

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil


Diseño de un sistema de gestión de infraestructura vial para el oeste del centro urbano de Santa Isabel

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Lili Katyuska Cedillo Romero
Wilson Steven Pauta Paredes

Director:

Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco
ORCID:  0000-0002-5797-1153

Cuenca, Ecuador

2023-07-31

Resumen

La infraestructura vial de la parroquia Santa Isabel, es un componente vital dentro del patrimonio de la ciudad; pues es responsable del correcto desarrollo social y económico de sus moradores. El presente trabajo plantea un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial mediante un programa interactivo, con el lenguaje de programación Python, para determinar el estado de sus vías y recomendar los mantenimientos adecuados hacia su correcta planificación.

El software permite el procesamiento automatizado de datos y la determinación del Índice de Condición Funcional de Pavimento (ICF), similar al Índice de Condición del Pavimento (PCI), implementado por el Departamento de transporte de Virginia y de Carolina del Norte. Este método consiste en realizar un diagnóstico visual de la condición de las vías, a través de la metodología Windshield, identificando los deterioros más comunes, su severidad y frecuencia. Este método fue validado por el PCI y se obtuvieron resultados semejantes con R^2 igual a 0.96 lo que demuestra la confiabilidad adecuada del método Windshield.

Además, se implementó una herramienta complementaria de toma de decisiones para obtener resultados jerárquicos de la condición del pavimento a nivel de red, sugerir tipos de tratamientos y proponer recomendaciones prioritarias para futuros pavimentos; mediante matrices de Markov, tanto para pavimento rígido, flexible y adoquinado.

Por último, se realizó un análisis de sostenibilidad donde se corrobora la falta de una planificación apropiada, por lo que se da una respuesta rápida y oportuna para obtener un deterioro controlado del pavimento disminuyendo el gasto de recursos y su huella ambiental.

Palabras clave: sistema de gestión de infraestructura, Windshield, sostenibilidad, índice de condición del pavimento, Markov

Abstract

The road infrastructure of Santa Isabel parish is a vital component within the city's heritage, as it is responsible for the proper social and economic development of its residents. This paper proposes a Road Infrastructure Management System through an interactive program, using the Python programming language, to determine the condition of its roads and recommend appropriate maintenance for their proper planning.

The software allows for automated data processing and the determination of the Pavement Functional Condition Index (PFCI), similar to the Pavement Condition Index (PCI) implemented by the Departments of Transportation of Virginia and North Carolina. This method involves visually diagnosing the condition of the roads using the Windshield methodology, identifying the most common deteriorations, their severity, and frequency. The PCI validated this method, obtaining similar results with an R2 value of 0.96, demonstrating the method's appropriate reliability.

Additionally, a complementary decision-making tool was implemented to obtain hierarchical results of pavement condition at the network level, suggest types of treatments, and propose prioritized recommendations for future pavements using Markov matrices for rigid, flexible, and cobblestone pavements.

Finally, a sustainability analysis was conducted, confirming the lack of appropriate planning, leading to a prompt and timely response to achieve controlled pavement deterioration while reducing resource expenditure and environmental footprint.

Keywords: infrastructure management system, Windshield, sustainability, pavement condition index, Markov

Índice de contenido

CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES	16
1.1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.2. ANTECEDENTES	16
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
1.4. JUSTIFICACIÓN	19
1.5. OBJETIVOS.....	20
1.5.1. Objetivo general.....	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
1.6. ALCANCE	20
CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO	23
2.1. INFRAESTRUCTURA.....	23
2.2. SISTEMA DE GESTIÓN VIAL.....	23
2.3. SOSTENIBILIDAD.....	25
2.4. PAVIMENTOS Y SU CLASIFICACIÓN	25
2.4.1. Pavimentos Flexibles	26
2.4.2. Pavimentos Rígidos	27
2.4.3. Pavimentos Articulados	28
2.5. FALLAS	28
2.6. MANTENIMIENTOS.....	33
2.7. METODOLOGIA WINDSHIELD	34
2.8. METODOLOGÍA PCI	38
2.9. MATRICES DE MARKOV	38
2.10. COSTOS UNITARIOS	39
2.11. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	39
2.12. ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD.....	40
2.12.1. INVEST	41
2.12.2. PaLATE.....	42
CAPÍTULO 3 - MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	43
3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS	44

3.3. INVENTARIO VIAL.....	45
3.4. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE LA CONDICIÓN DE VÍAS PAVIMENTADAS.....	47
3.4.1. Metodología Windshield	47
3.4.2. Metodología Windshield aplicada a pavimentos flexibles.....	50
3.4.3. Metodología Windshield aplicada a pavimentos rígidos	55
3.4.4. Metodología PCI para validación de método Windshield	60
3.4.5. Metodología de comparación y validación del método Windshield y PCI	64
3.4.6. Metodología Windshield aplicada a pavimentos adoquinados	84
3.4.7. Metodología de validación de Windshield para pavimentos adoquinados	86
3.5. METODOLOGÍA DE TOMA DE DECISIONES.....	95
3.6. METODOLOGÍA DE SOSTENIBILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTOS	107
3.6.1. INVEST.....	108
3.6.2. PaLATE	109
CAPÍTULO 4 - MANUAL DEL PROGRAMA DE GESTIÓN.....	111
4.1. ENTRADA DE DATOS	111
4.2. VISUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	112
4.3. TOMA DE DECISIONES.....	113
4.3.1. Mantenimiento por falla.....	114
4.3.2. Mantenimientos.....	116
4.3.3. Matrices de Markov	120
4.4. ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD	125
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y ANÁLISIS	126
5.1. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO WINDSHIELD RESPECTO AL PCI 126	
5.2. RESULTADOS DEL SOFTWARE (ICF).....	128
5.3. RESULTADOS DE TIPOS DE MANTENIMIENTOS Y TRATAMIENTOS QUE DETERMINA EL PROGRAMA.....	131
5.4. RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DE LA RED VIAL, USANDO MATRICES DE MARKOV.	137
5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD	142
5.5.1. RESULTADOS DE INVEST	142
5.5.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	146
5.5.3. ANALISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA.....	147

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	158
6.1. CONCLUSIONES.....	158
6.2. RECOMENDACIONES.....	160
6.2.1. Recomendaciones del Software “SGI Santa Isabel”.....	161
Referencias	162
Anexos	166

Índice de figuras

Figura 1. Circulo vicioso de gestión	25
Figura 2. Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos	28
Figura 3. Mapa de Vialidad de Santa Isabel	43
Figura 4. Mapa con nodos y diferentes pavimentos de Santa Isabel	46
Figura 5. Gráfico de piel de cocodrilo obtenido de la Norma ASTM D6433-11	48
Figura 6. Fallas en pavimentos flexibles.	51
Figura 7. Fallas en pavimentos rígidos.	56
Figura 8. Estados de los pavimentos según el PCI.....	63
Figura 9. Fallas en pavimentos adoquinados.	84
Figura 10. Valores de predicción de deterioro para un mantenimiento Preventivo.	104
Figura 11. Valores de predicción de deterioro para un mantenimiento Correctivo.	104
Figura 12. Valores de predicción de deterioro para un Recapeo.	105
Figura 13. Valores de predicción de deterioro para una Rehabilitación.	106
Figura 14. Valores de predicción de deterioro para una Reconstrucción.	107
Figura 15. Menú principal del programa de gestión vial	111
Figura 16. Ventana para agregar nuevo tramo.....	112
Figura 17. Ventana para visualizar base de datos	113
Figura 18. Ventana de toma de decisiones.....	114
Figura 19. Ventana de mantenimiento por falla.....	115
Figura 20. Informe de resultados de mantenimiento.....	116
Figura 21. Ventana para mantenimiento según criterios	117
Figura 22. Botón para configuración de criterios	117
Figura 23. Valores por defecto de los 8 criterios	118
Figura 24. Ejemplo de opciones de rehabilitación para un tramo	118
Figura 25. Ventana para guardar resultados de evaluación con pdf en la PC.....	119
Figura 26. Archivo pdf de resultado de evaluación	120
Figura 27. Ventana para aplicar matrices de Markov	120
Figura 28. Botón para configurar los valores de las matrices de Markov	121
Figura 29. Ventana para elegir el mantenimiento y años de proyección	121
Figura 30. Ventana para actualizar valores de matriz	122
Figura 31. Ventana de evolución de la red vial.....	123
Figura 32. Archivo pdf de la evolución de la red vial.....	124
Figura 33. Botones para análisis del costo de ciclo de vida.	125
Figura 34. Dispersión de datos PCI vs ICF	127
Figura 35. Estado de red vial en pavimentos flexibles.....	137
Figura 36. Estado de red vial en pavimentos flexibles con porcentajes (10 años).....	137
Figura 37. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos flexibles.	138
Figura 38. Estado de red vial en pavimentos rígidos.	139
Figura 39. Estado de red vial en pavimentos rígidos con porcentajes (10 años).....	139
Figura 40. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos rígidos.	140

Figura 41. Estado de red vial en pavimentos adoquinados	140
Figura 42. Estado de red vial en pavimentos adoquinados con porcentajes (10 años) ...	141
Figura 43. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos adoquinados.....	141
Figura 44. Gráfica de pastel del estado de la red vial total	142
Figura 45. Resultado en INVEST de alternativa 1.	143
Figura 46. Resultado en INVEST de alternativa 2.	143
Figura 47. Ejemplo de LCA de la vía "Rafael Galarza"	146
Figura 48. Costos de Mantenimiento de Alternativa 1.	147
Figura 49. Costos de mantenimiento de Alternativa 2.	148
Figura 50. Costos a lo largo del tiempo para la vía Rafael Galarza	149
Figura 51. Estado de red vial a lo largo del tiempo.	150
Figura 52. Consumo de energía de la Alternativa 1.....	152
Figura 53. Consumo de energía de la Alternativa 2.....	153
Figura 54. Emisiones de CO ₂ para Alternativa 1.	154
Figura 55. Emisiones de CO ₂ para Alternativa 2.	154
Figura 56. Ciclo de vida Potencial de Toxicidad en Humanos para alternativa 1.....	155
Figura 57. Ciclo de vida Potencial de Toxicidad en Humanos para alternativa 2.....	156

Índice de tablas

Tabla 1. Fallas para pavimentos flexibles y mixtos.....	30
Tabla 2. Fallas para pavimentos rígidos.....	30
Tabla 3. Fallas para adoquines.....	32
Tabla 4. Condiciones del pavimento.....	36
Tabla 5. Longitud de red vial de la parroquia Santa Isabel.....	44
Tabla 6. Valores deducibles según severidad para piel de cocodrilo.....	48
Tabla 7. Coeficientes para el cálculo de ICF.....	52
Tabla 8. Valores para el cálculo del ICF.....	53
Tabla 9. Valores para el cálculo del ICF.....	57
Tabla 10. Valores para el cálculo del ICF.....	59
Tabla 11. Deterioros para pavimentos flexibles.....	63
Tabla 12. Deterioros para pavimentos rígidos.....	64
Tabla 13. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1B-1C.....	65
Tabla 14. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1B-1C.....	67
Tabla 15. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1B-1C.....	67
Tabla 16. Obtención del VDC para PCI para tramo 1B-1C.....	68
Tabla 17. Resultado de PCI para tramo 1B-1C.....	68
Tabla 18. Resultado de PCI para tramo 1C-1D.....	69
Tabla 19. Resultado de PCI para tramo 1D-1E.....	69
Tabla 20. Resultado de PCI para tramo 1E-1F.....	70
Tabla 21. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1B-1C.....	70
Tabla 22. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1C-1D.....	72
Tabla 23. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1D-1E.....	74
Tabla 24. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1E-1F.....	76
Tabla 25. Resultado PCI para tramo 1A-1B.....	78
Tabla 26. Resultado PCI para tramo 1A-60A.....	78
Tabla 27. Resultado PCI para tramo 60A-62A.....	79
Tabla 28. Resultado PCI para tramo 62A-63A.....	79
Tabla 29. Hoja de cálculo de ICF del tramo 1A-1B.....	80
Tabla 30. Hoja de cálculo de ICF del tramo 1A-60A.....	81
Tabla 31. Hoja de cálculo de ICF del tramo 60A-62A.....	82
Tabla 32. Hoja de cálculo de ICF del tramo 62A-63A.....	83
Tabla 33. Valores para cálculo del ICF.....	85
Tabla 34. Factores para obtención de ICF.....	87
Tabla 35. Resultado de ICF del tramo 2B-2C.....	88
Tabla 36. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2B-2C.....	88
Tabla 37. Resultado de ICF del tramo 2C-3C.....	90
Tabla 38. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2C-3C.....	90
Tabla 39. Resultado de ICF del tramo 2A-2B.....	91
Tabla 40. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2A-2B.....	92

Tabla 41. Resultado de ICF del tramo 1B-2B	93
Tabla 42. Resultado ICF, método Windshield del tramo 1B-2B	93
Tabla 43. Resultado de ICF del tramo 1C-2C1	94
Tabla 44. Resultado ICF, método Windshield del tramo 1C-2C1	94
Tabla 45. Mantenimientos para flexibles respecto a severidad de falla.	96
Tabla 46. Mantenimientos para rígidos respecto a severidad de falla.	97
Tabla 47. Mantenimientos para adoquinados respecto a severidad de falla.	99
Tabla 48. Tratamiento sugerido en base a la valoración del resultado ponderado.	100
Tabla 49. Criterios para el análisis del tipo de mantenimiento.	101
Tabla 50. Tratamientos según tipo de mantenimiento y tipo de pavimento.	101
Tabla 51. Rubros para cambio de carpeta asfáltica y bacheo.	109
Tabla 52. Resultados de PCI y Windshield para pavimento flexible	126
Tabla 53. Resultados de PCI y Windshield para pavimento rígido.	126
Tabla 54. Resultados de PCI y Windshield para pavimento articulado.	127
Tabla 55. Resultados de ICF por cada vía.	128
Tabla 56. Mantenimientos para la calle Rafael Galarza	131
Tabla 57. Mantenimientos recomendados para toda la red vial	132
Tabla 58. Diferencias entre alternativas probadas en INVEST	144
Tabla 59. Resultados de presupuestos para dos alternativas	148
Tabla 60. Tabla Comparativa de Resultados de las dos alternativas.	157
Tabla 61. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1C-1D	166
Tabla 62. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1C-1D	166
Tabla 63. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1C-1D	167
Tabla 64. Obtención del VDC para PCI para tramo 1C-1D	167
Tabla 65. Resultado de PCI para tramo 1C-1D	167
Tabla 66. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1D-1E	167
Tabla 67. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1D-1E	168
Tabla 68. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1D-1E	168
Tabla 69. Obtención del VDC para PCI para tramo 1D-1E	169
Tabla 70. Resultado de PCI para tramo 1D-1E	169
Tabla 71. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1E-1F	170
Tabla 72. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1E-1F	170
Tabla 73. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1D-1E	171
Tabla 74. Obtención del VDC para PCI para tramo 1E-1F	171
Tabla 75. Resultado de PCI para tramo 1E-1F	172
Tabla 76. Hoja de cálculo de PCI para tramo 1A-1B	172
Tabla 77. Cálculo número máximo de VD para tramo 1A-1B	173
Tabla 78. Cálculo de VDC para tramo 1A-1B	173
Tabla 79. Resultado PCI para tramo 1A-1B	173
Tabla 80. Hoja de cálculo de PCI para tramo 1A-60A	174
Tabla 81. Cálculo número máximo de VD para tramo 1A-60A	174
Tabla 82. Cálculo de VDC para tramo 1A-60A	174
Tabla 83. Resultado PCI para tramo 1A-60A	174

