$y = 58.4933 + 0.0119 * x$	0.7234	20 de mayo de 2014
22	Derecha	Derecho	$y = 67.109 + -0.001 * x$	0.0247	6 de abril de 2076
		Izquierdo	$y = 73.6649 + -0.0016 * x$	0.0194	29 de agosto de 2067
	Izquierda	Derecho	$y = 56.6316689 * e(0.0001959 * x)$	0.6750	7 de abril de 2014
		Izquierdo	$y = 55.7095 + 0.0123 * x$	0.7666	5 de febrero de 2015

23	Derecha	Derecho	$y = 63.9006 + 0.6114 * \log(x)$	0.1562	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 66.9144 + 0.0035 * x$	0.1083	25 de julio de 2000
	Izquierda	Derecho	$y = 57.2796854 * e(0.0001861 * x)$	0.6566	5 de diciembre de 2013
		Izquierdo	$y = 58.4057 + 0.0107 * x$	0.6518	19 de enero de 2014
24	Derecha	Derecho	$y = 66.123 + 0.3314 * \log(x)$	0.0248	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 65.0493 + 0.0034 * x$	0.0720	18 de mayo de 2001
	Izquierda	Derecho	$y = 63.4119354 * e(0.0001231 * x)$	0.4947	5 de noviembre de 2009
		Izquierdo	$y = 65.5308635 * e(9.04e-05 * x)$	0.2828	3 de febrero de 2006
25	Derecha	Derecho	$y = 68.4256 + 0.094 * \log(x)$	0.0027	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 66.4164 + 0.003 * x$	0.0519	23 de diciembre de 1997
	Izquierda	Derecho	$y = 57.7606976 * e(0.0001947 * x)$	0.7152	20 de diciembre de 2013
		Izquierdo	$y = 64.2514228 * e(6.87e-05 * x)$	0.2423	12 de abril de 2003
26	Derecha	Derecho	$y = 69.1634 + 0.0025 * x$	0.0958	28 de enero de 1991
		Izquierdo	$y = 66.8629 + 0.0035 * x$	0.0804	24 de abril de 2000
	Izquierda	Derecho	$y = 60.1178684 * e(0.0001763 * x)$	0.6068	23 de diciembre de 2012
		Izquierdo	$y = 62.5239 + 0.0088 * x$	0.6694	10 de enero de 2012
27	Derecha	Derecho	$y = 69.4245359 * e(4.67e-05 * x)$	0.1502	21 de enero de 1992

		Izquierdo	$y = 67.775 + 0.0025 * x$	0.0521	19 de septiembre de 1992
	Izquierda	Derecho	$y = 57.2609146 * e(0.0002422 * x)$	0.8798	3 de octubre de 2014
		Izquierdo	$y = 62.8479 + 0.0073 * x$	0.4785	15 de octubre de 2010
28	Derecha	Derecho	$y = 70.1997625 * e(3.03e-05 * x)$	0.0608	24 de abril de 1977
		Izquierdo	$y = 66.9359139 * e(5.34e-05 * x)$	0.0659	13 de febrero de 1997
	Izquierda	Derecho	$y = 59.5047967 * e(0.0002084 * x)$	0.6703	22 de octubre de 2013
		Izquierdo	$y = 61.1912675 * e(0.0001455 * x)$	0.5195	11 de septiembre de 2011
29	Derecha	Derecho	$y = 71.6131269 * e(-5.28e-05 * x)$	0.2370	28 de julio de 2041
		Izquierdo	$y = 68.5 + -0.0001 * x$	0.0001	21 de julio de 2574
	Izquierda	Derecho	$y = 61.4644057 * e(9.9e-05 * x)$	0.3844	8 de noviembre de 2008
		Izquierdo	$y = 63.6371 + 0.0053 * x$	0.2335	5 de octubre de 2007
30	Derecha	Derecho	$y = 73.8069 + -0.0087 * x$	0.7851	3 de julio de 2026
		Izquierdo	$y = 68.2011 + -0.0007 * x$	0.0029	1 de agosto de 2103
	Izquierda	Derecho	$y = 58.7463885 * e(0.0001506 * x)$	0.6182	18 de agosto de 2012
		Izquierdo	$y = 64.2616094 * e(7.69e-05 * x)$	0.2431	16 de octubre de 2004
31	Derecha	Derecho	$y = 71.1856 + -0.0033 * x$	0.1368	22 de noviembre de 2038
		Izquierdo	$y = 65.3494 + 0.0055 * x$	0.1813	30 de mayo de 2007

	Izquierda	Derecho	$y = 59.6141794 * e(0.0001642 * x)$	0.5674	15 de octubre de 2012
		Izquierdo	$y = 60.1189 + 0.0105 * x$	0.5858	13 de julio de 2013
32	Derecha	Derecho	$y = 67.5951 + -0.0012 * x$	0.0138	19 de septiembre de 2068
		Izquierdo	$y = 63.6755 + 0.0061 * x$	0.2861	27 de febrero de 2009
	Izquierda	Derecho	$y = 63.5402155 * e(0.0001149 * x)$	0.5119	4 de abril de 2009
		Izquierdo	$y = 60.051 + 0.01 * x$	0.6505	7 de mayo de 2013
33	Derecha	Derecho	$y = 61.9365 + 0.006 * x$	0.3901	6 de octubre de 2009
		Izquierdo	$y = 66.3938 + 0.0053 * x$	0.2559	13 de mayo de 2006
	Izquierda	Derecho	$y = 63.4038792 * e(7.96e-05 * x)$	0.2282	9 de septiembre de 2005
		Izquierdo	$y = 61.6656591 * e(8.01e-05 * x)$	0.4732	16 de septiembre de 2006
34	Derecha	Derecho	$y = 65.0078514 * e(2.42e-05 * x)$	0.0728	26 de octubre de 1975
		Izquierdo	$y = 64.7703473 * e(4.18e-05 * x)$	0.0765	24 de agosto de 1993
	Izquierda	Derecho	$y = 59.5673106 * e(0.0001424 * x)$	0.5792	1 de febrero de 2012
		Izquierdo	$y = 61.1224312 * e(9.84e-05 * x)$	0.2970	15 de diciembre de 2008
35	Derecha	Derecho	$y = 65.93694 * e(-7.5e-06 * x)$	0.0029	18 de mayo de 2156
		Izquierdo	$y = 67.9087 + -0.0015 * x$	0.0295	31 de diciembre de 2059
	Izquierda	Derecho	$y = 59.7163697 * e(0.0001083 * x)$	0.3395	29 de abril de 2010

		Izquierdo	$y = 62.7957887 * e(3.58e-05 * x)$	0.1530	30 de diciembre de 1991
36	Derecha	Derecho	$y = 63.239213 * e(-1.8e-05 * x)$	0.0171	2 de abril de 2069
		Izquierdo	$y = 65.7647 + 0.0008 * x$	0.0066	2 de mayo de 1942
	Izquierda	Derecho	$y = 58.4220158 * e(0.0001085 * x)$	0.3653	22 de noviembre de 2010
		Izquierdo	$y = 62.6425 + 0.0018 * x$	0.0774	11 de mayo de 1991
37	Derecha	Derecho	$y = 65.5380905 * e(-4.02e-05 * x)$	0.2107	30 de enero de 2043
		Izquierdo	$y = 62.923 + 0.5079 * \log(x)$	0.0646	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 61.9165763 * e(1.44e-05 * x)$	0.0051	8 de agosto de 1956
		Izquierdo	$y = 65.2328252 * e(-4.19e-05 * x)$	0.1103	27 de septiembre de 2041
38	Derecha	Derecho	$y = 63.8202 + 0.0001 * x$	0.0004	17 mar 1617
		Izquierdo	$y = 60.7507 + 0.9628 * \log(x)$	0.1768	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 58.8080643 * e(6.69e-05 * x)$	0.0947	10 de julio de 2006
		Izquierdo	$y = 62.5336347 * e(1.23e-05 * x)$	0.0103	6 de julio de 1944
39	Derecha	Derecho	$y = 63.4603 + -0.0014 * x$	0.0222	28 de junio de 2053
		Izquierdo	$y = 63.592 + 0.0034 * x$	0.2122	18 de abril de 2002
	Izquierda	Derecho	$y = 61.465683 * e(4.01e-05 * x)$	0.0297	18 de marzo de 1996

		Izquierdo	$y = 64.5366886 * e(-1.51e-05 * x)$	0.0120	10 de septiembre de 2082
40	Derecha	Derecho	$y = 65.3704 + -0.0047 * x$	0.2650	15 de mayo de 2029
		Izquierdo	$y = 69.3918 + -0.0037 * x$	0.1328	21 de abril de 2035
	Izquierda	Derecho	$y = 66.1802822 * e(-7.71e-05 * x)$	0.0701	2 de marzo de 2031
		Izquierdo	$y = 69.1872434 * e(-0.0001658 * x)$	0.5224	30 de julio de 2024
41	Derecha	Derecho	$y = 66.4969 + -0.0022 * x$	0.0594	9 de diciembre de 2043
		Izquierdo	$y = 67.892 + -0.001 * x$	0.0057	12 de julio de 2079
	Izquierda	Derecho	$y = 63.5714797 * e(1.56e-05 * x)$	0.0043	27 de diciembre de 1956
		Izquierdo	$y = 67.379931 * e(-8.78e-05 * x)$	0.3499	23 de enero de 2030
42	Derecha	Derecho	$y = 57.277 + 1.434 * \log(x)$	0.4379	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 63.9489 + 0.7595 * \log(x)$	0.0572	23 de junio de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 61.8622312 * e(0.0001277 * x)$	0.3129	27 de agosto de 2010
		Izquierdo	$y = 64.1347307 * e(6.11e-05 * x)$	0.3935	5 de agosto de 2001
43	Derecha	Derecho	$y = 55.0619 + 2.2941 * \log(x)$	0.4414	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 65.2539 + 0.0058 * x$	0.3564	15 de noviembre de 2007
	Izquierda	Derecho	$y = 57.7750478 * e(0.000125 * x)$	0.3236	2 de enero de 2012

		Izquierdo	$y = 64.9419 + 0.1517 * \log(x)$	0.0168	23 de junio de 2017
44	Derecha	Derecho	$y = 56.6112 + 2.3632 * \log(x)$	0.3937	23 de junio de 2017
		Izquierdo	$y = 60.6919 + 0.0104 * x$	0.5825	7 de mayo de 2013
	Izquierda	Derecho	$y = 57.7239915 * e(0.0001111 * x)$	0.2720	5 de mayo de 2011
		Izquierdo	$y = 65.264 + -0.0007 * x$	0.0132	7 de febrero de 2098
45	Derecha	Derecho	$y = 64.4281 + 0.0016 * x$	0.0184	28 de julio de 1984
		Izquierdo	$y = 59.7844 + 0.0103 * x$	0.3502	16 de julio de 2013
	Izquierda	Derecho	$y = 57.937575 * e(0.0001486 * x)$	0.5556	27 de octubre de 2012
		Izquierdo	$y = 65.0865 + 0.002 * x$	0.0417	8 de diciembre de 1989
46	Derecha	Derecho	$y = 60.2593 + 0.0094 * x$	0.5241	19 de enero de 2013
		Izquierdo	$y = 64.5687 + 0.0053 * x$	0.1878	11 de mayo de 2007
	Izquierda	Derecho	$y = 56.7040743 * e(0.0002329 * x)$	0.8242	5 de octubre de 2014
		Izquierdo	$y = 67.6216 + 0.0017 * x$	0.0432	21 de septiembre de 1980
47	Derecha	Derecho	$y = 59.4759 + 0.0101 * x$	0.4686	24 de julio de 2013
		Izquierdo	$y = 68.0669 + 0.0047 * x$	0.1986	9 de enero de 2004
	Izquierda	Derecho	$y = 56.560672 * e(0.0002126 * x)$	0.7819	14 de julio de 2014
		Izquierdo	$y = 62.9654 + 0.0057 * x$	0.7063	8 de noviembre de 2008
48	Derecha	Derecho	$y = 59.3102 + 0.0104 * x$	0.5745	14 de septiembre de 2013
		Izquierdo	$y = 68.7454767 * e(3.64e-05 * x)$	0.0756	28 de julio de 1985
	Izquierda	Derecho	$y = 58.4057 + 0.0086 * x$	0.5135	25 de marzo de 2013

		Izquierdo	$y = 66.4809 + 0.1082 * \log(x)$	0.0043	23 de junio de 2017
49	Derecha	Derecho	$y = 58.4676 + 0.0162 * x$	0.6569	15 de marzo de 2015
		Izquierdo	$y = 62.9782425 * e(0.0001166 * x)$	0.3108	1 de agosto de 2009
	Izquierda	Derecho	$y = 56.3331821 * e(0.0001684 * x)$	0.6488	28 de octubre de 2013
		Izquierdo	$y = 63.9908 + 0.4467 * \log(x)$	0.0426	23 de junio de 2017
50	Derecha	Derecho	$y = 53.0142 + 0.0201 * x$	0.5153	20 de mayo de 2016
		Izquierdo	$y = 61.0771 + 0.0084 * x$	0.5090	4 de abril de 2012
	Izquierda	Derecho	$y = 56.4517265 * e(0.0001034 * x)$	0.2678	23 de junio de 2011
		Izquierdo	$y = 64.9406 + -0.0035 * x$	0.1408	18 de febrero de 2033