Tabla 84. Hoja de cálculo de PCI para tramo 60A-62A.....	175
Tabla 85. Cálculo número máximo de VD para tramo 60A-62A.....	175
Tabla 86. Cálculo de VDC para tramo 60A-62A.....	175
Tabla 87. Resultado PCI para tramo 60A-62A	176
Tabla 88. Hoja de cálculo de PCI para tramo 62A-63A.....	176
Tabla 89. Cálculo número máximo de VD para tramo 62A-63A.....	176
Tabla 90. Cálculo de VDC para tramo 62A-63A.....	177
Tabla 91. Resultado PCI para tramo 62A-63A	177

Agradecimiento

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi director de tesis, Ing. Daniel Mogrovejo. Su orientación experta, apoyo constante y dedicación incansable fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. Su sabiduría y experiencia fueron una guía invaluable en cada etapa de la investigación. Agradezco sinceramente su paciencia, valiosos consejos y sugerencias que contribuyeron en gran medida a elevar la calidad de este trabajo. También quiero reconocer y agradecer a los distinguidos miembros de mi comité de tesis, Ing. Jaime Bojorque e Ing. Elina Ávila. Su tiempo, conocimientos y valiosas contribuciones fueron fundamentales para enriquecer y perfeccionar este estudio. Agradezco especialmente sus comentarios constructivos y su dedicación en el análisis y revisión de esta tesis.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros de estudio y amigos Carolina, Tania, Josué y Marcos, quienes me brindaron un apoyo incondicional y aliento constante a lo largo de este desafío académico. Y en especial a mi compañero de tesis Steven, por compartir momentos, intercambiar ideas y superar obstáculos juntos; fue una experiencia enriquecedora. Agradezco de corazón su amistad, motivación y aliento, los cuales fueron un pilar fundamental durante este emocionante viaje.

A mis queridos padres Noemi y César, y a mi hermano Roger, les estoy profundamente agradecida por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y comprensión durante todo mi camino académico. Su sacrificio y aliento constante fueron un faro de inspiración en momentos de dificultad. Agradezco sinceramente su presencia, aliento y por ser mi fuente de fortaleza en cada paso de este proceso. Nada de esto sería posible sin ustedes.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi inmensa gratitud a mi novio, Ing. Julio Cabrera por brindarme su tiempo, conocimientos y colaboración. Sin su generosidad y disposición, esta investigación no habría sido posible. A todos los participantes, profesionales y expertos que contribuyeron aportando sus perspectivas valiosas, les agradezco de corazón. A cada una de las personas mencionadas anteriormente y a todas aquellas que han dejado una huella en mi viaje académico, les brindo mi más profundo agradecimiento por su inestimable contribución, confianza y apoyo. Han sido fundamentales para alcanzar este logro académico.

Con sincera gratitud, Lili Katyuska Cedillo Romero

Agradecimiento

Agradezco sinceramente a mi director de tesis, cuya orientación experta y entusiasmo por la investigación fueron fundamentales para guiar mis pasos en este camino. También deseo agradecer a los miembros de mi comité de tesis por su tiempo y compromiso en evaluar y enriquecer este trabajo. Sus valiosos comentarios y sugerencias han contribuido significativamente a mejorar la calidad y profundidad de esta investigación.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros de estudio, amigos y a mi compañera de tesis Lili; quienes han sido mi apoyo incondicional en este viaje. Gracias por su paciencia, sus palabras de aliento, colaboración y confianza han hecho que este recorrido sea inolvidable y significativo. Gracias por compartir este desafío conmigo.

A mis padres y familiares, les agradezco de corazón. Su constante aliento y comprensión han sido el pilar en el que me he apoyado en los momentos difíciles. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración.

Por último, quiero extender mi gratitud a todas las personas que participaron en este estudio como voluntarios y colaboradores. Su participación generosa y disposición para compartir sus experiencias fueron esenciales para el éxito de esta investigación. A cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento por ser parte de este importante logro académico. Su contribución ha dejado una marca imborrable en mi trayectoria profesional y personal.

Con gratitud, Wilson Steven Pauta Paredes

Dedicatoria

A mis padres César y Noemi, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias por creer en mí y por alentarme a perseguir mis sueños con pasión y determinación. Esta tesis es el resultado de su amor y sacrificio, y se las dedico con todo mi corazón.

A mi querido hermano Roger, quien siempre me ha animado a superarme y alcanzar mis metas. Tu cariño y aliento han sido un motor en mi camino académico, y esta tesis es también un tributo a nuestro legado y complicidad.

A mi amado Julio, quien ha sido mi pilar estable y mi confidente en este camino académico. Tu amor, paciencia y apoyo incondicional han sido mi fortaleza en cada desafío. Gracias por creer en mí y por alentarme a perseguir mis metas con pasión. Esta tesis es también un tributo a nuestra unión y amor, que me ha inspirado a ser la mejor versión de mí misma. A todos mis amigos, quienes han estado a mi lado en las risas y en los desafíos. Gracias por ser mi sostén y por compartir este emocionante viaje conmigo. Esta tesis es también un reflejo de nuestra amistad y compañerismo.

A mis adorables hijos peludos Panki, Botas y Corina, quienes han sido mi fuente inagotable de amor y alegría. Sus miradas tiernas y sus travesuras han iluminado cada día de mi vida. Gracias por brindarme su lealtad incondicional y por ser mi refugio en los momentos difíciles. Esta tesis está dedicada con todo mi cariño a ustedes, mis fieles amigos de cuatro patas.

A mí persona, quien ha sido mi mayor crítica y mi mayor admiradora. Gracias por nunca rendirte y por perseverar en cada obstáculo que se presentó en el camino. Esta tesis es el resultado de tu esfuerzo, dedicación y perseverancia. Te felicito por este logro académico y te recuerdo que siempre puedes alcanzar tus metas si sigues creyendo en ti misma y trabajando con pasión y determinación.

A todas las personas que han sido parte de mi vida y que, de una u otra manera, han dejado una huella en mi camino. Esta tesis es un testimonio de nuestro encuentro y conexión.

Con gratitud y emoción, dedico esta tesis a cada uno de ustedes. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable, y este logro académico también es suyo. ¡Gracias por ser parte de este maravilloso capítulo de mi historia! Con cariño,

Lili Katyuska Cedillo Romero

Dedicatoria

Este trabajo de Titulación va dirigido a toda mi familia, a mis padres Wilson y Cecilia que me han acompañado de principio a fin, han sido mi motivación hacia un mejor porvenir en la vida y ayudarme a lograr cumplir mis ideales.

También a Gladis quien supo acogerme y soportarme a lo largo de estos años.

A mis hermanos David, Abigail y Martin por ser mi fortaleza y razón de seguir mejorando y creciendo como persona.

A mi mascota Max quien estuvo al principio de esta tesis, pero no pudo escoltarme hasta el final de la misma.

También se lo dedico a toda la gente: familia, amigos, conocidos y mi persona quienes me han acompañado, confían en mí y han sido parte de este viaje intelectual y académico.

Wilson Steven Pauta Paredes

CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy por hoy el cantón Santa Isabel está en crecimiento, por lo cual, es idóneo integrar un plan estratégico de movilidad capaz de mejorar la productividad y servicio a los usuarios mejorando su calidad de vida, desarrollo colectivo y situación económica. Por lo tanto, este proyecto plantea realizar un sistema de gestión de infraestructura vial en la zona urbana de la municipalidad de Santa Isabel, mediante un software que presenta la evaluación y diagnóstico de las vías estudiadas para dar la solución más asertiva a los deterioros, ya sea de manera preventiva o correctiva; y con medidas de sostenibilidad al analizar el ciclo de vida y el costo de ciclo de vida de la infraestructura (Ferrer, 2013). Esto es de gran ayuda para el municipio de Santa Isabel, sirve para una mejor planificación y desarrollo del cantón y sus usuarios.

1.2. ANTECEDENTES

La infraestructura vial es un componente vital dentro del patrimonio de una ciudad, esta tiene responsabilidad directa con el desarrollo social y económico, pues permite la comunicación e interrelación entre poblados, así como el intercambio de bienes y servicios. La disponibilidad de una infraestructura de transporte eficiente para el Centro Urbano de Santa Isabel, lleva a mejorar la calidad de vida tanto de la población propia del sitio, como de sus visitantes y la productividad del lugar. La construcción, mejoramiento y mantenimiento de cualquier ruta representa la concreción de anhelos a veces largamente esperados. En general, se sabe que toda obra vial es un avance definitivo que se integra al patrimonio público, y como tal, prestará servicio en buenas condiciones por un período muy prolongado (Navazo, 2011).

En Ecuador, las inversiones para mejorar y mantener la infraestructura de transporte son escasas, lo que lleva a un deterioro acelerado de las carreteras y se convierte en un gran problema. Además, el hecho de no tener requisitos que involucren criterios de sostenibilidad empeora la situación, ya que las autoridades responsables de tomar decisiones suelen

basar sus criterios de mantenimiento principalmente en aspectos económicos y poco o nada en aspectos ambientales o de sostenibilidad.

El método Windshield es un método de diagnóstico visual utilizado para evaluar la condición del pavimento de una carretera. El Departamento de Transporte de Virginia (VDOT, 2006) y el Departamento de Carolina del Norte (NCDOT, 2011) proponen una evaluación dinámica con sus tipos de fallas, severidades y frecuencias. Estos parámetros son importantes para la metodología y así identificar una calificación apropiada de la condición del pavimento.

El PCI es el método más utilizado por las entidades públicas y privadas, esta evaluación del pavimento se basa en la Normativa (ASTM D-6433, 2011). El método es muy confiable y eficiente, sin embargo, su uso es costoso, requiere de herramientas de medición (odómetro, cinta métrica, entre otros), demanda una mano de obra calificada y toma más tiempo de inspección. Este procedimiento es completo no obstante es complejo para los cantones con un bajo presupuesto.

De acuerdo con (Leiva, 2013), en general, el Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) consta de cuatro componentes principales: el inventario de red, evaluación de condición del pavimento, modelos de predicción del rendimiento y método de planificación.

De no implementarse un proceso eficaz, basado en información confiable y oportuna, y técnicas de ejecución y control adecuadas; la situación llevará a un aumento de la brecha entre las necesidades de mantenimiento y el mantenimiento ejecutado efectivamente. Lo que impactará la condición de la red vial y los costos totales de transporte (Wulff, Kogan, & Saavedra, 2010).

A medida que transcurre el tiempo, el crecimiento de la movilización terrestre y el avance tecnológico vehicular demandan una mejora significativa en la velocidad de circulación y sofisticación de los medios de transporte. El proceso de toma de decisiones correcto genera un impacto positivo en las actividades económicas y sociales de la población. Por lo tanto, la Municipalidad de Santa Isabel cumple un rol protagónico en la evolución y desarrollo de su población.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en Ecuador en las Municipalidades de la gran mayoría de cantones rurales del Ecuador y el Azuay no existen Sistemas de Gestión de Infraestructuras Vial (SGI), es decir, no constan con un procedimiento técnico que reporte un diagnóstico vial aceptable. Además, muchas evaluaciones del pavimento no registran, ni tienen una base de datos actualizados de su red vial. Esto significa que el inventario existente no es el adecuado para una planificación oportuna.

También, cada GAD Cantonal no ha garantizado la sostenibilidad, el avance social, económico, como también su autonomía comunitaria para un crecimiento equitativo y sostenible. Las condiciones bajas y el mal estado del tejido vial generan problemas a los usuarios debido a que no permiten una velocidad de circulación adecuada; causando demoras, congestión y reduciendo el nivel de servicio de la vía o en el peor de los casos sus deterioros pueden causar un accidente para el transeúnte (Apolo Bustamante, 2018).

La municipalidad de Santa Isabel carece de un software o aplicación capaz de dar una respuesta rápida que permita tomar decisiones más reales y estratégicas. Con el paso de los años, las vías pavimentadas experimentan cambios superficiales y un desgaste estructural que pone en riesgo al usuario. El ente encargado no interviene de forma pertinente para ser capaz de llevar un deterioro controlado de sus vías. En la selección de rehabilitación y mantenimiento no existe una precisión y relevancia de las soluciones necesarias del Centro Urbano de Santa Isabel. Por lo tanto, se desencadena una ineficiencia en el uso de los recursos de su población reduciendo el desarrollo productivo y social (Avila Redrovan & Albarracín Llivisaca, 2014).

Además, la ausencia de los criterios de sostenibilidad en la concepción de las políticas de servicio de la infraestructura vial; empeoran las condiciones del medio ambiente. Como resultado, la salud de los usuarios se ve afectada negativamente. Por lo que, existen emisiones contaminantes, ruido del tráfico y otros problemas ambientales relacionados, lo que afecta su bienestar. Estos problemas tienen un impacto directo en la capacidad de transporte y movilidad del cantón de Santa Isabel, causando restricciones de velocidad, interrupciones en el tráfico o incluso cierres de carreteras. (Tomassian, 2011)

1.4. JUSTIFICACIÓN

Es fundamental proponer una herramienta software capaz de brindar un diagnóstico rápido y altamente eficiente que brinde la solución más acertada. El método empleado a nivel de red es "Windshield Survey", el cual permite obtener como indicador de la condición del pavimento un índice similar al PCI (Pavement Condition Index), que de una manera más rápida permita tener una visión integral de la salud de la red vial. La Metodología Windshield podrá determinar e intervenir a tiempo según las condiciones del pavimento del segmento de vía analizado. Así, obtenido el Índice de Condición Funcional del Pavimento (ICF) se basará en los procedimientos adoptados por el Departamento de Transporte del estado de Virginia (VDOT, 2006) y el Departamento de Transporte de Carolina del Norte (NCDOT, 2011), la misma que generalmente consiste en hacer una encuesta de la condición de la vía de manera visual rápida y temprana. Luego se propone una planificación que defina procesos de mantenimiento, tiempos de intervención y rehabilitación de la infraestructura, causando que estos trayectos se operen por periodos cortos y así mismo que la ejecución de mejoras; represente menores costos para la entidad encargada de la red vial.