8.4 Ecuaciones Para el Indicador Porcentaje de Área Afectada (Grietas y Fisuras)

Para este indicador, el comportamiento de los datos para cada kilómetro y sus respectivos carriles es variable, tal como se ve en los resultados expuestos en la **Tabla 17**, puesto que se presentan los cinco casos de comportamientos anteriormente descritos e ilustrados en la **Tabla 13**. Este indicador es el único que presenta casos para los cuales el comportamiento de los datos concuerda con lo expuesto para el Grupo 5, dado que, en algunos carriles, el límite de cumplimiento respecto al contrato de concesión se excede en alguna de las mediciones previamente ejecutadas, es decir, se tienen casos en los que ya se cuenta con incumplimientos y estos generan que la regresión entregue la fecha en la que probablemente se llegó a este límite. Además, para este Grupo 5, en algunos casos se evidencio que se estaba incumpliendo con el área límite afectada por kilómetro-carril correspondiente a $36m^2$. Probablemente se ejecutaron algunas intervenciones que llevaron a que, en las siguientes

mediciones, el área afectada fuera menor a la que ya estaba en incumplimiento. Sin embargo, a pesar de que se cuenta con una bitácora de intervenciones, en esta no reposa la totalidad del registro de las actividades de restauración a la carpeta asfáltica en el tiempo, por lo que debido al comportamiento que tienen los datos en algunos sectores, estos sugieren que se llevó a cabo una intervención pues se ve el cambio de una medición a otra, de grandes áreas afectadas a áreas sin afectación. La situación anterior, como se ha mencionado a lo largo del documento, afecta el comportamiento de las regresiones de manera que la identificación de la fecha de incumplimiento es menos precisa. No obstante, se encontraron algunos carriles en los que su comportamiento corresponde al Grupo 1, de manera que es posible determinar de manera adecuada la fecha probable de incumplimiento para este indicador en sus carriles correspondientes. Son precisamente los carriles que corresponden al Grupo 1 a los que se debe prestar mayor atención dado que el incumplimiento llegaría en estos de manera más rápida que en otros carriles en los que su comportamiento pertenece a los grupos 2 o 3.

Respecto a los carriles que están en los Grupos 2 y 3, es posible afirmar que estos están en cumplimiento respecto al límite establecido en el contrato de concesión y que la probabilidad de que lleguen al incumplimiento en el corto plazo es muy baja, de manera que estos carriles, a la hora de planear intervenciones para este indicador en específico no van a ser una prioridad. Como se puede observar en las ecuaciones de los carriles que hacen parte de los Grupos 2 y 3, las fechas de incumplimiento tienen dos tendencias, la primera es presentar el incumplimiento en el pasado, puesto que los datos se comportan con una tendencia contraria al deterioro, generada por la dispersión de los datos que en su mayoría están en cumplimiento y la segunda es que en algunos carriles, la fecha de incumplimiento se genera en el largo plazo, de manera que se no se vuelven prioridad a la hora de planear intervenciones y se deben seguir tomando datos para monitorear su deterioro en el tiempo.

Por otro lado, se tienen los carriles en los que su comportamiento se adapta al grupo 4 y es que, en estos casos, la ecuación proveniente de la regresión no entrega las fechas de

incumplimiento de manera precisa debido a una dispersión de datos considerable, generada por el comportamiento de los datos que sugieren la ejecución de intervenciones en el tiempo que no fueron debidamente registradas.

En términos generales se puede afirmar que el indicador de porcentaje de área afectada **es un indicador crítico en el mantenimiento**, pues a diferencia del IRI, Ahuellamiento y Fricción, este presenta una mayor variabilidad en el comportamiento del deterioro en el tiempo y que principalmente este indicador cuenta con sectores pertenecientes al Grupo 5, es decir, en incumplimiento respecto al límite establecido en el contrato de concesión. Adicionalmente, los carriles que pertenecen al Grupo 1, deben ser monitoreados con mediciones frecuentes para seguir al tanto de su deterioro puesto que los carriles pertenecientes a este grupo van a tender a llegar primero al incumplimiento.

Tabla 17. Resultados indicador % de área afectada

Indicador: Grietas y fisuras (% área afectada)					
Km	Calzada	Carril	Ecuación	R2	Fecha de incumplimiento
1	Derecha	Derecho	$y = 5.1269 + 0.0042 * x$	0.0225	28 de enero de 2040
		Izquierdo	$y = 1.4303 + 0.0092 * x$	0.0830	28 de marzo de 2030
	Izquierda	Derecho	$y = 5.3854 + -0.0028 * x$	0.1050	8 de septiembre de 1989
		Izquierdo	$y = 13.7034 + -0.0101 * x$	0.0545	20 de noviembre de 2013
2	Derecha	Derecho	$y = -0.549 + 0.0766 * x$	0.7368	3 de abril de 2021
		Izquierdo	$y = 21.4528 + -0.0173 * x$	0.0363	26 de agosto de 2017
	Izquierda	Derecho	$y = 35.5758 + 0.0141 * x$	0.0747	11 de enero de 2020
		Izquierdo	$y = 31.2678 + -0.0475 * x$	0.6316	5 de septiembre de 2019
3	Derecha	Derecho	$y = 41.5491 + -0.0711 * x$	0.4924	29 de febrero de 2020
		Izquierdo	$y = 25.2524 + -0.0355 * x$	0.3581	14 de febrero de 2019
	Izquierda	Derecho	$y = 48.1892 + -0.0642 * x$	0.6037	19 de junio de 2020

		Izquierdo	$y = 15.2637 + -0.0221 * x$	0.2516	18 de mayo de 2017
4	Derecha	Derecho	$y = 8.9413 + 0.01 * x$	0.0855	18 de mayo de 2027
		Izquierdo	$y = -3.7859 + 0.0313 * x$	0.5728	6 de junio de 2023
	Izquierda	Derecho	$y = 66.0537 + -0.0514 * x$	0.1616	20 de julio de 2021
		Izquierdo	$y = 35.2241 + -0.0417 * x$	0.3144	25 de noviembre de 2019
5	Derecha	Derecho	$y = 20.457 + -0.0333 * x$	0.9158	3 de septiembre de 2018
		Izquierdo	$y = 31.6568 + -0.0539 * x$	0.9544	24 de septiembre de 2019
	Izquierda	Derecho	$y = 178.1698 + -0.2988 * x$	0.7411	1 de abril de 2021
		Izquierdo	$y = 128.7109 + -0.2185 * x$	0.3684	9 de febrero de 2021
6	Derecha	Derecho	$y = 1.9039 + 0.0156 * x$	0.5960	29 de noviembre de 2025
		Izquierdo	$y = 1.8538 + 0.0142 * x$	0.3619	10 de julio de 2026
	Izquierda	Derecho	$y = 78.1779 + -0.0266 * x$	0.0232	16 de abril de 2024
		Izquierdo	$y = 121.5097 + 0.0412 * x$	0.0091	10 de abril de 2014
7	Derecha	Derecho	$y = 15.373 + -0.0167 * x$	0.1340	29 de julio de 2016
		Izquierdo	$y = 128.0894 + -0.2435 * x$	0.4346	25 de diciembre de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = 19.6398 + 0.0011 * x$	0.0004	2 de enero de 2061
		Izquierdo	$y = 39.9836 + -0.0587 * x$	0.3106	18 de febrero de 2020
8	Derecha	Derecho	$y = 6.4287 + 0.0049 * x$	0.0232	24 de mayo de 2036
		Izquierdo	$y = 2.1583 + 0.0226 * x$	0.3770	20 de enero de 2024
	Izquierda	Derecho	$y = 2.369 + 0.0102 * x$	0.1039	20 de diciembre de 2028
		Izquierdo	$y = 17.2565 + -0.0292 * x$	0.5990	11 de marzo de 2018
9	Derecha	Derecho	$y = 21.1008 + -0.0288 * x$	0.7574	14 de julio de 2018
		Izquierdo	$y = 16.2329 + -0.0049 * x$	0.0285	30 de octubre de 2008
	Izquierda	Derecho	$y = 112.1417 + -0.1534 * x$	0.3140	22 de abril de 2021
		Izquierdo	$y = 57.4116 + -0.0094 * x$	0.0042	17 de marzo de 2026
10	Derecha	Derecho	$y = 8.4253 + -0.0016 * x$	0.0047	12 de mayo de 1973
		Izquierdo	$y = 0.1128 + 0.0001 * x$	0.0064	19 de abril de 3316