Además, las matrices de Markov" se utilizarán para evaluar la calidad de la red vial y determinar el porcentaje de vías en estado excelente, bueno, regular, pobre y estado fallado según la calificación obtenida. La priorización de las vías se basará en criterios sociales, como el acceso a puntos importantes que pueden ser centros de salud o unidades educativas. El objetivo final es asignar el presupuesto de mantenimiento de manera adecuada y determinar los momentos óptimos para realizar intervenciones en las vías. De esta forma, se puede evitar el deterioro acelerado del pavimento y optimizar el presupuesto destinado a la conservación de la red vial. (Kohan, 2014)

Finalmente, es necesario mantener actualizados los datos para cumplir con los tiempos de respuesta y mantener un buen nivel de servicio y un óptimo rendimiento de la red vial. Esto es, tomar decisiones a largo plazo con las matrices de Markov y un análisis de sostenibilidad asegurando la calidad y desempeño funcional; evitando riesgos y que el impacto de las acciones pasadas mejore las condiciones futuras del pavimento. En definitiva, la base de datos renovada regularmente evalúa y comprende la condición real de sus carreteras

garantizando el cumplimiento de las normas y reglamentaciones del caso. Por lo tanto, conforme a las necesidades planteadas, en el presente trabajo se desarrolla un Sistema de Gestión de Infraestructura Vial (SGI), el cual es fundamental para garantizar un deterioro de la red vial controlado y un aumento en el desarrollo económico y social del cantón Santa Isabel.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Implementar un sistema de gestión de infraestructura vial a nivel de red en el oeste de la cabecera cantonal de Santa Isabel.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Evaluar las condiciones del pavimento flexible, rígido y adoquinado, mediante la metodología Windshield Survey.
2. Validar la metodología Windshield Survey mediante el PCI (Pavement Condition Index) como indicador de deterioro a nivel de red.
3. Determinar la salud general de la red vial del centro urbano de Santa Isabel.
4. Proyectar los deterioros de la vía a través de las matrices de probabilidad de Markov.
5. Proporcionar matrices de solución mediante una planificación adecuada que incluya estrategias de mantenimiento y rehabilitación eficientes según el tipo de pavimento.
6. Realizar un análisis de sostenibilidad obteniendo dos alternativas viables para disminuir costos y aumentar la capacidad de servicio de la red vial.

1.6. ALCANCE

Se desarrollará una aplicación de escritorio de un sistema de gestión de infraestructura vial, el mismo que será implementado con lenguaje de programación Python. En el cual, se detalla una evaluación general de la condición de la red de pavimentos urbanos en la

cabecera cantonal de Santa Isabel. Cabe recalcar que existen limitaciones, ya que los datos empleados se obtuvieron bajo una inspección visual basada en el método Windshield y estos pueden estar sometidos a errores de apreciación según el perito encargado. Esto indicará los deterioros más comunes en los pavimentos, su severidad, frecuencia, y los mantenimientos o rehabilitaciones adecuados a los que se deben someter. (U. S. Department of Transportation, 2013)

Por lo tanto, en primer lugar, se caracterizó los pavimentos de la zona urbana perteneciente a la cabecera cantonal de Santa Isabel en: adoquín, asfalto, doble tratamiento bituminoso, lastre y pavimento rígido; siendo un total de 84.72 Km de red vial, que se dividen en Adoquín 2.2%, Asfalto 16.80%, Doble Tratamiento Bituminoso 4.30%, Lastre, 75.7%, y Pavimento Rígido 1%. El método Windshield es factible para vías con un pavimento tratado y no se recomienda para carreteras de lastre o tierra.

El área de estudio va enfocado a los pavimentos flexibles, rígidos y adoquinados por lo que se tiene un total de 16.94 km de vía, de los cuales en este proyecto se estudiará 9.2 km de vía pertenecientes a la zona oeste de la cabecera cantonal de Santa Isabel. Se aplica el método Windshield y se obtiene como indicador de la condición de la infraestructura el índice de condición funcional (ICF), bajo las ponderaciones según cada tipo de pavimento. Consecuentemente, basándose en la normativa (ASTM D-6433, 2011), se valida la información analizada de la red vial por el método PCI (Pavement Condition Index) para verificar la eficacia del proceso; usando el PCI para pavimentos asfálticos y rígidos, y basado en la (Norma Técnica Colombiana, 2004) para vías adoquinadas. Las entradas del software serán el tramo seleccionado, el área del tramo, tipo de pavimento y las fallas que contiene el mismo, dando como salida la descripción de los mantenimientos e intervenciones que requiere el pavimento (NEVI-12, 2013). Para los tratamientos de los pavimentos flexibles se considera el informe de (Vásquez, 2002) y el (Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 2016). Para los tratamientos de los pavimentos rígidos se basa en la (Unidad de Auditoría Técnica - LanammeUCR, 2023), y para introducir tratamientos para adoquinados se basa en (Higuera & Pacheco, 2010).

El MTOP, en su tomo 2, utiliza el método PCI para evaluar la condición de los pavimentos rígidos. Por lo tanto, no existe una guía disponible para determinar las diferencias y validar

los datos obtenidos mediante el nuevo método. Este método ha sido utilizado en Virginia, Estados Unidos (VDOT, 2006), para evaluar la red de pavimentos interestatales debido a su rápida aplicación y altamente eficiente capacidad para mostrar la salud general de la red vial. Si se considera la integridad estructural de los pavimentos y se relaciona con la posibilidad de deducir las deficiencias estructurales de ciertos tipos de deterioros (como piel de cocodrilo o agrietamiento), se puede sugerir que el pavimento está siendo sometido a cargas que superan su capacidad de diseño. Si este tipo de deterioro se presenta en una pequeña parte del pavimento, es posible concluir que se requiere un análisis más detallado de la parte estructural para tomar decisiones adecuadas.

Además, se aplica cadenas de Markov para evaluar el deterioro que presentan las vías con el tiempo. Se selecciona la mejor alternativa basada en el costo de construcción, mantenimiento y rehabilitación del pavimento; para obtener la solución óptima y aumentar el servicio de la red vial de Santa Isabel (Horvath, Pacca, Masanet, & Canapa, 2004). Por último, se emplea INVEST y PaLATE para realizar un análisis de costos con un enfoque de sostenibilidad.

CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO

2.1. INFRAESTRUCTURA

La infraestructura hace referencia a la red de instalaciones y servicios esenciales que se necesitan para el funcionamiento y el desarrollo de una sociedad. Esto incluye carreteras, puentes, aeropuertos, puertos, líneas de ferrocarril, edificios gubernamentales y otras estructuras públicas, así como el suministro de agua, energía, telecomunicaciones y otros servicios básicos. (Navazo, 2011)

Es un componente clave del desarrollo económico y social de una región o país, ya que permite el transporte de personas y bienes, y proporciona servicios esenciales para la vida cotidiana. La infraestructura también es importante para el comercio y la industria, ya que facilita el intercambio de bienes y servicios. (Tomassian, 2011)

Los ingenieros civiles trabajan en una variedad de proyectos de infraestructura, desde la planificación y diseño hasta la construcción y mantenimiento. Esto incluye la evaluación de factores como el terreno, el clima, el tráfico y el impacto ambiental, así como la selección de materiales y la gestión de proyectos. Los ingenieros civiles también deben asegurarse de que las estructuras sean seguras y cumplan con los códigos y regulaciones aplicables. Además de la construcción de nuevas estructuras, los ingenieros civiles también se ocupan del mantenimiento y la reparación de estructuras existentes para garantizar que sigan siendo seguras y eficientes. Esto puede incluir la inspección regular de estructuras como puentes y carreteras para detectar problemas temprano y tomar medidas para corregirlos. (Haas, Hudson, & Uddin, 2013).

2.2. SISTEMA DE GESTIÓN VIAL

El Sistema de Gestión de Infraestructura Vial (SGI) se refiere a las prácticas y tecnologías utilizadas para planificar, operar y mantener de manera eficiente la red de carreteras y otras vías de transporte terrestre. Esto incluye la gestión del tráfico, el mantenimiento de carreteras y otras estructuras viales, la planificación de rutas y horarios de transporte y la gestión de la seguridad vial. El objetivo principal del sistema de gestión vial es mejorar la

eficiencia del transporte terrestre y la seguridad en las carreteras, lo que puede contribuir a una mayor productividad y una mejor calidad de vida para los ciudadanos. Para lograr esto, el sistema de gestión vial puede utilizar tecnologías como el análisis de tráfico en tiempo real, el seguimiento de vehículos y el uso de señalización y control de tráfico automatizado.

Además, los cambios de las condiciones que surgen por el uso de la red terrestre y los agentes climáticos sobre la infraestructura resaltan la dinámica del proceso de gestión. Las incertidumbres de las variables a largo plazo ponen a prueba la eficacia de la red y pueden alterar los resultados conforme las condiciones de contorno cambian afectando los resultados. La información actualizada de su estado permitirá disponer de nueva información para determinar necesidades futuras, y los resultados obtenidos permitirán ajustar los modelos de proyección o modelos de deterioro para establecer una planificación apropiada. (Wulff, Kogan, & Saavedra, 2010)

En la [Figura 1](#), se puede observar un proceso de gestión de infraestructura, se divide en tres etapas: en primer lugar, se establecen metas y políticas a nivel estratégico y se asigna un presupuesto. En segundo lugar, se recolecta y evalúa la información obtenida en el inventario, incluyendo datos sobre la construcción y el mantenimiento de la infraestructura. En esta etapa se asigna el presupuesto para satisfacer las necesidades tanto de los usuarios como de la administración responsable de la gestión. Finalmente, se analizan los resultados implementados y se monitorean para proporcionar retroalimentación en el proceso de gestión. (Ferrer, 2013)

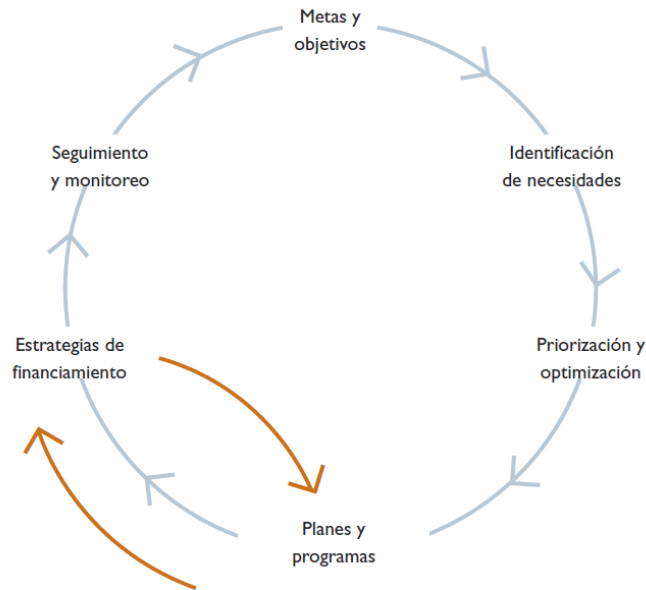


Figura 1. *Circulo vicioso de gestión*
(Wulff, Kogan, & Saavedra, 2010)

2.3. SOSTENIBILIDAD

La sostenibilidad en un sistema de infraestructura vial se refiere a la capacidad de mantener y mejorar la calidad de la infraestructura vial a largo plazo, minimizando al mismo tiempo su impacto negativo sobre el medio ambiente y promoviendo el bienestar social y económico de la comunidad. Para lograr la sostenibilidad del sistema de infraestructuras viales hay que tener en cuenta varios aspectos, como la eficiencia en el uso de los recursos naturales, la minimización de la huella de carbono, la seguridad vial, el acceso equitativo a las infraestructuras, la promoción del transporte sostenible y la integración con otras infraestructuras y servicios. (Ruiz Robles, 2017)

2.4. PAVIMENTOS Y SU CLASIFICACIÓN

Los pavimentos son estructuras de capas superpuestas de materiales procesados por encima del terreno natural y debidamente compactados de forma horizontal con la finalidad de distribuir las cargas aplicadas por un vehículo a la subrasante. Esta estructura

estratificada debe ser capaz de resistir adecuadamente las cargas de tráfico e intemperie para la cual la vía fue diseñada. (Montejo Fonseca, 2002)

Según (Montejo Fonseca, 2002), los factores de un pavimento para un adecuado funcionamiento son los siguientes:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo. (ambientales, lluvia, cambios temperatura, nieve)
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación.
- Ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Presentar una regularidad superficial tanto transversal como longitudinal.
- Presentar condiciones adecuadas de drenaje.
- Ser confortable en cuanto al ruido de rodadura, tanto en el interior de los vehículos como en el exterior. (entorno)
- Poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos ofreciendo una adecuada seguridad al tránsito.
- Ser duradero.
- Ser económico.

2.4.1. Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles se caracterizan por contener una capa superficial de cemento asfáltico sobre una capa base granular. Las constituyen principalmente: la capa de rodadura de asfalto, la base y subbase, las cuales están sobre una subrasante natural o mejorada según la relevancia de la vía y los respectivos estudios geotécnicos requeridos. En este tipo de pavimento la distribución de tensiones y deformaciones generada en la estructura por las cargas de rueda del tráfico, se da de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las tensiones verticales de compresión del suelo de fundación por medio de la absorción de esfuerzos cortantes. (Ver Figura 2) En este proceso ocurren tensiones de deformación y tracción en la fibra inferior del revestimiento asfáltico,

que provocará su fisuración por fatiga debido a la repetición de las cargas de tráfico. Se debe tener en cuenta que este pavimento tiene un bajo costo inicial en relación al pavimento rígido pero una desventaja es el costo de mantenimiento relativamente mayor para un menor tiempo lo que influye directamente en el aspecto económico general (Montejo Fonseca, 2002). Además, que el periodo de diseño estructural va de 15 a 20 años. De acuerdo con la Normativa Ecuatoriana de la Vialidad (NEVI-12, 2013), siendo uno de los pavimentos más económicos y usados en nuestra localidad.

2.4.2. Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son aquellos que contienen en su capa de rodadura una losa de concreto hidráulico, esta a su vez se asienta sobre una capa de base o subbase granular. Este tipo de pavimento, debido a su capa de rodadura que es de concreto hidráulico, tiende a distribuir y disipar de mejor manera los esfuerzos que son producidos por las repeticiones de cargas que genera el tránsito al circular sobre el mismo (Avila Redrovan & Albarracín Llivisaca, 2014). (Ver Figura 2) Uno de los aspectos importantes que se tiene al construir una vía implementando pavimento rígido es que al principio el costo de construcción es considerablemente superior con respecto a construir con pavimento flexible, pero el mantenimiento es mínimo; lo que reduce el costo proyectado en unos años, siendo más económico y factible construir mediante pavimentos rígidos (Montejo Fonseca, 2002). Según la NEVI-12 la resistencia a la compresión de la superficie de rodadura oscila entre 280 kg/cm^2 y 450 kg/cm^2 , pudiendo tener o no refuerzo de acero. Este tipo de pavimentos tienen mayores ventajas respecto al flexible ya que tiene un tiempo de vida útil mayor, el cual de acuerdo con la (NEVI-12, 2013) está comprendido entre 20 y 40 años, además de tener la ventaja de requerir mantenimiento rutinario mínimo. Sin embargo, en términos económicos engloba mayores costos de construcción.

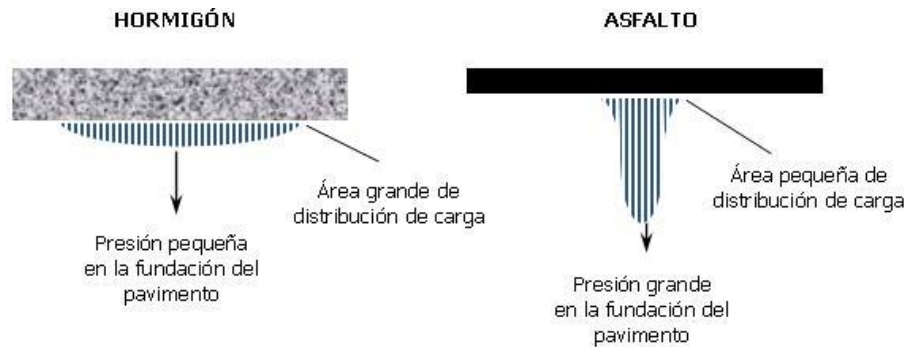


Figura 2. Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos
(Hugo, 2010)

2.4.3. Pavimentos Articulados

Este tipo de pavimento se construye utilizando piezas de concreto prefabricadas (cemento, piedra, adoquín, etc.) interconectadas entre sí como capa de rodadura. Esta estructura va asentada sobre una capa de arena bien graduada que a su vez se asienta sobre una base y/o subbase granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de esta y de la magnitud y frecuencia de las cargas que circularán por dicho pavimento. (Montejo Fonseca, 2002). Los elementos están diseñados para encajar de tal manera que distribuyan uniformemente el peso de vehículos y tránsito peatonal, lo que reduce la tensión sobre cada bloque individual disminuyendo la posibilidad de grietas y hundimientos. Además, el pavimento articulado permite una fácil reparación y mantenimiento, ya que los bloques individuales pueden retirarse y reemplazarse si se dañan o desgastan, en lugar de tener que repavimentar esta área. Este tipo de pavimento está siendo cada vez más utilizado en las vías principales de las ciudades importantes para tránsito ligero o moderado, y en las demás zonas urbanas y rurales, lo que hace evidente la necesidad de investigar la evaluación de este tipo de pavimentos (Higuera Sandoval & Pacheco Merchan, 2010).

2.5. FALLAS

Las fallas son problemas o daños en las estructuras de las carreteras que pueden afectar la seguridad y la eficiencia del transporte. Algunas posibles causas de fallas en las carreteras son:

- **Desgaste:** El uso prolongado y la exposición a los elementos naturales, como el sol, el viento y la lluvia, pueden causar desgaste en la superficie de la carretera y en otras estructuras.
- **Mala construcción:** Si la carretera se construye de manera inadecuada o utilizando materiales de baja calidad, puede ser más propensa a fallas.
- **Cambios en el terreno:** Los movimientos en el terreno debido a actividades como la minería o la construcción de edificios pueden afectar la estabilidad de la carretera.
- **Condiciones climáticas extremas:** El agua, el hielo y la nieve pueden causar daños en las carreteras, especialmente durante las estaciones más frías.
- **Accidentes:** Los accidentes de tráfico y otros eventos imprevistos pueden dañar la carretera y las estructuras viales.

Es importante que se detecten y se reparen las fallas en las carreteras de manera oportuna para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte y evitar problemas más graves en el futuro. Los ingenieros civiles y otros profesionales de la ingeniería juegan un papel clave en la identificación y reparación de fallas en las carreteras.

Además, las fallas en las carreteras pueden tener graves consecuencias para la seguridad y la eficiencia del transporte. Algunas posibles consecuencias son:

- **Accidentes de tráfico:** Las fallas en las carreteras pueden aumentar el riesgo de accidentes de tráfico debido a obstáculos inesperados o a la dificultad para maniobrar en la carretera dañada.
- **Retrasos en el tráfico:** Las fallas en las carreteras pueden causar retrasos en el tráfico debido a la necesidad de desviar el tráfico o de reducir la velocidad para evitar obstáculos o áreas dañadas.
- **Costos adicionales:** Reparar las fallas en las carreteras puede ser costoso y puede requerir la intervención de ingenieros y trabajadores especializados. Además, las fallas en las carreteras pueden requerir el cierre temporal de la carretera, lo que puede aumentar los costos de transporte y reducir la eficiencia.
- **Impacto económico:** Las fallas en las carreteras pueden tener un impacto negativo en la economía local.

Hay varios tipos de fallas que pueden afectar a las carreteras y otras estructuras viales. A continuación, se presenta la Tabla 1 con una clasificación generalizada de las fallas para pavimentos flexibles y mixtos. (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2004)

*Tabla 1. Fallas para pavimentos flexibles y mixtos.
(Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2004)*

PAVIMENTOS FLEXIBLES Y MIXTOS			
Deformaciones Permanentes	Fisuraciones y agrietamientos	Desintegraciones	Otros modos de falla
Hundimientos	Piel de cocodrilo	Baches	Exudación de asfalto
Corrugación	Agrietamiento por bloque	Grieta de borde	Parches
Ahuellamientos	Grietas transversales	Pulimento de superficie	Exudación de agua/bombeo
Hinchamientos	Grieta de reflexión de junta	Peladuras	
Corrimientos	Grietas longitudinales	Estrías longitudinales	
		Desprendimiento de agregados	

De la misma forma, la Tabla 2 y Tabla 3 contienen las fallas para pavimento rígido (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2004) y adoquín respectivamente. (Higuera & Pacheco, 2010)

*Tabla 2. Fallas para pavimentos rígidos.
(Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2004)*

PAVIMENTOS RÍGIDOS

Defectos de superficie	Defectos estructurales		Defectos de juntas	Varios
Descascaramiento	Fisura longitudinal	Bombeo	Deficiencia de material sellante	Bacheo
Peladura	Fisura transversal	Escalonamiento	Desportillamiento	Deterioros paseos pavimentos
Pulimento de superficie	Fisura en esquina	Hundimiento	Fisuras por mal funcionamiento de juntas	Desnivel borde pavimento
Fisura plástica	Fisura múltiple	Levantamiento		Pérdida de coronamiento del paseo
	Rotura o bache	Estallido por compresión		Erosión
	Fisura errática	Daños de reactividad de agregados		Crecimiento vegetación
				Drenaje superficial pavimento/paseo

*Tabla 3. Fallas para adoquines.
(Higuera & Pacheco, 2010)*

ADOQUINES/ ARTICULADOS				
Deformaciones	Desprendimientos	Desplazamientos	Fracturamientos	Escalonamientos
Abultamiento	Desgaste superficial	Desplazamiento de borde	Fracturamientos	Escalonamiento entre adoquines
Ahuellamiento	Perdida de arena	Desplazamiento de junta	Fracturamiento de confinamiento Exterior	Escalonamiento y confinamiento
Depresiones		Juntas abiertas	Fracturamiento de confinamiento interior	Vegetación en la calzada

Para realizar el PCI en pavimentos asfálticos y rígidos, se utilizan las fallas dadas por la norma (ASTM D-6433, 2011), Roads and Parking Lots. Para pavimentos asfálticos se tienen las siguientes fallas: Piel de cocodrilo, Exudación, Agrietamiento en bloque, Abultamientos y hundimientos, Corrugación, Depresión, Grieta de borde, Grieta de reflexión de junta, Desnivel carril/berma, Grieta longitudinal y transversal, Parcheo, Pulimento de agregados, Huecos, Cruce de vía férrea, Ahuellamiento, Desplazamiento, Grieta parabólica, Hinchamiento, Desprendimiento de agregados.

Mientras que para pavimentos rígidos se tienen estas fallas: Blow up, Grieta de esquina, Losa dividida, Grieta de durabilidad, Escala, Sello de junta, Desnivel carril/berma, Grieta lineal, Parcheo grande, Parcheo pequeño, Pulimento de agregados, Popouts, Bombeo, Punzonamiento, Cruce de vía férrea, Desconchamiento, Retracción, Descascaramiento de esquina, Descascaramiento de junta

Por otro lado, las fallas consideradas para desarrollar el método Windshield para pavimentos asfálticos basándose en el departamento de Virginia y Carolina del Norte son: Grieta lineal, Piel de cocodrilo, Parcheo, Baches, Peladura, Desprendimiento de agregados, Exudación de asfalto, Ahuellamiento. Para pavimentos rígidos se tienen las siguientes fallas: Fisura lineal, Losa dividida, Descascaramiento, Sello de junta, Estallido por compresión, Parcheo, Fisura de esquina. Y por último para pavimentos adoquinados basándose en las fallas presentadas por (Higuera & Pacheco, 2010) se tienen: deformaciones (abultamiento, ahuellamiento, depresiones), desprendimientos (desgaste superficial, pérdida de arena), desplazamientos (de borde, de juntas), fracturamientos (de confinamientos externos e internos), otros deterioros (Escalamiento entre adoquines y escalamiento entre adoquines y confinamientos, juntas abiertas, vegetación en la calzada).

Para las fallas por el método Windshield se escogieron las más generales y significativas, es por eso que estas engloban a las varias fallas del PCI.

2.6. MANTENIMIENTOS

El mantenimiento de las vías es el conjunto de actividades que se llevan a cabo para mantener en buenas condiciones y mejorar la seguridad y la eficiencia de las carreteras y otras vías de transporte terrestre. El mantenimiento de las vías incluye tareas como el relleno de baches, la reparación de grietas y el repintado de líneas de tráfico. El mantenimiento de las vías es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte y para prolongar la vida útil de las carreteras y otras estructuras viales. (Yan Jiang, 2016)

Hay varios tipos de mantenimiento que se pueden realizar en las vías para mantenerlas en buenas condiciones y mejorar su seguridad y eficiencia. (Jugo, 2005) Algunos ejemplos de tipos de mantenimiento de vías son:

Preventivo: El mantenimiento preventivo se lleva a cabo de manera regular para evitar el deterioro de las vías y prolongar su vida útil. Es decir, se basa en la monitorización continua de la vía y el uso de técnicas de análisis para predecir cuándo es necesario realizar mantenimiento. El objetivo es llevar a cabo el mantenimiento en el momento adecuado, antes de que se produzcan daños graves.

Ejemplos de mantenimiento preventivo incluyen el repintado de líneas de tráfico, el reparado de grietas y el relleno de baches pequeños. (Espinosa, 2009)

Correctivo: Se realiza como respuesta a problemas o daños existentes en el pavimento. Incluye acciones como la reparación de baches, el reemplazo de losas dañadas, la corrección de deformaciones y la subsanación de problemas de drenaje. El objetivo es restaurar la funcionalidad y seguridad del pavimento afectado.

Recapeo: Es un tipo de mantenimiento que implica la aplicación de una nueva capa de asfalto o concreto sobre la superficie existente del pavimento. Se realiza cuando el pavimento ha sufrido un desgaste significativo, pero su estructura subyacente está en buenas condiciones. El recapeo mejora la superficie del pavimento, proporcionando mayor resistencia y comodidad al usuario. (Espinosa, 2009)

Rehabilitación: Este tipo de mantenimiento implica la restauración de un pavimento que ha sufrido daños extensos. Se llevan a cabo acciones como el fresado (retirada de la capa superior dañada), el reforzamiento de la base, la corrección de drenajes y la aplicación de una nueva capa de asfalto o concreto. La rehabilitación busca extender la vida útil del pavimento y mejorar su capacidad estructural. (Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 2016)

Reconstrucción: Según (Espinosa, 2009) , el tipo de mantenimiento más completo y costoso. Se realiza cuando el pavimento existente ha llegado al final de su vida útil y necesita ser completamente reemplazado. Incluye la demolición de la estructura existente, la reconstrucción de la base y la aplicación de una nueva capa de pavimento. La reconstrucción proporciona un pavimento nuevo y duradero, restableciendo completamente su funcionalidad y rendimiento.

2.7. METODOLOGIA WINDSHIELD

El método Windshield es un método de diagnóstico visual utilizado para evaluar la condición del pavimento de una carretera. Su nombre "Windshield" (parabrisas en inglés) proviene del hecho de que la evaluación se realiza desde el interior del vehículo. Los técnicos evaluadores observan el pavimento mientras conducen por la carretera a una velocidad moderada y uniforme de 25km/h \pm 10km/h (segmentos homogéneos) y anota cualquier

defecto que se encuentre o falla que interrumpa el rodamiento estable del vehículo, esto se contabiliza y registra para calificar el estado del pavimento. En esta evaluación del pavimento se incluye el tipo de falla, severidad y frecuencia, la cual proporciona una evaluación cuantitativa de la condición del pavimento.

La estrategia "Windshield" divide los deterioros del pavimento en dos categorías: LDR (Load-related Distress Rating), que se refiere a fallas causadas por el tráfico, como agrietamiento en dirección a los ejes, y NDR (Non Load-related Distress Rating), que considera principalmente factores como el clima, los materiales y la construcción deficiente. Cada categoría tiene un rango de valores del 0 al 100, donde un valor de 100 indica que el pavimento está en excelentes condiciones y un valor de 0 significa que no es seguro para circular. El Índice de Condición Crítico (CCI), que es el menor entre LDR y NDR, también se utiliza para evaluar el estado del pavimento. Estos índices fueron desarrollados en 1998 y validados por expertos del departamento de Transporte de Virginia (VDOT, 2006). A continuación, en la Ecuación 1, 2, 3 se muestra como calcularlos.

$$LDR = 100 - \text{deterioros relacionados con la carga} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$NDR = 100 - \text{deterioros no relacionadas con la carga} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$CCI = \text{Valor mínimo entre LDR y NDR.} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

LDR: Load-related Distress Rating, clasificación de peligro relacionada con la carga

NDR: Non Load-related Distress Rating, clasificación de peligro no relacionada con la carga

CCI: Critical Condition Index, Índice de Condición Crítico

La Tabla 4 muestra los valores de la condición del pavimento en términos generales de probabilidad según (VDOT, 2006).