	Izquierda	Derecho	$y = 46.0965 + -0.0188 * x$	0.1195	31 de mayo de 2021
		Izquierdo	$y = 20.1133 + 0.0441 * x$	0.6958	7 de diciembre de 2020
11	Derecha	Derecho	$y = 131.867 + -0.2585 * x$	0.4640	17 de diciembre de 2020
		Izquierdo	$y = 5.6557 + -0.0049 * x$	0.2934	23 de noviembre de 2002
	Izquierda	Derecho	$y = 34.4175 + -0.008 * x$	0.0097	30 de mayo de 2019
		Izquierdo	$y = 37.8227 + -0.0389 * x$	0.3357	28 de enero de 2020
12	Derecha	Derecho	$y = 4.4377 + -0.0075 * x$	0.6869	18 de mayo de 2008
		Izquierdo	$y = 6.5194 + 0.0033 * x$	0.0324	24 de febrero de 2044
	Izquierda	Derecho	$y = 114.4953 + -0.1378 * x$	0.2293	4 de julio de 2021
		Izquierdo	$y = 85.169 + -0.0365 * x$	0.1622	20 de agosto de 2023
13	Derecha	Derecho	$y = 22.8323 + -0.04 * x$	0.5143	18 de enero de 2019
		Izquierdo	$y = -0.3945 + 0.0079 * x$	0.7140	28 de junio de 2032
	Izquierda	Derecho	$y = 1.8083 + 0.0468 * x$	0.5356	13 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = 5.2465 + 0.0019 * x$	0.0183	2 de septiembre de 2064
14	Derecha	Derecho	$y = 5.0756 + -0.0084 * x$	0.3887	19 de noviembre de 2009
		Izquierdo	$y = 9.0285 + -0.0056 * x$	0.0679	8 de septiembre de 2006
	Izquierda	Derecho	$y = -3.4447 + 0.039 * x$	0.7364	19 de septiembre de 2022
		Izquierdo	$y = 6.6616 + 0.0128 * x$	0.1763	22 de marzo de 2026
15	Derecha	Derecho	$y = 25.0459 + -0.0454 * x$	0.5764	16 de abril de 2019
		Izquierdo	$y = 1.7852 + 0.0068 * x$	0.4176	13 de octubre de 2033
	Izquierda	Derecho	$y = 64.4324 + 0.1174 * x$	0.0623	5 de abril de 2019
		Izquierdo	$y = 116.5711 + 0.0104 * x$	0.0014	23 de agosto de 1998
16	Derecha	Derecho	$y = 44.9311 + -0.0455 * x$	0.1878	26 de junio de 2020
		Izquierdo	$y = 8.1013 + -0.0032 * x$	0.0405	19 de noviembre de 1995
	Izquierda	Derecho	$y = 43.9567 + 0.2442 * x$	0.6752	11 de noviembre de 2019
		Izquierdo	$y = 20.0128 + 0.0722 * x$	0.5282	21 de julio de 2020
17	Derecha	Derecho	$y = 44.4636 + -0.0422 * x$	0.1500	30 de junio de 2020

	Izquierda	Izquierdo	$y = 4.3977 + -0.0017 * x$	0.0097	28 de mayo de 1969
		Derecho	$y = 61.449 + -0.0089 * x$	0.0031	25 de octubre de 2027
		Izquierdo	$y = 60.0679 + 0.0257 * x$	0.0370	22 de mayo de 2017
18	Derecha	Derecho	$y = 56.5914 + -0.0408 * x$	0.0958	30 de abril de 2021
		Izquierdo	$y = 11.1632 + 0.0184 * x$	0.0215	24 de agosto de 2023
	Izquierda	Derecho	$y = 9.3272 + 0.0614 * x$	0.5339	19 de febrero de 2021
		Izquierdo	$y = 35.8881 + 0.0108 * x$	0.0101	23 de diciembre de 2019
19	Derecha	Derecho	$y = 4.9289 + 0.0523 * x$	0.7740	28 de julio de 2021
		Izquierdo	$y = 4.7304 + 0.0112 * x$	0.2004	3 de agosto de 2027
	Izquierda	Derecho	$y = 19.2156 + 0.123 * x$	0.3650	27 de abril de 2020
		Izquierdo	$y = 27.9802 + 0.0321 * x$	0.1952	18 de agosto de 2020
20	Derecha	Derecho	$y = 45.9093 + 0.0115 * x$	0.1240	1 de agosto de 2017
		Izquierdo	$y = 37.6487 + -0.0546 * x$	0.6760	12 de enero de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = 12.8748 + 0.1186 * x$	0.3469	25 de junio de 2020
		Izquierdo	$y = 5.8297 + 0.0435 * x$	0.2793	5 de noviembre de 2021
21	Derecha	Derecho	$y = 71.6 + -0.0479 * x$	0.121	25 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = 47.7027 + 0.0053 * x$	0.0042	29 de noviembre de 2013
	Izquierda	Derecho	$y = 76.8069 + 0.0502 * x$	0.0696	22 de septiembre de 2017
		Izquierdo	$y = 38.288 + -0.009 * x$	0.0641	24 de agosto de 2020
22	Derecha	Derecho	$y = 61.798 + -0.0468 * x$	0.1308	15 de junio de 2021
		Izquierdo	$y = 29.6946 + -0.0375 * x$	0.1517	28 de junio de 2019
	Izquierda	Derecho	$y = 133.3838 + 0.0033 * x$	0.0002	26 de marzo de 1938
		Izquierdo	$y = 233.0517 + -0.2864 * x$	0.5283	30 de octubre de 2021
23	Derecha	Derecho	$y = 63.7733 + -0.1082 * x$	0.7720	25 de agosto de 2020
		Izquierdo	$y = 86.2564 + -0.1226 * x$	0.2153	26 de enero de 2021
	Izquierda	Derecho	$y = 133.3838 + 0.0033 * x$	0.0002	26 de marzo de 1938
		Izquierdo	$y = 81.2405 + -0.0364 * x$	0.0378	10 de mayo de 2023