*Tabla 4. Condiciones del pavimento
(VDOT, 2006)*

ESCALA ÍNDICE	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	PROBABILIDAD DE ACCIÓN CORRECTIVA
>90	Excelente	Muy Improbable
70-89	Bueno	Improbable
60-69	Regular	Posiblemente
50-59	Pobre	Probable
<49	Muy Pobre	Muy Probable

El Índice de Condición Crítica (CCI) es el que determina el estado final de tramo de vía analizada. Al englobar parámetros debido a las cargas y los factores externos que influyen en el valor. Estos serán netamente evaluados de forma funcional (ICF) por ser un método visual, es decir, contiene mediciones cualitativas en campo: comodidad, velocidad de circulación y frenado, seguridad y dificultades en la superficie. Una evaluación estructural requiere de un análisis más profundo y exhaustivo para determinar su condición y queda fuera del alcance del presente trabajo. Por lo tanto, el CCI es el Índice de Condición Funcional del Pavimento (ICF).

Para la encuesta de parabrisas se citan dos trabajos que proponen las fallas analizadas por el método Windshield: Virgin Department Of Transport (VDOT, 2006) y el North Carolina Department Of Transport (NCDOT, 2011). Ambos Departamentos proponen las fallas que pueden estar presentes dentro del diagnóstico, lo cual por facilidad y claridad tienen un menor número de deterioros que el PCI, pero engloban la mayoría de estos que afectan directamente a la funcionalidad del pavimento.

Severidades

Para calificar el nivel de severidad, el conductor debe mantener una velocidad estable y según sean las dificultades se clasifica en los siguientes criterios:

- **Baja:** Existencia de vibraciones del vehículo como ondulaciones, asentamientos o abultamientos bajos donde no sea necesario reducir la velocidad y el rebote del vehículo sea ligero causando pocas molestias.
- **Media:** Las oscilaciones del vehículo son significativas y es necesario reducir la velocidad levemente. Estas vibraciones causan inseguridad e incomodidad siendo baches, asentamientos u otros que generen un rebote significativo en el vehículo.
- **Alta:** Las vibraciones del vehículo son excesivas que es necesario reducir la velocidad por razones de seguridad y comodidad. Las fallas individuales hacen que el automóvil tenga un rebote excesivo creando gran incomodidad al usuario.

La información mostrada se muestra con mayor detalle y ciertas observaciones dentro de la normativa (ASTM D-6433, 2011).

Frecuencias

Las frecuencias de las fallas se refieren a la cantidad relativa de deterioro o daño que se observa en la superficie de la carretera durante un período de tiempo determinado. Estas categorías son utilizadas para evaluar la condición y la necesidad de mantenimiento de los pavimentos. A continuación, se describe brevemente cada una de estas categorías:

- **Frecuente:** Indica que se producen fallas o daños en la superficie del pavimento con una frecuencia elevada. Esto puede manifestarse en forma de grietas extensas, baches, deformaciones significativas o deterioro generalizado. Una alta frecuencia de fallas requiere una atención inmediata y acciones correctivas para evitar una mayor degradación del pavimento y garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios.
- **Ocasional:** En esta categoría, las fallas en el pavimento ocurren con una cierta regularidad, pero no son tan frecuentes como en la categoría de frecuencia alta. Pueden existir grietas menores, baches aislados o señales tempranas de deterioro. En este caso, se requiere un mantenimiento preventivo adecuado para prevenir que estas fallas se vuelvan más graves y se extiendan a lo largo del tiempo.
- **Raro:** Indica que se observan pocas fallas o daños en la superficie del pavimento durante un período de tiempo determinado. Esto puede significar que el pavimento se encuentra en buenas condiciones generales, con grietas mínimas, baches menores o deterioro superficial limitado. Sin embargo, incluso en esta categoría, es

importante realizar un mantenimiento preventivo regular para preservar la calidad y prolongar la vida útil del pavimento.

2.8. METODOLOGÍA PCI

El Índice de Estado del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) es una herramienta utilizada para evaluar la condición de los pavimentos de carreteras y otras vías de transporte terrestre. Se utiliza para identificar las áreas de la carretera que requieren reparación o mantenimiento y para planificar el mantenimiento y la reparación de las vías de manera eficiente. El PCI se basa en una escala del 0 al 100, donde 100 representa un pavimento en perfectas condiciones y 0 representa un pavimento en condiciones muy deterioradas. Los valores intermedios se utilizan para describir la condición del pavimento en diferentes grados de deterioro. Por ejemplo, un PCI de 50 indica que el pavimento está en condiciones moderadamente deterioradas y puede requerir reparaciones en el futuro cercano.

Para calcular el PCI, se evalúan diferentes aspectos del pavimento, como la profundidad de los surcos, la presencia de grietas y baches, el estado de la señalización y la presencia de otros problemas como daños causados por el hielo o la lluvia. Los ingenieros civiles y otros profesionales de la ingeniería utilizan técnicas de evaluación visual y equipos de medición para determinar el PCI de una carretera o vía de transporte. El PCI es una herramienta esencial para la planificación del mantenimiento de las vías. Se debe utilizar el PCI para determinar la necesidad de reparaciones y para priorizar proyectos de mantenimiento y mejora. Si el PCI es bajo, puede ser necesario realizar reparaciones o mejoras más extensas. Si el PCI es alto, puede ser suficiente con realizar mantenimiento preventivo regular. (Macías, 2016)

2.9. MATRICES DE MARKOV

Las matrices de probabilidad de Markov son una herramienta importante en la teoría de la probabilidad y procesos estocásticos, que se utilizan para modelar la evolución de un sistema a lo largo del tiempo. Estas matrices describen la probabilidad de que un sistema esté en un estado particular en un momento dado, dadas las probabilidades de estar en cada estado en el momento anterior. La propiedad de Markov establece que la probabilidad

de estar en un estado determinado depende solo del estado actual y no del pasado del sistema. En una matriz de probabilidad de Markov, cada fila representa el estado actual del sistema y cada columna representa el siguiente estado posible, con los elementos de la matriz siendo las probabilidades condicionales de transición del sistema de un estado a otro en un período de tiempo.

“El caso más simple de un proceso estocástico, ocurre cuando el resultado en cada etapa solo depende del resultado de la etapa anterior y no de cualquier de los resultados previos. Tal proceso se denomina proceso de Markov o cadena de Markov, estas cadenas tienen memoria, recuerdan el último evento y eso condiciona las posibilidades de los eventos futuros” (Kohan, 2014)

De esta forma las cadenas de Markov son usadas para predecir el deterioro progresivo del pavimento en relación a la información de diagnósticos anteriores tomados.

2.10. COSTOS UNITARIOS

Los costos del mantenimiento de un tramo vial involucran una variedad de actividades que dependen del tipo de pavimento, su nivel de deterioro, su importancia, uso y opinión del usuario. Estas actividades se llevan a cabo con el fin de garantizar una respuesta efectiva y eficiente. En este sentido, el trabajo propone estimaciones aproximadas de los costos de mantenimiento y las actividades asociadas necesarias para su correcta ejecución.

2.11. ANALISIS DE CICLO DE VIDA

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una técnica utilizada en ingeniería civil y otras disciplinas para evaluar el impacto ambiental y el costo total de un proyecto a lo largo de su vida útil. El ACV permite identificar y cuantificar los impactos ambientales y los costos asociados con todas las etapas de un proyecto, desde la extracción de los materiales hasta la disposición final de los residuos. El ACV se basa en la idea de que los impactos y los costos de un proyecto no se limitan a su construcción y uso inmediatos, sino que se extienden a lo largo de su ciclo de vida completo. Por lo tanto, el ACV permite comparar diferentes opciones de proyecto y tomar decisiones informadas sobre cuál es la opción más sostenible y económicamente viable a largo plazo. (Asphalt Pavement Alliance, 2011)

El ACV se lleva a cabo en varias etapas:

Identificación de las etapas del ciclo de vida del proyecto: Se identifican todas las etapas del ciclo de vida del proyecto, desde la extracción de materiales hasta la disposición final de residuos.

Recopilación de datos: Se recopilan datos sobre los impactos ambientales y los costos asociados con cada etapa del ciclo de vida del proyecto.

Análisis de los datos: Se analizan los datos recopilados para determinar el impacto ambiental y el costo total del proyecto a lo largo de su ciclo de vida.

Toma de decisiones: Se utilizan los resultados del análisis para tomar decisiones informadas sobre cuál es la opción de proyecto más sostenible y económica. Es importante tener en cuenta que el análisis de ciclo de vida de una vía es un proceso continuo y debe actualizarse a medida que se desarrolla el proyecto y se utiliza la vía. (Amado & Gil, 2017).

2.12. ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD

Un análisis de costos se utiliza para evaluar los costes totales de un proyecto de pavimentación a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la construcción hasta el mantenimiento y la rehabilitación.

El análisis de costos considera factores como el coste de los materiales, la mano de obra, el transporte, el mantenimiento, la sustitución y la eliminación del pavimento. Al comparar diferentes opciones de pavimentación, este análisis puede ayudar a identificar la solución más rentable a largo plazo. Evidencia empírica ha demostrado que un mantenimiento oportuno es el mejor método para retrasar la tasa de deterioro de un pavimento y, por lo tanto, extender su vida útil, resultando en ahorros importantes de presupuesto que podrían ser destinados para mejorar la infraestructura vial. Sin embargo, es necesaria la implementación de una metodología estadística (o estocástica) que considere la incertidumbre para cuantificar los beneficios de la aplicación de trabajos de rehabilitación, mantenimiento preventivo, y mantenimiento rutinario. (Zúñiga García & Prozzi, 2018)

Según la **FHWA** (Federal Highway Administration, 2022) los pasos de la metodología de un análisis de costos son:

1. Establecer estrategias alternativas de diseño.
2. Determinar el tiempo de la actividad.
3. Estimar los costos de la agencia.
4. Estimar los costos del usuario.
5. Determinar el costo del ciclo de vida.

Este enfoque de análisis ayuda a los ingenieros y planificadores a tomar decisiones informadas a la hora de seleccionar el tipo y diseño de pavimento adecuados para un proyecto concreto, teniendo en cuenta no sólo los costes de construcción, sino también los costes a largo plazo asociados al mantenimiento y reparación del pavimento. El análisis de costos puede aplicarse a una amplia variedad de niveles de decisión relacionados con la inversión para evaluar el valor económico de varios diseños, proyectos, alternativas o estrategias de sistemas para obtener el mejor rendimiento de los fondos. (Huang, 2004)

2.12.1. INVEST

INVEST de FHWA (Infrastructure Voluntary Evaluation Sustainability Tool) es un software utilizado para evaluar y mejorar la sostenibilidad ambiental en proyectos de transporte y planificación urbana. Este software está diseñado para ayudar a los planificadores y profesionales a considerar y medir los impactos ambientales y sociales de sus decisiones.

INVEST proporciona una serie de herramientas y métricas para evaluar diferentes aspectos de la sostenibilidad, como el uso eficiente del suelo, la calidad del aire y el agua, la conservación de la energía, el transporte multimodal y la resiliencia al cambio climático. Permite a los usuarios realizar evaluaciones de proyectos y planificación, identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias para maximizar la sostenibilidad. Este se utiliza en diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto, desde la planificación y el diseño hasta la construcción y la operación. Proporciona una forma estructurada de medir y comunicar el rendimiento sostenible, lo que ayuda a los profesionales a tomar decisiones informadas y a fomentar la integración de la sostenibilidad en el proceso de toma de decisiones. (U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021)

2.12.2. PaLATE

PaLATE es un software diseñado para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y mantenimiento de pavimentos. Proporciona herramientas para evaluar la condición de los pavimentos, estimar su vida útil y recomendar estrategias de mantenimiento. Este utiliza datos de inspecciones visuales y mediciones para calcular el índice de condición de los pavimentos y generar informes detallados. Además, permite simular diferentes escenarios de mantenimiento y evaluar su impacto en el desempeño del pavimento a lo largo del tiempo. (Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)

CAPÍTULO 3 - MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El GAD municipal del cantón de Santa Isabel se encuentra en la cuenca alta y media del río Jubones, al sur de la provincia del Azuay, y al suroeste de Cantón Cuenca capital de la provincia del Azuay, Ecuador. (Ver Figura 3) Se localiza en los puntos más extremos 79°34'53" W 2°54'19" S al Norte, 79°16'57" W 3°22'14" S al Sur, 79°13'15" W 3°17'13" S al Este y 79°37'30" W 2°59'30" S al Oeste. La zona urbana de Santa Isabel comprende la cabecera cantonal de la misma, la cual, consta con una densidad poblacional de 2666 hab/km². El área de la cabecera cantonal tiene aproximadamente 1.87 km² y su crecimiento urbanístico es moderado.