24	Derecha	Derecho	$y = 63.7733 + -0.1082 * x$	0.7720	25 de agosto de 2021
		Izquierdo	$y = 20.2184 + -0.0357 * x$	0.3832	28 de septiembre de 2018
	Izquierda	Derecho	$y = 73.2214 + 0.0565 * x$	0.0488	22 de febrero de 2018
		Izquierdo	$y = 60.3566 + -0.1019 * x$	0.6694	8 de agosto de 2020
25	Derecha	Derecho	$y = 146.3095 + -0.2514 * x$	0.3924	23 de febrero de 2021
		Izquierdo	$y = 22.474 + 0.0737 * x$	0.2183	13 de junio de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = 161.6003 + -0.202 * x$	0.2660	25 de agosto de 2021
		Izquierdo	$y = 60.3042 + -0.0216 * x$	0.0425	9 de enero de 2023
26	Derecha	Derecho	$y = 6.9793 + 0.0055 * x$	0.0304	19 de mayo de 2034
		Izquierdo	$y = 0.0541 + 0.0077 * x$	0.5988	5 de octubre de 2032
	Izquierda	Derecho	$y = 10.9326 + -0.0039 * x$	0.0148	20 de junio de 2002
		Izquierdo	$y = 32.8933 + -0.0055 * x$	0.0016	30 de mayo de 2018
27	Derecha	Derecho	$y = 17.0524 + -0.0136 * x$	0.0710	16 de febrero de 2016
		Izquierdo	$y = 7.9917 + -0.0074 * x$	0.0658	28 de julio de 2009
	Izquierda	Derecho	$y = 8.7036 + -0.0092 * x$	0.1199	3 de noviembre de 2011
		Izquierdo	$y = 13.8846 + 0.0237 * x$	0.0689	3 de julio de 2022
28	Derecha	Derecho	$y = 1.8957 + 0.046 * x$	0.5790	23 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = 1.9679 + 0.0153 * x$	0.3536	14 de enero de 2026
	Izquierda	Derecho	$y = 27.8189 + -0.0081 * x$	0.0128	14 de marzo de 2017
		Izquierdo	$y = 81.8067 + -0.0125 * x$	0.0016	11 de diciembre de 2029
29	Derecha	Derecho	$y = 3.0498 + -0.0024 * x$	0.0623	19 de junio de 1982
		Izquierdo	$y = 4.2028 + 0.0252 * x$	0.2527	26 de mayo de 2023
	Izquierda	Derecho	$y = 53.0518 + 0.0764 * x$	0.8038	4 de mayo de 2019
		Izquierdo	$y = 45.7664 + 0.0186 * x$	0.0387	6 de julio de 2018
30	Derecha	Derecho	$y = 0.3374 + 0.0024 * x$	0.3266	18 de mayo de 2060
		Izquierdo	$y = 1.1124 + -0.0014 * x$	0.0789	5 de junio de 1951
	Izquierda	Derecho	$y = 52.5075 + -0.0233 * x$	0.0372	19 de noviembre de 2021

		Izquierdo	$y = 35.1396 + -0.0124 * x$	0.0236	5 de octubre de 2019
31	Derecha	Derecho	$y = 29.8636 + -0.0179 * x$	0.2000	5 de enero de 2019
		Izquierdo	$y = 2.6299 + 0.0049 * x$	0.0829	19 de junio de 2038
	Izquierda	Derecho	$y = 17.7798 + 0.0159 * x$	0.0245	30 de enero de 2023
		Izquierdo	$y = 24.2755 + -0.0104 * x$	0.0163	8 de noviembre de 2016
32	Derecha	Derecho	$y = 0.0867 + 0.0057 * x$	0.6628	18 de marzo de 2037
		Izquierdo	$y = 5.461 + 0.0061 * x$	0.0506	3 de octubre de 2033
	Izquierda	Derecho	$y = 1.0298 + 0.0012 * x$	0.0398	16 de febrero de 2099
		Izquierdo	$y = 6.1616 + -0.0087 * x$	0.1365	31 de julio de 2010
33	Derecha	Derecho	$y = 172.9537 + -0.2598 * x$	0.7119	23 de mayo de 2021
		Izquierdo	$y = 50.9977 + -0.078 * x$	0.6630	22 de junio de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = -12.9886 + 0.1408 * x$	0.3363	24 de noviembre de 2020
		Izquierdo	$y = -9.4376 + 0.1432 * x$	0.4123	25 de octubre de 2020
34	Derecha	Derecho	$y = 1.9362 + -0.0012 * x$	0.0530	25 de febrero de 1945
		Izquierdo	$y = 3.5882 + -0.0038 * x$	0.1111	19 de octubre de 1996
	Izquierda	Derecho	$y = -1.6775 + 0.0202 * x$	0.2355	23 de enero de 2025
		Izquierdo	$y = 0.2178 + 0.0004 * x$	0.0488	13 de febrero de 2249
35	Derecha	Derecho	$y = 0.1757 + 0.0001 * x$	0.0109	26 de marzo de 2689
		Izquierdo	$y = 0.0 + 0.0 * x$	0.0000	N/A
	Izquierda	Derecho	$y = 13.3083 + 0.0357 * x$	0.2942	9 de septiembre de 2021
		Izquierdo	$y = 19.4676 + -0.0247 * x$	0.3551	12 de febrero de 2018
36	Derecha	Derecho	$y = 0.1117 + 0.0003 * x$	0.0462	28 de junio de 2387
		Izquierdo	$y = 0.3118 + 0.0002 * x$	0.0125	30 de mayo de 2423
	Izquierda	Derecho	$y = 9.6078 + 0.0364 * x$	0.2026	7 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = 34.7627 + -0.0693 * x$	0.4538	26 de noviembre de 2019
37	Derecha	Derecho	$y = 32.0688 + -0.0033 * x$	0.0033	26 de septiembre de 2016
		Izquierdo	$y = 23.7621 + -0.0055 * x$	0.0067	19 de noviembre de 2013

	Izquierda	Derecho	$y = 57.444 + -0.016 * x$	0.0074	17 de agosto de 2023
		Izquierdo	$y = 80.6252 + -0.1086 * x$	0.3546	26 de enero de 2021
38	Derecha	Derecho	$y = 7.4246 + 0.0233 * x$	0.2015	21 de abril de 2023
		Izquierdo	$y = 20.6931 + 0.0371 * x$	0.1070	28 de enero de 2021
	Izquierda	Derecho	$y = 13.8418 + 0.0281 * x$	0.1346	8 de febrero de 2022
		Izquierdo	$y = 24.4058 + -0.0161 * x$	0.0251	25 de diciembre de 2017
39	Derecha	Derecho	$y = 8.2729 + -0.0063 * x$	0.1742	26 de diciembre de 2007
		Izquierdo	$y = 14.7355 + -0.0154 * x$	0.5233	28 de febrero de 2016
	Izquierda	Derecho	$y = 4.0846 + 0.043 * x$	0.6713	24 de diciembre de 2021
		Izquierdo	$y = -7.8728 + 0.0562 * x$	0.6409	31 de enero de 2022
40	Derecha	Derecho	$y = -0.4474 + 0.0055 * x$	0.2025	2 de febrero de 2038
		Izquierdo	$y = 1.333 + 0.0079 * x$	0.0974	23 de noviembre de 2031
	Izquierda	Derecho	$y = -2.2095 + 0.0213 * x$	0.2307	8 de noviembre de 2024
		Izquierdo	$y = -15.8715 + 0.1247 * x$	0.5052	1 de febrero de 2021
41	Derecha	Derecho	$y = 4.7724 + 0.0324 * x$	0.3354	2 de agosto de 2022
		Izquierdo	$y = -1.7905 + 0.0224 * x$	0.1785	24 de julio de 2024
	Izquierda	Derecho	$y = -8.0928 + 0.1429 * x$		16 de octubre de 2020
		Izquierdo	$y = -7.5445 + 0.0773 * x$	0.6313	28 de junio de 2021
42	Derecha	Derecho	$y = -7.8417 + 0.0968 * x$	0.2378	10 de marzo de 2021
		Izquierdo	$y = -11.0382 + 0.1191 * x$	0.1863	10 de enero de 2021
	Izquierda	Derecho	$y = 4.1524 + 0.0206 * x$	0.1182	8 de marzo de 2024
		Izquierdo	$y = -0.2361 + 0.1255 * x$	0.1968	26 de septiembre de 2020
43	Derecha	Derecho	$y = -4.3759 + 0.1801 * x$	0.3604	24 de julio de 2020
		Izquierdo	$y = -2.4228 + 0.1718 * x$	0.1435	23 de julio de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = -2.1264 + 0.0443 * x$	0.3707	21 de abril de 2022
		Izquierdo	$y = -19.8057 + 0.1517 * x$	0.3785	14 de diciembre de 2020
44	Derecha	Derecho	$y = 14.7492 + 0.0357 * x$	0.0748	29 de julio de 2021

	Izquierda	Izquierdo	$y = 0.2375 + 0.0236 * x$	0.1641	6 de febrero de 2024
		Derecho	$y = -8.4043 + 0.0938 * x$	0.3745	30 de marzo de 2021
		Izquierdo	$y = 1.7078 + 0.0252 * x$	0.1289	3 de septiembre de 2023
45	Derecha	Derecho	$y = -2.8014 + 0.0193 * x$	0.7094	15 de junio de 2025
		Izquierdo	$y = -0.2479 + 0.0098 * x$	0.1539	15 de febrero de 2030
	Izquierda	Derecho	$y = 0.5745 + 0.0018 * x$	0.0597	28 de mayo de 2073
		Izquierdo	$y = -2.8728 + 0.0167 * x$	0.3918	2 de mayo de 2026
46	Derecha	Derecho	$y = -2.198 + 0.025 * x$	0.2086	20 de febrero de 2024
		Izquierdo	$y = -4.0439 + 0.0421 * x$	0.1826	21 de julio de 2022
	Izquierda	Derecho	$y = -35.8354 + 0.2737 * x$	0.4246	31 de agosto de 2020
		Izquierdo	$y = -14.8901 + 0.0916 * x$	0.3923	20 de junio de 2021
47	Derecha	Derecho	$y = 5.9618 + 0.0154 * x$	0.1936	20 de abril de 2025
		Izquierdo	$y = -5.2686 + 0.0608 * x$	0.1835	22 de octubre de 2021
	Izquierda	Derecho	$y = 35.995 + 0.0107 * x$	0.0091	31 de agosto de 2020
		Izquierdo	$y = -1.422 + 0.1206 * x$	0.2584	13 de diciembre de 2019
48	Derecha	Derecho	$y = -9.0876 + 0.1337 * x$	0.1762	14 de noviembre de 2020
		Izquierdo	$y = -11.2993 + 0.1235 * x$	0.1815	29 de diciembre de 2020
	Izquierda	Derecho	$y = 7.0731 + 0.131 * x$	0.1429	20 de julio de 2020
		Izquierdo	$y = 30.2949 + 0.0835 * x$	0.0638	19 de febrero de 2020
49	Derecha	Derecho	$y = -3.6492 + 0.0929 * x$	0.1825	11 de febrero de 2021
		Izquierdo	$y = 4.6985 + 0.0373 * x$	0.1169	31 de marzo de 2022
	Izquierda	Derecho	$y = -54.2322 + 0.3311 * x$	0.3976	10 de septiembre de 2020
		Izquierdo	$y = 210.8352 + -0.3278 * x$	0.2048	29 de mayo de 2021
50	Derecha	Derecho	$y = 0.7705 + 0.0627 * x$	0.2364	26 de junio de 2021
		Izquierdo	$y = -3.1944 + 0.0371 * x$	0.1962	2 de noviembre de 2022
	Izquierda	Derecho	$y = -2.2855 + 0.0163 * x$	0.3433	18 de mayo de 2026
		Izquierdo	$y = 4.0135 + -0.0081 * x$	0.4267	5 de marzo de 2009

Considerando los resultados de las **Tablas 14, 15, 16 y 17**, es posible obtener información acerca del deterioro de cada indicador en cada kilómetro y carril para una toma de decisiones más informada respecto a las intervenciones que se realizan en la estructura de pavimentos. Si bien existe una gran dispersión en los datos, comportamientos variables en los coeficientes de correlación y fechas de incumplimiento en el pasado o muy lejanas, es posible analizar de forma crítica la información obtenida y procesarla de manera de que sea una herramienta en la gestión de pavimentos flexibles.

9. Análisis de Resultados

Luego de la metodología implementada, se pudo evaluar el estado del pavimento en función de los cuatro indicadores de deterioro: Índice de Rugosidad Internacional (IRI), Ahuellamiento, Coeficiente de Fricción (CRD) y Porcentaje de Área Afectada por Grietas y Fisuras. Se identificó que la mayoría de los tramos presentaron valores en cumplimiento con los límites establecidos en el contrato de concesión. Los indicadores IRI, Ahuellamiento y Fricción mostraron un comportamiento estable, lo que sugiere una baja probabilidad de incumplimiento en el corto plazo. Por otro lado, el indicador de Porcentaje de Área Afectada por Grietas y Fisuras presentó una mayor variabilidad y algunos tramos ya se encontraban en incumplimiento, lo que indica una mayor criticidad para el mantenimiento.

Durante el proceso de recolección de datos, se observó un comportamiento con dispersiones importantes, lo que dificultó la asignación de una tendencia clara en algunos tramos de la autopista. La variabilidad de los datos pudo deberse a factores como la heterogeneidad del pavimento, las condiciones climáticas y el tráfico vehicular, entre otros. Además, debido a que el proyecto se realizó con un número limitado de mediciones, se presentaron algunos condicionamientos para establecer patrones de deterioro más precisos a

lo largo del tiempo. Es importante destacar que la falta de un mayor número de mediciones podría haber influido en la exactitud de las ecuaciones de deterioro obtenidas y en la predicción de la fecha de incumplimiento.

No obstante, se logró desarrollar una herramienta para la visualización las curvas de deterioro para cada uno de los indicadores y los 50 kilómetros analizados de la Autopista Medellín – Bogotá. A dicha herramienta, se le puede seguir suministrando datos de medición frecuentemente con el fin de lograr una presentación interactiva del estado del pavimento en el corredor. De igual manera, esta herramienta representa para los encargados del mantenimiento no solo una comprensión más profunda y acotada del comportamiento del pavimento a lo largo del corredor vial, sino que también representa la posibilidad de tomar decisiones informadas sobre el momento adecuado para realizar intervenciones preventivas. Además, ha demostrado su utilidad para identificar sectores críticos y priorizar acciones de mantenimiento, representando una oportunidad para pasar de una perspectiva reactiva a una predictiva y preventiva en la gestión del pavimento. Su accesibilidad y facilidad de uso han hecho que sea una herramienta valiosa para el equipo de mantenimiento, proporcionando una mayor eficiencia en la planificación y ejecución de actividades de conservación de la infraestructura vial.