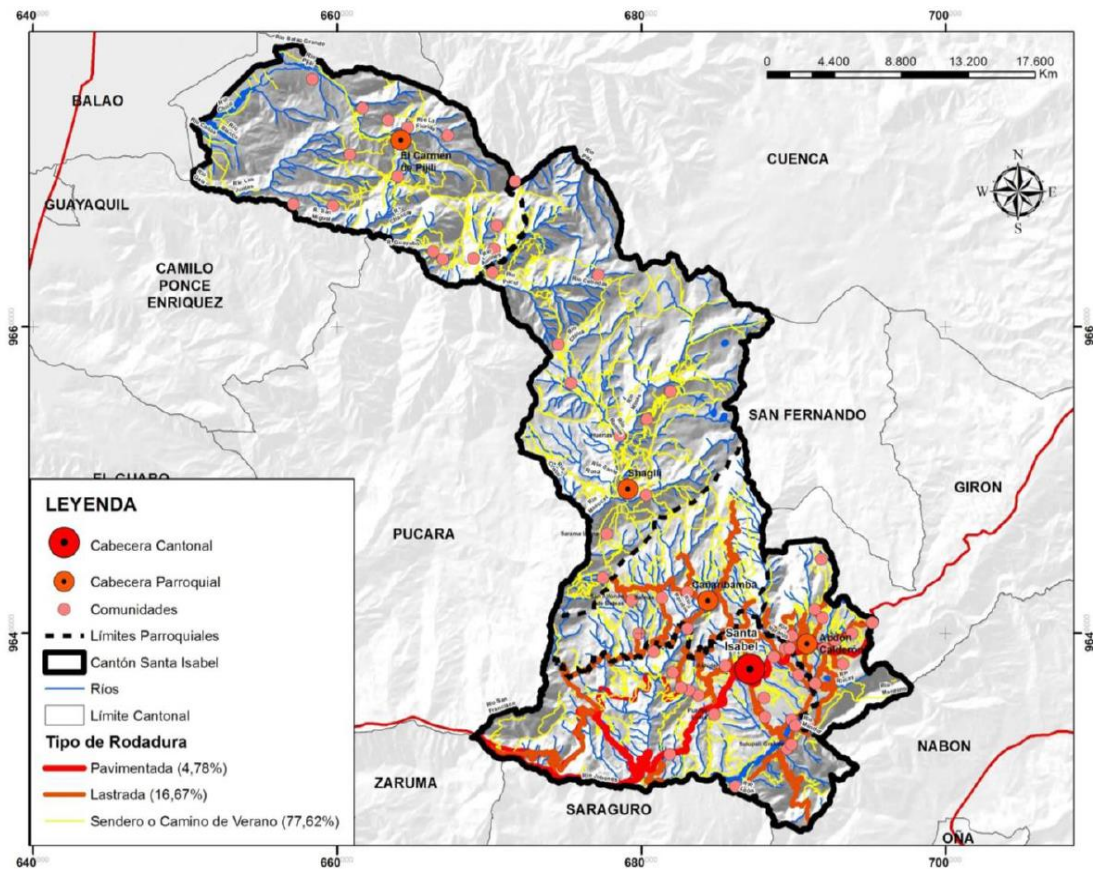


Figura 3. Mapa de Vialidad de Santa Isabel
(PDOT de Santa Isabel, 2020)

En este cantón la cabecera cantonal de Santa Isabel comprende una gran actividad comercial y minera caracterizando un factor directo en el tránsito y tráfico que utiliza comúnmente las vías del cantón. La zona urbana de la parroquia Santa Isabel está compuesta de varias vías de pavimento flexible, rígido, adoquinado y vías no pavimentadas como se puede observar a continuación en la Tabla 5:

*Tabla 5. Longitud de red vial de la parroquia Santa Isabel
PDOT (2021)*

PAVIMENTOS	LONGITUD (KM)	PORCENTA JE (%)
Adoquín	1.86	2.20%
Asfalto	14.23	16.80%
Doble Tratamiento Bituminoso	3.64	4.30%
Lastre	64.13	75.70%
Rígido	0.85	1.00%
TOTAL	84.72	100%

El desarrollo del trabajo se basa en la zona urbana de la parroquia de Santa Isabel, cabecera cantonal de Santa Isabel, y en su lado Oeste se tomarán en cuenta todos los pavimentos existentes.

3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

La urbe del Cantón Santa Isabel comprende de 3 tipos de pavimentos distribuidos en diferentes partes, por lo tanto, fue necesario tener un inventario donde se analice y tome los datos o fallas según el tipo de pavimento. El GAD Municipal brindó información necesaria y primordial sobre la vialidad y parámetros, pero la base de datos que se contaba no tenía un registro actualizado del mismo. De esta manera se procedió a realizar la debida actualización de sus calles, tipos de pavimento, longitudes y anchos esencialmente.

3.3. INVENTARIO VIAL

La Red vial comprende diferentes carreteras entre pavimentos flexibles, rígidos, adoquinados y lastre. En el centro urbano hay una tendencia a un modelo de cuadrícula, el cual varía en varias zonas por el relieve y la superficie de su terreno. Para el trabajo se propone una red vial de la siguiente forma:

- Vías Norte a Sur, sus nodos serán nombrados por números de Oeste a Este.
- Vías de Oeste a Este, sus nodos serán nombrados por letras en orden alfabético desde Norte hacia el sur.
- Vías o Avenidas Circundantes al centro urbano, sus nodos serán nombrados con números aumentados en decenas y según su posición adoptarán las letras a su enlace correspondiente con las vías urbanas.
- Calles intermedias entre nodos principales adoptaron su nomenclatura aumentado un dígito más que especifique su orientación; es decir tendrá un número si está después de en un tramo de Norte a Sur, o tendrá un guión bajo con número adicional si el tramo va de Oeste a Este.

Se realiza el procesamiento de los datos a través del software "ArcGIS", donde se puede tener la información y base de datos georreferenciada y así nombrar los nodos para su respectivo mapa de la red vial.

La Figura 4 muestra el mapa de la red vial de Santa Isabel con los diferentes tipos de pavimentos y los nodos nombrados en cada una de las intersecciones según las indicaciones anteriores. Tabulados estos datos se nombra cada uno de los segmentos según la unión de dos nodos y que dentro de una vía pueden ser varios los tramos a examinar.



Figura 4. Mapa con nodos y diferentes pavimentos de Santa Isabel (PDOT de Santa Isabel, 2020)

3.4. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE LA CONDICIÓN DE VÍAS PAVIMENTADAS

3.4.1. Metodología Windshield

Para aplicar el método Windshield a los diferentes tipos de pavimentos se debe puntualizar en la Normativa (ASTM D-6433, 2011), la cual indica los valores deducibles con los que se calculan los respectivos coeficientes para cada tipo de falla y de esta manera ponderarlos para obtener el Índice de Condición Funcional del Pavimento (ICF).

La metodología Windshield toma en cuenta las fallas más significativas que afectan directamente a la funcionalidad y libre rodamiento del vehículo en la vía a una velocidad estable. Por lo tanto, El departamento de Virginia (VDOT, 2006) y departamento Carolina del Norte (NCDOT, 2011) , implementaron ciertas fallas que deben ser tomadas en cuenta para la encuesta parabrisas. El PCI considera 39 fallas en total, sin embargo, para el método Windshield el análisis de fallas se disminuye; ya que es un diagnóstico más práctico y rápido.

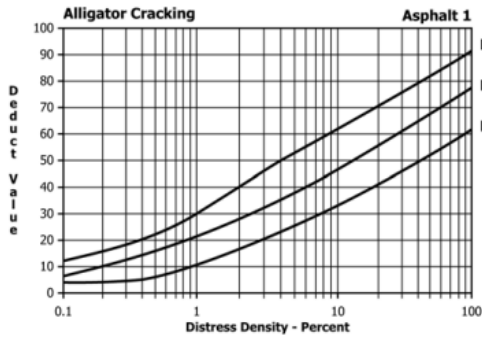
Por lo tanto, el manual (ASTM D-6433, 2011), explica detalladamente el llenado de datos e indica como cada falla influye en los diferentes tipos de pavimentos y si estos son producidos por la carga o por factores diferentes como: clima, mala construcción y entre otros factores que también afectan la vida útil del pavimento. Cada falla consta de diferentes valores deducibles (Tabla 6) según el nivel de severidad, con su respectiva densidad; de ahí se utilizan estos valores para obtener los coeficientes de severidad que serán empleados para el cálculo correspondiente según Windshield. Los parámetros son los siguientes:

VD: Valor Deducible obtenido de los gráficos de la Norma (ASTM D-6433, 2011).

Densidad (DD): porcentaje de área afectada de los gráficos de la Norma (ASTM D-6433, 2011).

Por ejemplo, en el caso de una falla de cocodrilo en un pavimento flexible se tiene lo mostrado en la Figura 5:

Tabla 6. Valores deducibles según severidad para piel de cocodrilo



Falla	Severidad	VD	Densidad
Falla piel cocodrilo	H	91	100
	M	77	100
	L	62	100

Figura 5. Gráfico de piel de cocodrilo obtenido de la Norma ASTM D6433-11

De la forma antes mencionada se procede a tabular los datos para cada tipo de falla y según el tipo de pavimento se obtienen los parámetros correspondientes:

Obtención del Factor de clase (FC):

Después de haber obtenido los valores deducibles con sus respectivas densidades para cada deterioro. Se recoge el valor máximo deducible de cada falla y se obtiene la suma total de esos valores deducibles máximos. El total mencionado anteriormente equivale al 100%, por lo que mediante una regla de tres se procede a obtener el porcentaje correspondiente a cada valor deducible máximo de cada falla. El resultado final corresponde al factor de clase de cada falla. Este proceso se debe realizar para cada una de los deterioros con la Ecuación 4.

$$FC_i = \frac{VDmax_i * 100}{\sum_1^n VDmax} \tag{Ecuación 4}$$

Donde:

FC_i: Factor de clase de cada falla.

Obtención del incremento (P)

Para obtener el incremento de una falla primero se multiplica el Valor Deducible medio correspondiente a la severidad Media, por su densidad respectiva. La suma total de esos productos se divide para la sumatoria de la densidad total. El valor deducible medio ponderado de cada deterioro se dividirá entre el VD medio total ponderado, el cual, debe resultar en un valor superior a 1. En un supuesto de que el valor se menor a 1, se toma

como referencia el valor 1.1 como factor de seguridad; ya que cualquier falla puede tener una incidencia del 10% más de severidad respecto a su falla. (Ver Ecuación 5 y 6)

$$VDmed_{total} = \frac{\sum_1^n (VDmed_i * DDmed_i)}{\sum_1^n DDmed} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$P_i = \frac{VDmed_i}{VDmed_{total}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

VDmed_{total}: Valor deducido medio total.

P_i: Incremento de cada falla

Valor Índice de Influencia de Factor de Clase (IF)

Para obtener el grado de influencia del deterioro se debe multiplicar el valor P por el valor FC el cual nos da el factor de influencia para cada tipo de falla estudiada. (Ver Ecuación 7)

$$IF_i = FC_i * P_i \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

IF_i: Valor índice de influencia de factor de clase

Obtención del incremento de peso (IP)

El factor de peso de incremento depende de cada nivel de severidad por lo cual, según (Higuera & Pacheco, 2010), ésta se debe multiplicar según su severidad: si es baja, el porcentaje de área afectada es 36%, mientras que para la media es de 60% y para una severidad alta es de 90%. Por lo tanto, en el cálculo se toma el incremento que: donde se divide el valor deducible máximo entre el valor promedio de los 3 valores deducibles para cada falla, este valor se multiplica por el porcentaje de severidad afectada y se obtiene el valor IP para la severidad alta, media y baja. (Ver Ecuación 8 y 9)

$$Incr = \frac{VDmax_i}{VDmed_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$IP_{H,M,L} = Incr * Severidad \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Severidad: H = 0.9 \quad M = 0.6 \quad L = 0.36 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Incr: Incremento

IP_{H,M,L}: Incremento de peso según severidad

H: Severidad alta

M: Severidad media

L: Severidad baja

Por último, en cuanto a la frecuencia los valores propuestos son los siguientes: para una frecuencia de “ninguna” se tiene un valor de cero, para una frecuencia “rara o poco recurrente” se tiene un valor de 0.45 (45%); esta representa hasta %5 de área afectada, para una frecuencia “ocasional” se tiene un valor de 0.6 (60%); que representa un valor menor al 20% de incidencia del deterioro y para una frecuencia “recurrente o muy frecuente” se obtiene un valor de 0.76 (76%); donde el área afectada debe sobrepasar el 20% de área perjudicada. (Higuera Sandoval & Pacheco Merchan, 2010)

Los coeficientes obtenidos para los diferentes tipos de pavimentos pueden estar sujetos a errores de apreciación, a pesar de tener un sustento válido estos pueden diferir mínimamente. La práctica y experiencia serán importantes para corroborar si los parámetros obtenidos son válidos, o ajustarlos de manera que la sensibilidad de estos coeficientes sea el adecuado.

3.4.2. Metodología Windshield aplicada a pavimentos flexibles

En los pavimentos flexibles el departamento de Virginia (VDOT, 2006) y el departamento de Carolina del Norte (NCDOT, 2011) recomiendan las siguientes fallas a tomar en cuenta para la evaluación del pavimento flexible, se puede observar en la Figura 6:

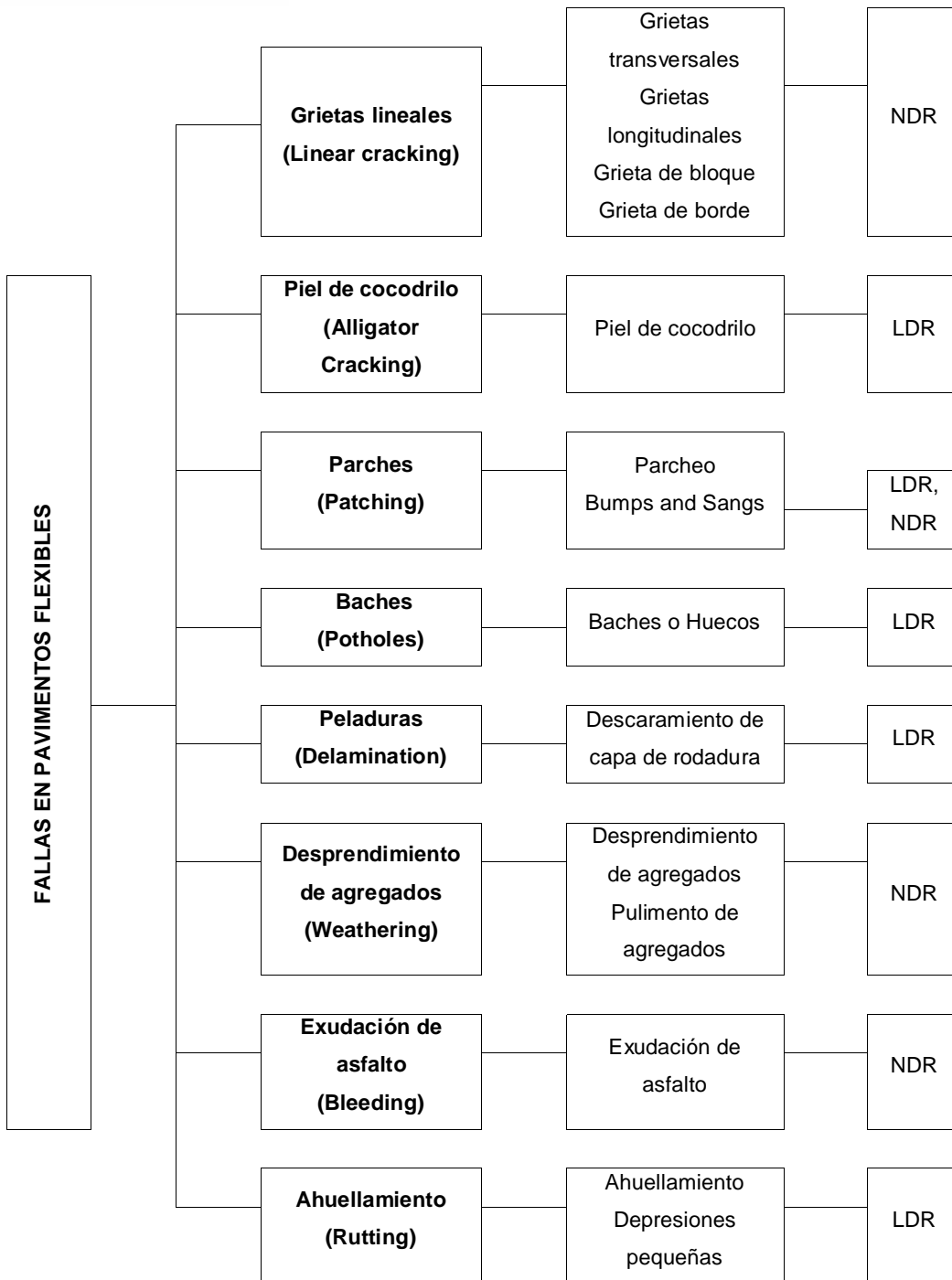


Figura 6. Fallas en pavimentos flexibles.

Adaptado de (NCDOT, 2011) y (VDOT, 2006)

Las fallas propuestas son las generalizadas para analizarse en la metodología Windshield, estas abarcan otras fallas más específicas, pero se debe tener en cuenta que la severidad e incomodidad que causan en la vía debe ser notable. EL PCI cuenta con un número superior de fallas por lo cual se deben recaudar las relevantes para tener datos congruentes entre si y que el método sea válido. (Ver en la sección 2.5 de Fallas del Cap. 2)

Las fallas analizadas dictan según su influencia dentro de los parámetros de funcionalidad; es decir se toman en cuenta las de LDR y NDR para corroborar datos y obtener el CCI. El valor obtenido de CCI dará como resultado el ICF.

A continuación, en la Tabla 7, se presenta el proceso para obtención de los coeficientes con el cual se calcula el valor de ICF:

Tabla 7. Coeficientes para el cálculo de ICF

FALLAS	SEVERIDAD	VD	DENSIDAD	FC	VD MED	P	IF	INCREMENTO	IP
Grietas lineales	H	85	100	13.4	52.3	1.1	14	1.6	1.5
	M	44	100						1.0
	L	28	100						0.6
Piel de cocodrilo	H	91	100	14.3	76.7	1.5	22	1.2	1.1
	M	77	100						0.7
	L	62	100						0.4
Parcheo	H	80	50	12.6	56.7	1.1	14	1.4	1.3
	M	57	50						0.8
	L	33	50						0.5
Baches	H	100	8	15.7	97.6	2.0	31	1.0	0.9
	M	100	16						0.6
	L	97	100						0.4
Peladuras	H	77	100	12.1	60.5	1.2	15	1.3	1.1
	L	44	100						0.8

									0.5
Desprendimiento de agregados	H	37	100	5.8	19.0	1.1	6	1.9	1.8
	M	15	100						1.2
	L	5	100						0.7
Exudación de asfalto	H	75	100	11.8	45.0	1.1	13	1.7	1.5
	M	40	100						1.0
	L	20	100						0.6
Ahuellamiento	H	90	100	14.2	69.0	1.4	20	1.3	1.2
	M	67	100						0.8
	L	50	100						0.5

Como se observa en base a las fallas seleccionadas se hallan los parámetros para la hoja de encuesta que se puede utilizar en el método Windshield. A continuación, en la Tabla 8 tenemos el cuadro final que puede utilizarse para el cálculo del ICF:

Tabla 8. Valores para el cálculo del ICF

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Grietas lineales	1 4	H	1.5	0.45	0.6	0.76	ND
		M	1.0				R
		L	0.6				
Piel de cocodrilo	2 2	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.7				
		L	0.4				
Parqueo	1 4	H	1.3	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.8				, ND R

		L	0.5				
Baches	3 1	H	0.9	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.6				
		L	0.4				
Peladuras	1 5	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.8				
		L	0.5				
Desprendimiento de agregados	6	H	1.8	0.45	0.6	0.76	ND R
		M	1.2				
		L	0.7				
Exudación de asfalto	1 3	H	1.5	0.45	0.6	0.76	ND R
		M	1.0				
		L	0.6				
Ahuellamiento	2 0	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.8				
		L	0.5				
							LDR
							NDR
							ICF

Cabe recalcar que el Índice de condición del pavimento está siendo influenciado por el Índice Funcional del Pavimento, el cual, es el menor valor existente entre el LDR y NDR. Por lo que se debe multiplicar como en la Ecuación 11 para cada falla:

$$FALLA_i = IF * IP * Frecuencia$$

Ecuación 11

Donde:

FALLA_i: Valor de cada falla

Después de obtener el peso de cada falla se resta de 100 para LDR los valores de las fallas que son influenciadas por las cargas y para NDR se restan los valores de las fallas que no dependen de las cargas. (Ver Ecuación 12 y 13)

$LDR = 100 - \text{Piel de cocodrilo} - \text{Parcheo} - \text{Baches} - \text{Peladuras} -$
Ahuellamiento. *Ecuación 12*

$NDR = 100 - \text{Grietas Lineales} - \text{Parcheo} - \text{Desprendimiento de agregados} - \text{Exudación de}$
asfalto. *Ecuación 13*

Donde:

***LDR:** Load-related Distress Rating, clasificación de peligro relacionada con la carga*

***NDR:** Non Load-related Distress Rating, clasificación de peligro no relacionada con la carga*

Por último, el valor más bajo entre LDR y NDR será el que represente el Índice Funcional de Pavimento.

Según sea la puntuación del ICF se clasifica el pavimento en el estado que se encuentra (Excelente, Buena, Regular, Pobre, Fallado).

3.4.3. Metodología Windshield aplicada a pavimentos rígidos

El proceso se cumple de la misma forma que en el anterior tipo de pavimento. En la Figura 7, se puede observar que, las fallas de este pavimento son diferentes y se han clasificado de la siguiente manera:

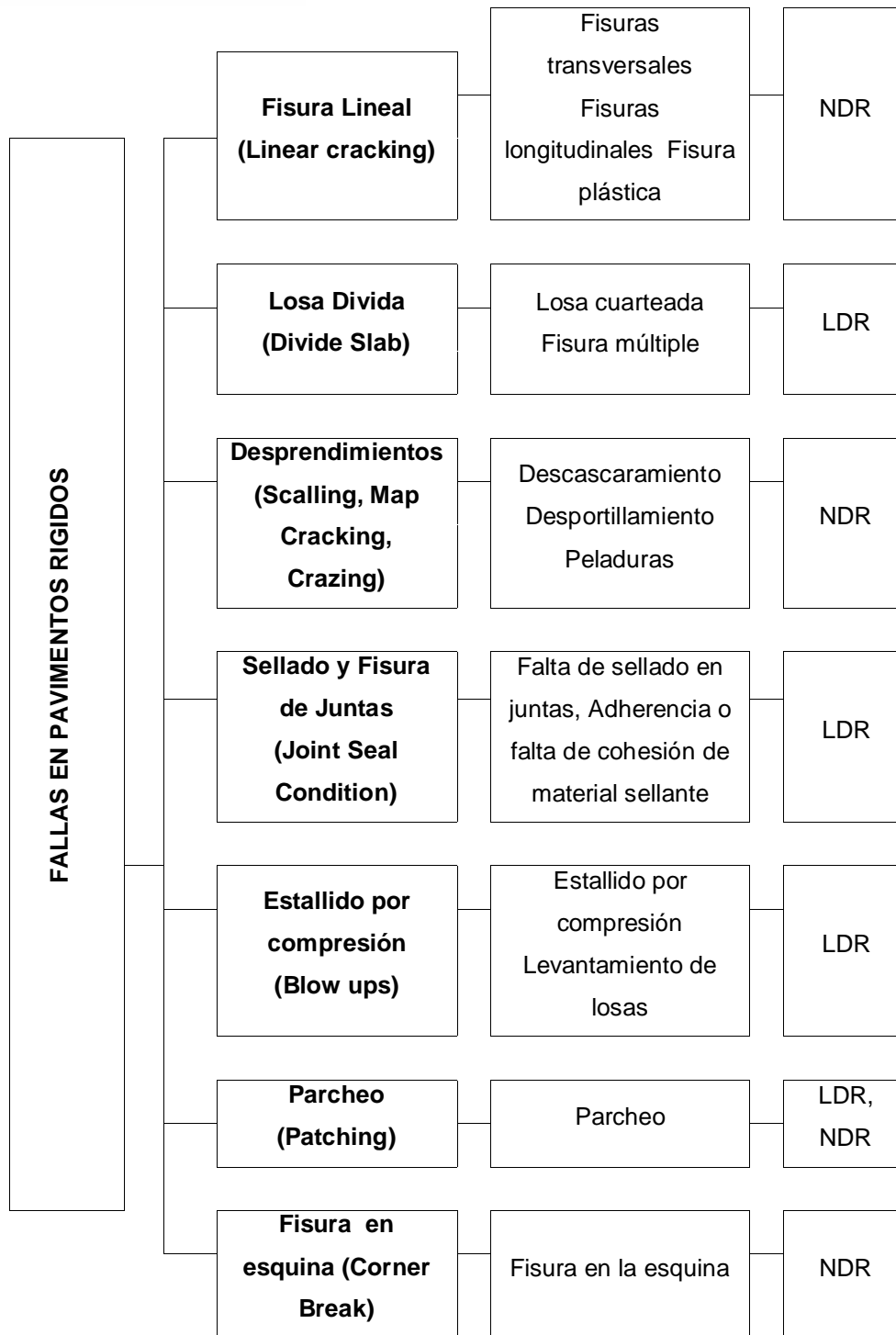


Figura 7. Fallas en pavimentos rígidos.
Adaptado de (NCDOT, 2011) y (VDOT, 2006)

Así mismo, se han delimitado las fallas según causen mayor incomodidad, las mismas propuestas por él (VDOT, 2006) y (NCDOT, 2011). En base al mismo proceso mencionado se encuentran los pesos que se utilizan para el método, estos parten de igual manera de los valores deducibles de las gráficas de la Norma (ASTM D-6433, 2011). A continuación, en la Tabla 9 se muestra el procedimiento realizado:

Tabla 9. Valores para el cálculo del ICF

FALLAS	SEVERIDAD	VD	DENSIDAD	FC	VD MED	P	IF	INCREMENTO	IP
Fisura lineal	H	65	100	14.6	42.0	1.1	1.7	1.5	1.4
	M	38	100						0.9
	L	23	100						0.6
Losa Dividida	H	92	100	20.6	72.3	1.5	3.1	1.3	1.1
	M	75	100						0.8
	L	50	100						0.5
Desprendimientos	H	30	100	6.7	22.3	1.1	7	1.3	1.2
	M	22	100						0.8
	L	15	100						0.5
Sellado y Fisura de Juntas	H	8	100	1.8	4.7	1.1	2	1.7	1.5
	M	4	100						1.0

	L	2	100						0.6
Estallido por compresión	H	100	60	22.4	72.3	1.5	3.4	1.3	1.2
	M	83	100						0.8
	L	45	100						0.5
Parqueo	H	73	100	16.4	49.7	1.0	1.7	1.5	1.3
	M	48	100						0.9
	L	28	100						0.5
Fisura en esquina	H	78	100	17.5	64.0	1.3	2.3	1.2	1.1
	M	64	100						0.7
	L	50	100						0.4

Como se observa en base a las fallas seleccionadas, se hallan los parámetros para la hoja de encuesta que se puede utilizar en el método Windshield.

Las fallas predominantes muestran los pesos que se utilizan para la hoja de encuesta en la metodología de parabrisas. Consiguientemente, en la Tabla 10 se muestra el cuadro final para el cálculo de ICF en el pavimento rígido:

Tabla 10. Valores para el cálculo del ICF

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Fisura lineal	17	H	1.4	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.9				
		L	0.6				
Losa Dividida	31	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.8				
		L	0.5				
Desprendimientos	7	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.8				
		L	0.5				
Sellado y Fisura de Juntas	2	H	1.5	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	1.0				
		L	0.6				
Estallido por compresión	34	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.8				
		L	0.5				
Parcheo	17	H	1.3	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.9				
		L	0.5				
Fisura en esquina	23	H	1.1	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.7				
		L	0.4				
							LDR
							NDR
							ICF

Realizando el procedimiento explicado con anterioridad, se encuentra el mínimo valor entre LDR y NDR y consiguientemente el valor de ICF. Para terminar, se clasifica el pavimento según el rango en el cual se encuentre el ICF, para su respectiva tabulación y su pertinente solución.

3.4.4. Metodología PCI para validación de método Windshield

Según la Norma (ASTM D-6433, 2011), para calcular el PCI se desarrolla una hoja de datos con información de: fecha, ubicación, componente, sección, tamaño de la unidad de muestra, número y tamaño de losa, tipos de falla, grado de severidad, cantidades, y nombre del encargado de la inspección.

Para la evaluación se necesita un número de unidades de muestra que puede variar desde todas las unidades de una sección hasta las unidades de muestra que representen el 95% de nivel de confianza, o hasta un número menor. Además, si las juntas entre losas del pavimento rígido tienen separaciones mayores a los 8m se debe subdividir las losas en losas imaginarias. En este caso, no se necesitaría subdividir las losas ya que la separación de las juntas de las losas evaluadas es de 3m en el sentido longitudinal y 4m en el sentido transversal.

Para calcular el número mínimo de unidades de muestra (n) con estimación adecuada (95 % de confianza) del PCI de la sección se usa la [Ecuación 14](#) y se redondea n al número entero superior.

$$n = \frac{Ns^2}{\left(\left(\frac{e^2}{4}\right) \cdot (N-1) + s^2\right)}$$

Ecuación 14

Dónde:

e = error aceptable en la estimación del PCI, $e = +/- 5$ puntos de PCI;

s = desviación estándar del PCI entre unidades de muestra. Para la inspección inicial, la desviación estándar se asume de 10 para pavimento flexible y 15 para pavimento rígido. Luego esa desviación debe ser verificada como se mostrará más adelante.

N = número total de unidades de muestra en la sección.

Para verificar que el número de unidades de muestra inspeccionadas es el adecuado, se debe calcular la desviación estándar actual de acuerdo a la [Ecuación 15](#):

$$s = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n (PCI_i - PCI_f)^2\right)}{n-1}}$$

*Ecuación 15***Donde:**

PCI_i = PCI de la unidad de muestra.