10. Conclusiones

- La carretera de 50 kilómetros presenta en su mayoría un comportamiento favorable y está en cumplimiento con los límites establecidos en el contrato de concesión para los indicadores de IRI, Ahuellamiento y Coeficiente de Fricción (CRD)
- El indicador IRI presentó un comportamiento favorable al cumplimiento del límite contractual en todos los kilómetros de la carretera concesionada. Se observó una tendencia general hacia valores bajos de regularidad, lo que indica un buen estado del pavimento en términos de comodidad para los usuarios y seguridad vial.

- El indicador de Ahuellamiento también cumplió con los límites establecidos en el contrato de concesión en la mayoría de los carriles y kilómetros. Sin embargo, se identificaron algunos carriles con un comportamiento más acelerado hacia el incumplimiento, lo que requiere un monitoreo constante y una planificación adecuada de intervenciones para evitar el deterioro en el corto plazo.
- El indicador de Coeficiente de Fricción demostró un comportamiento favorable al cumplimiento en la mayoría de los kilómetros y carriles. Sin embargo, algunos carriles mostraron una tendencia hacia el incumplimiento más rápido, lo que sugiere la necesidad de un monitoreo continuo y la planificación de intervenciones para mantener adecuadamente la fricción del pavimento y garantizar la seguridad de los usuarios.
- El indicador de Porcentaje de Área Afectada por Grietas y Fisuras reveló un comportamiento más variable y crítico en comparación con otros indicadores. Se identificaron carriles en incumplimiento con respecto al límite contractual, lo que requiere una atención inmediata y planificación de intervenciones para evitar un deterioro mayor.
- La sectorización de los datos por kilómetro permitió un análisis más acotado y preciso del comportamiento del deterioro en diferentes tramos de la carretera, facilitando la identificación de patrones y tendencias del deterioro en cada indicador.
- Los mantenimientos rutinarios pueden afectar el comportamiento de los datos, dado que cuando se ejecutan, se reestablece la carpeta de rodadura y por lo tanto se crea una nueva historia en el deterioro del pavimento. Esto puede ser una de las razones por las que se observa alta dispersión en los datos y baja correlación con las ecuaciones encontradas. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los períodos de mantenimiento en los análisis de datos y considerar su posible impacto en el comportamiento de los indicadores del pavimento. La inclusión de estos períodos de mantenimiento en los

modelos de análisis de datos permitirá una descripción más precisa del comportamiento de los indicadores del pavimento y su incumplimiento a lo largo del tiempo.

- En la determinación de las ecuaciones que definen el deterioro en pavimentos flexibles, se deben considerar, además de las mediciones del estado del pavimento, datos respecto al tráfico, clima y estructura del sector evaluado; con el fin de que se puedan generar ecuaciones con un mayor grado de exactitud.
- Los carriles derechos de ambas calzadas presentaron mayores daños en los indicadores, especialmente en el porcentaje de área afectada; lo anterior tiene sentido puesto que los vehículos de carga pesada suelen transitar la mayoría del tiempo por estos carriles. Por lo tanto, a la hora de una evaluación respecto a los lugares que se deben intervenir, son los carriles derechos los que deben tener prelación.
- Considerando el hecho de que en los 50km que se analizaron, solo se cuenta con báscula en la calzada que cubre el sentido Medellín-Bogotá y que en las curvas de deterioro se evidenció que la calzada Bogotá-Medellín tenía más daño en cada uno de sus indicadores, se debe tener un monitoreo especial a las condiciones de deterioro de esta última calzada.
- A partir de las fechas probables de incumplimiento para cada indicador por kilómetro-carril, es posible para los profesionales encargados del mantenimiento de los 50km de doble calzada, realizar un cronograma de intervenciones en el que se establezca para cada sector e indicador la proximidad al incumplimiento respecto al contrato de concesión, de manera que se logren identificar los sectores críticos y de esta manera empezar a implementar metodologías de mantenimiento basadas en datos y no basadas en la existencia de deterioros avanzados.
- Gracias a la clasificación de daños que se realizó de acuerdo al manual del INVIAS en cada imagen tomada para el indicador de Porcentaje de Área Afectada, se pudo

concluir que a lo largo de los cuatro carriles que conforman los 50km de doble calzada pertenecientes a la autopista Medellín-Bogotá, los tipos de daños que representaron más área en afectación fueron las fisuras transversales y longitudinales (FT,FL). Este tipo de daños representan las consecuencias de la fatiga generada por las cargas dinámicas sobreimpuestas en la carpeta de rodadura.

- Considerando que el indicador de Ahuellamiento se definió como un indicador que no es crítico en el mantenimiento, se puede afirmar que en el tramo objeto de estudio la capacidad portante de la subrasante no es un factor determinante en el deterioro y que los daños están más relacionados con el efecto del tráfico en las capas ligadas de la estructura de pavimento.
- Para algunos sectores en específico se encontró que algunos indicadores, contrario a lo esperado, no están tendiendo al deterioro, por el contrario, su comportamiento muestra una mejora a lo largo del tiempo. Se concluye que este tipo de comportamiento se puede generar por algún tipo de intervención realizada a la carpeta asfáltica. Sin embargo, se debe seguir monitoreando este fenómeno encontrado especialmente en el indicador de Fricción.
- Esta metodología de análisis de datos provenientes de mediciones en campo se puede llegar a implementar en otros indicadores tales como la retrorreflectividad que debe cumplir la señalización vertical y horizontal en las carreteras, pues al igual que la estructura de pavimento, estos elementos tienden al deterioro en el tiempo y juegan un papel importante en la seguridad de los usuarios de la vía.
- Teniendo en cuenta el potencial de estas metodologías de análisis de datos y herramientas en la gestión del mantenimiento de las concesiones viales, se puede concluir que estos análisis podrían ser especialmente útiles para las nuevas generaciones de contratos de concesiones viales en Colombia, ya que los límites de

cumplimiento en los parámetros que determinan el estado del pavimento son mucho más rigurosos en estos contratos. De hecho, en algunos casos de proyectos de iniciativas privadas, el retorno de la inversión está supeditado al desempeño que se tenga en el mantenimiento de estos parámetros.

- El uso de herramientas como Python para la representación gráfica e interactiva de los datos de medición de los indicadores del pavimento, así como la inclusión de la fecha probable de incumplimiento respecto al contrato de concesión para cada kilómetro e indicador en específico, son herramientas que aportan a la gestión del pavimento. Estas herramientas pueden llegar a permitir una identificación más precisa de las áreas del pavimento que necesitan atención y a la vez facilitan una toma de decisiones más informada y basada en datos.

11. Recomendaciones

- Se recomienda de manera especial la implementación de este tipo de metodologías a los entes gubernamentales encargados de la operación y mantenimiento de miles de kilómetros de carreteras fundamentales para desarrollo del país. Al implementar este tipo de herramientas para gestionar el mantenimiento de las vías que tienen a cargo dichos entes, se podría disminuir la probabilidad de que existan sectores en los que el avance del deterioro de la carpeta asfáltica se tan alto que se generen sucesos lamentables como accidentes o pérdidas considerables en el nivel de servicio, además de protestas y problemas sociales. Por otro lado, implementar este tipo de sistemas de gestión, representaría para estos entes una posibilidad para destinar los recursos del mantenimiento de la malla vial de una manera objetiva, basada datos e información.
- Para lograr un mejor ajuste a las ecuaciones que describen el comportamiento del deterioro de los indicadores que hacen parte del índice de estado del pavimento, es

importante garantizar que las mediciones se tomen con herramientas de alta precisión y de manera consistente a lo largo del tiempo. Además, es importante que se realicen calibraciones periódicas para asegurar su precisión.

- Se identificó que es posible y a la vez necesario realizar un análisis estadístico más detallado. En lugar de utilizar una sola ecuación para describir el comportamiento del deterioro del pavimento, se pueden utilizar técnicas de análisis estadístico más sofisticadas, como el análisis de series de tiempo o el análisis de regresión múltiple, para tener en cuenta la variabilidad en las mediciones y otros factores que puedan afectar el comportamiento del pavimento.
- Es importante considerar otros factores como lo son los ambientales y de tráfico, pues el comportamiento del deterioro pavimento puede verse afectado por una serie de factores, como lo es el clima, la carga de tráfico y la velocidad de los vehículos. Por lo tanto, es importante considerar estos factores al realizar mediciones y análisis de datos.
- Se recomienda para Devimed S.A, invertir en herramientas que le permitan la medición de los indicadores de Ahuellamiento y Fricción, con el fin de tener una base de datos propia, en la que al igual que en los indicadores de IRI y Porcentaje de Área afectada, los resultados de las mediciones sean confiables por el hecho de que se podría tener certeza acerca de la metodología implementada a la hora de realizar las mediciones. Además, contar con estas herramientas y sus resultados abre la posibilidad de comparar los datos obtenidos por la interventoría y por el concesionario, de manera que se pueda analizar el comportamiento de los datos y la posible proveniencia de discrepancias.
- Se recomienda seguir con las mediciones rigurosas en campo para cada uno de los indicadores y extender la cantidad de mediciones que se establecen en el contrato de concesión. Esto con el fin de tener más datos que representen de una manera más

ajustada el comportamiento del deterioro en el tiempo, pues mientras más datos de adecuados de medición se tengan, se podría identificar de una manera más simple la tendencia del deterioro y de esta manera determinar unas fechas de incumplimiento más ajustadas a la realidad.

- Como se mencionó en las conclusiones, el uso de herramientas de visualización de datos interactivas puede proporcionar una forma eficiente y efectiva de explorar los datos de medición de pavimento y facilitar la toma de decisiones. Se recomienda el uso de estas herramientas para futuros análisis de datos de pavimento.
- Se recomienda seguir trabajando en modelos de mantenimiento predictivos pues con base en los análisis de datos provenientes de mediciones en campo, se puede implementar un sistema de mantenimiento predictivo que permita identificar y resolver problemas de pavimento de manera oportuna y eficiente, antes de que se conviertan en problemas mayores. Esto puede resultar en un ahorro significativo de costos a largo plazo.
- Se recomienda utilizar técnicas de modelado más sofisticadas para describir el comportamiento del pavimento. Por ejemplo, se podrían utilizar modelos de aprendizaje automático para predecir el deterioro del pavimento a partir de los datos de medición históricos.
- En especial para las nuevas concesiones viales del país, se recomienda considerar el uso de análisis predictivos de deterioro del pavimento. Estos análisis pueden proporcionar información valiosa sobre el estado del pavimento y permitir la implementación de un mantenimiento preventivo que minimice los riesgos y de esta manera se pueda maximizar la vida útil del pavimento.
- Así mismo se sugiere la incorporación de técnicas de aprendizaje automático para la identificación de patrones y tendencias en los comportamientos de los datos de las

mediciones de los indicadores del estado pavimento, lo que permitiría una mejor comprensión del comportamiento del pavimento y la predicción de su deterioro. El uso de estas técnicas también podría mejorar la precisión de las predicciones.

12. Bibliografía

Chile, P. U. (2010). *Modelo de Evaluación Técnica del Desempeño del Mantenimiento de Pavimentos Flexibles*. Chile.

Delbono, H. L., & Rebollo, O. R. (2017). *AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS UTILIZANDO GEOSINTÉTICOS*. Medellín : Congreso Ibero-Latinoamericano del asfalto .

Gaete, R., Solminihaç, H. d., & Echeverría, G. (1988). Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos en Chile. *Revista de ingeniería de construcción* , 17.

Gamboa, G. (2019). *Análisis Técnico del Deterioro del Pavimento De Las Concesiones Viales en Colombia Conforme a los Parámetros de Evaluación Establecidos en los Contratos de Concesión para la Evaluación de Modelos del Comportamiento de los Pavimentos*. Bogotá-Colombia.

Gao, J. N. (2014). *Roughness Progression Model for Asphalt Pavements Using Long Term Pavement Performance Data*.

Gong, Q. D. (2020). *Performance Evaluation of Asphalt Pavement Resurfacing Treatments Using Structural Equation Modeling*.

- Guerra, C. C. (2014). *EFFECTOS DE LA TEMPERATURA EN EL MÓDULO RESILIENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL EN LA CIUDAD DE AREQUIPA*. AREQUIPA: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA .
- Hugo Alexander Rondón, F. R. (2007). *Deformación Permanente De Materiales Granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del conocimiento*. Medellín.
- M., N. A. (2020). *International Roughness Index Prediction Model For Flexible Pavements* . Tennessee: International Journal of Pavement Engineering.
- Marcobal, J. R., Díaz, R., Marquez, W., & Saldaña, D. (2017). *Evaluación de la rugosidad (IRI) en caminos pavimentados de geometría restringida*. Medellín: Congreso Ibero-Latinoamericano del asfalto.
- Meedoga, J. N., & Gao, S. (2014). Roughness Progression Model for Asphalt Pavements. *American Society of Civil Engineers.*, 7.
- MORENO, R., ZEBALLOS, T., & VACCAREZZA, G. (2013). EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL AGRIETAMIENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN CARRETERAS DE CHILE. *REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN*, 15.
- Muñoz, G. P. (2017). *Desarrollo de Curvas de Deterioro para Pavimento Flexible*. Alajuela.

- Pedraza, A. M. (2015). *Influencia de las técnicas de conservación y de la incertidumbre de las curvas de deterioro en el análisis de ciclo de vida de pavimentos flexibles*. Bogotá: Facultad de ingeniería. Universidad de los Andes .
- Pérez, D. A. (2016). *La construcción de la carretera Medellín-Bogotá y el contexto regional en el Oriente Antioqueño*. Medellín: Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Sociales y Humanas .
- Rebolledo, R. J. (2010). *Deterioros En Pavimentos Flexibles y Rígidos* . Valdivia-Chile.
- Roco, V., Fuentes, C., & Valverde, S. (2014). *EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO EN PAVIMENTOS CHILENOS* . Chile.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. (2009). DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MATERIALES GRANULARES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: ESTADO DEL CONOCIMIENTO . *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* , 24.
- Sánchez, I., & Solminihaç, H. d. (1989). El IRI: un indicador de la regularidad superficial . *REVISTA DE INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN* , 16.
- Solminihaç, H. d., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2019). *Gestión de Infraestructura Vial, Tercera Edición* . Chile: Alfaomega.
- Vargas, G. A. (2010). ASPECTOS Y CONSIDERACIONES IMPORTANTES EN EL CÁLCULO DEL INDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI). *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, 15.