PCI_f = PCI promedio de las unidades de muestra.

n = número total de unidades de muestra.

Procedimiento de Inspección

Para pavimentos flexibles y rígidos se debe inspeccionar individualmente cada unidad de muestra elegida, registrar el tamaño y medir el grado de deterioro de cada una de las fallas presentes. Además, para los pavimentos rígidos se debe considerar el número de losas afectados y su tamaño.

Cálculo del Índice de Condición del Pavimento (PCI) para el Concreto Asfáltico (AC)

En primer lugar, se tiene el registro de la falla, su severidad y el área afectada, por lo que se debe sumar la cantidad total del área afectada perteneciente a cada falla con la misma severidad.

Luego se tiene que dividir el total de cada falla entre el área de la unidad de muestra evaluada, y multiplicar por 100 para obtener el porcentaje de la densidad de cada tipo de falla.

A continuación, se determina el valor de reducción (VR) para cada tipo de falla y grado de severidad observando las curvas de valor de reducción en función de la densidad, estas curvas se encuentran en el apéndice x3 de la norma (ASTM D-6433, 2011). Luego se determina el máximo valor de reducción corregido. Si solo uno o ninguno de los VR es mayor a 2, la suma de los VRs es utilizada en lugar del VRC para la determinación del PCI. De lo contrario, se determina el máximo VRC, tanto para pavimento asfáltico (AC) como para hormigón (PCC) se sigue el siguiente procedimiento.

Calcular el número máximo de fallas permitidas (m) con la [Ecuación 16](#):

$$m = 1 + \left(\frac{9}{95}\right) * (100 - VAR) \leq 10$$

Ecuación 16

Donde:

VAR= valor individual de reducción más alto.

En la primera fila de una tabla se colocan los VRs en forma descendente, reemplazando el menor VR por el producto del mismo y la fracción decimal del m calculado. Si el número de VRs es menor al valor de m, ingresar todos los VRs en la tabla. Si el número de VRs es mayor a m utilizar los m valores más altos solamente. El número de filas se determina por el número de VRs mayores a 2 denominándose q. Se debe reducir el menor valor individual VR mayor que 2 hasta que se cumpla la condición de q=1. Luego sumar todos los valores de VRs de cada fila y poner en una columna de totales. Para determinar el VRC se debe buscar la curva de corrección correcta, para pavimentos asfálticos, y obtenerlo en función a los valores de "Total" y "q". Finalmente se calcula el PCI restando el valor máximo de VRC de 100 con la *Ecuación 17*. (ASTM D-6433, 2011)

$$PCI = 100 - \text{máximo VRC}$$

Ecuación 17

Donde:

PCI: Pavement Condition Index

VRC: Valor de reducción

La diferencia para pavimentos rígidos es que se deben sumar las losas que están afectadas por las fallas con su respectiva severidad. Este valor se divide para el número total de losas de la unidad de muestra y luego se multiplica por 100 para obtener el porcentaje de la densidad de cada combinación de falla y grado de severidad. Después se continua con el proceso similar al de pavimentos flexibles explicado anteriormente.

En la Figura 8, se puede observar los estados de los pavimentos con su respectivo valor de PCI.

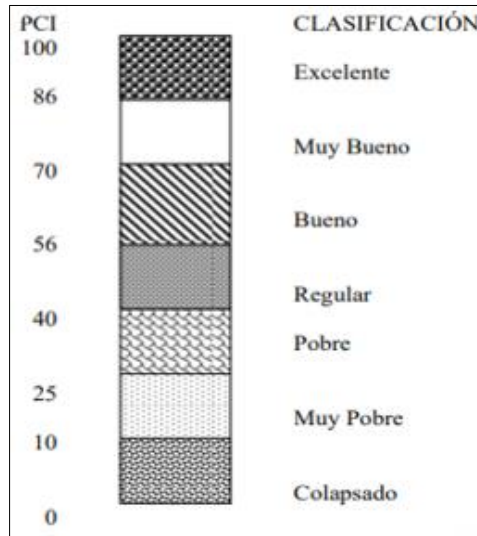


Figura 8. Estados de los pavimentos según el PCI (ASTM D-6433, 2011)

Las fallas propuestas por el (ASTM D-6433, 2011) para pavimentos flexibles y para pavimentos rígidos son los siguientes; cabe recalcar que no todas las fallas son tomadas en cuenta por el método Windshield debido a que es un método práctico teniendo en cuenta solo las vibraciones y calidad de viaje en la vía analizada, sin entrar en detalle en sus dimensiones sino su severidad en base a la experiencia y criterio del técnico a cargo.

- Observar los deterioros para pavimentos flexibles en la Tabla 11:

Tabla 11. Deterioros para pavimentos flexibles (ASTM D-6433, 2011)

1	Piel de cocodrilo	11	Parcheo
2	Exudación	12	Pulimento de agregados
3	Agrietamiento en bloque	13	Huecos
4	Abultamiento y Hundimiento	14	Cruce de vía férrea
5	Corrugación	15	Ahuellamiento
6	Depresión	16	Desplazamiento
7	Grieta de borde	17	Grieta parabólica

8	Grieta de reflexión de junta	18	Hinchamiento
9	Desnivel carril/berma	19	Desprendimiento de agregados
10	Grietas longitudinales y transversales		

- Observar los deterioros para pavimentos rígidos en la Tabla 12:

*Tabla 12. Deterioros para pavimentos rígidos
(ASTM D-6433, 2011)*

21	Blow up/Buckling	31	Pulimento de agregados
22	Grieta de esquina	32	Popouts
23	Losa dividida	33	Bombeo
24	Grieta de durabilidad	34	Punzonamiento
25	Escala	35	Cruce de vía férrea
26	Sello de junta	36	Desconchamiento
27	Desnivel carril/berma	37	Retracción
28	Grieta lineal	38	Descascaramiento de esquina
29	Parqueo (grande)	39	Descascaramiento de junta
30	Parqueo (pequeño)		

3.4.5. Metodología de comparación y validación del método Windshield y PCI

Para verificar la información obtenida y corroborar que los resultados del método Windshield son válidos se utiliza la metodología PCI. Se analiza una muestra representativa donde se sabe que tan confiables son estos resultados. El Índice de condición Funcional de Pavimento (ICF) obtenido de Windshield con el Índice de Condición del Pavimento (PCI) hallado bajo la normativa (ASTM D-6433, 2011) deben tener una variabilidad muy baja para validar el programa y así mismo dar la garantía necesaria del presente trabajo.

En total se tienen 45 tramos entre pavimentos flexibles, rígidos y adoquín; con una longitud de 9206 m. aproximadamente. Para calcular el número de unidades de muestra (n) con estimación adecuada (95 % de confianza) del PCI se usa la Ecuación 14 de la pg. 60 presentada anteriormente.

A continuación, en la Ecuación 18 se reemplazan los valores y se obtiene una muestra de 12 tramos:

$$n = \frac{45 \cdot 10^2}{\left(\left(\frac{5^2}{4}\right) \cdot (45-1) + 10^2\right)}$$

Ecuación 18

$$n = 12$$

Donde:

n: Número de unidades de muestra

Por lo que, al ser 3 grupos de pavimentos a analizarse, se empleara el método PCI para 4 tramos por pavimento flexibles y rígido, y 5 tramos para adoquinado; por tener longitudes menores entre nodos. Los 4 tramos de pavimentos flexibles suman un total de longitud de 445 m., los 4 tramos de pavimentos rígidos suman 370 m. y los 5 tramos de adoquinados suman 384 m.

Da como resultado un aproximado de 400 m. por cada tipo de pavimento para representar un resultado valido entre los dos métodos.

Para pavimentos flexibles:

En los pavimentos flexibles se ha tomado la calle Rafael Galarza la cual contiene los 4 tramos 1B-1C (143 m.), 1C-1D (86 m.), 1D-1E (109 m.), 1E-1F (107 m.), que contiene alrededor de 450 m. de longitud. Esta ruta se analizó con PCI a través de una hoja de cálculo (Ver Tabla 13) siguiendo las instrucciones del (ASTM D-6433, 2011), por lo cual se obtuvieron las siguientes fallas:

- Tramo 1B-1C

Tabla 13. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1B-1C

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	AREA/LONGITUD/UNIDAD			CANTIDADES PARCIALES	TOTAL
			Longitud (m)	Ancho (m)	Cantidad		
1	L	m ²	0.6	0.7		0.42	0.42
1	M	m ²	1	0.6		0.6	0.78
1	M	m ²	0.9	0.2		0.18	
4	L	m ²	0.6	0.4		0.24	0.7
4	L	m ²	0.13	1		0.13	
4	L	m ²	0.33	1		0.33	
7	L	m	1.1			1.1	3.3
7	L	m	1.1			1.1	
7	L	m	1.1			1.1	
7	M	m	1.1			1.1	3.3
7	M	m	1.10			1.1	
7	M	m	1.10			1.1	
11	L	m ²	2.10	1.20		2.52	100.14
11	L	m ²	3.10	0.70		2.17	
11	L	m ²	5.60	1.40		7.84	
11	L	m ²	1.90	11.42		21.698	
11	L	m ²	1.45	3.20		4.64	
11	L	m ²	1.60	3.20		5.12	
11	L	m ²	1.50	1.60		2.4	
11	L	m ²	1.60	11.60		18.56	
11	L	m ²	2.30	15.30		35.19	
11	M	m ²	0.80	5.10		4.08	4.08
13	H	unid			1.00	1.00	2.00
13	H	unid			1.00	1.00	
19	M	m ²	7.20	8.60		61.92	85.92
19	M	m ²	3.00	8.00		24.00	

Los números de la columna de “daño” representan a las fallas según la Tabla 11, a continuación, se tiene la severidad, unidad, longitud, ancho y cantidad de la falla. Para obtener la columna de “cantidades parciales” se multiplica el valor de la longitud por ancho de la falla y finalmente la columna de “total” se obtiene sumando las cantidades parciales de cada grupo de fallas.

Luego en la Tabla 14, se muestra la columna de “densidad porcentual”, la cual se calcula al dividir el total de cada falla para el área del tramo; en este caso el área es de 1209.85 m². Luego el valor deducido se obtiene de las curvas que presenta el PCI para cada falla, basándose en la (ASTM D-6433, 2011).

Tabla 14. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1B-1C

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
1	L	m ²	0.42	0.0%	5
1	M	m ²	0.78	0.1%	7
4	L	m ²	0.70	0.1%	0.1
7	L	m	3.30	0.3%	1
7	M	m	3.3	0.3%	4
11	L	m ²	100.14	8.3%	15
11	M	m ²	4.08	0.3%	6
13	H	unid	2.00	0.2%	26
19	M	m ²	85.92	7.1%	18

La Tabla 15, muestra el número de valores deducidos mayores a 2, el valor deducido más alto y basándose en la Ecuación 16 de la pg. 62, calcula el número máximo de fallas permitidas.

Tabla 15. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1B-1C

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	7
--	----------

Valor deducido más alto	26
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	7.80

A continuación, en la **Tabla 16** se tiene el cálculo de VDC , el mismo que se obtiene de la curva presentada en la (ASTM D-6433, 2011), la cual emplea el VDT y q para determinar el VDC.

Tabla 16. Obtención del VDC para PCI para tramo 1B-1C

N°	VALORES DEDUCIDOS								VDT	q	VDC
1	26	18	15	7	6	5	4	0.8	81.8	7	38
2	26	18	15	7	6	5	2	0.8	79.8	6	36
3	26	18	15	7	6	2	2	0.8	76.8	5	40
4	26	18	15	7	2	2	2	0.8	72.8	4	42
5	26	18	15	2	2	2	2	0.8	67.8	3	46
6	26	18	2	2	2	2	2	0.8	54.8	2	40
7	26	2	2	2	2	2	2	0.8	38.8	1	37

De esto se obtiene el máximo VDC, y el índice de condición de pavimento (PCI), se obtiene mediante la **Ecuación 17** de la **pg. 62**. En este caso el valor de PCI es de 54 y representa un pavimento en estado Regular. (Ver **Tabla 17**)

Tabla 17. Resultado de PCI para tramo 1B-1C

MÁXIMO VDC	46
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	54
CONDICION DEL PAVIMENTO	REGULAR

Para los siguientes tramos a continuación se sigue el mismo procedimiento para determinar el PCI, por lo que se indicarán solamente los resultados. Los cálculos estarán presentados en la sección de A , de la [Tabla 61](#) a la [Tabla 75](#).

- Tramo 1C-1D

En la [Tabla 18](#), se presenta como resultado del PCI para el tramo 1C-1D el valor de 68, el mismo que presenta una condición del pavimento de Bueno.

Tabla 18. Resultado de PCI para tramo 1C-1D

MAXIMO VDC	32
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	68
CONDICION DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1D-1E

En la [Tabla 19](#), se presenta como resultado del PCI para el tramo 1D-1E el valor de 58, el mismo que presenta una condición del pavimento de Bueno.

Tabla 19. Resultado de PCI para tramo 1D-1E

MAXIMO VDC	42
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	58
CONDICION DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1E-1F

En la [Tabla 20](#), se presenta como resultado del PCI para el tramo 1E-1F el valor de 46, el mismo que presenta una condición del pavimento de Regular.

Tabla 20. Resultado de PCI para tramo 1E-1F

MAXIMO VDC	54
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	46
CONDICION DEL PAVIMENTO	REGULAR

Por otro lado, para la metodología Windshield se ha programado en una hoja de cálculo preliminar, el proceso para la obtención de ICF. Este contenido es similar al cálculo que va en el programa de SGI propuesto:

- Tramo 1B-1C

A continuación, en la Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23, y Tabla 24, se muestran los resultados de la obtención del ICF mediante Windshield correspondiente a cada tramo. El proceso para la obtención del mismo se encuentra en la sección 3.4.1. Metodología Windshield y 3.4.2. Metodología Windshield aplicada a pavimentos flexibles de este trabajo.

Tabla 21. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1B-1C

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Grietas lineales	14	H	1.5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1.0				6.2
		L	0.6				
Piel de cocodrilo	22	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.7				10.6

		L	0. 4				
Parqueo	14	H	1. 3	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0. 8				7.3
		L	0. 5				
Baches	31	H	0. 9	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 6				11.2
		L	0. 4				
Peladuras	15	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 8				3.0
		L	0. 5				
Desprendimiento de agregados	6	H	1. 8	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 2				6.7
		L	0. 7				
Exudación de asfalto	13	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				0.0
		L	0. 6				

Ahuellamiento	20	H	1. 2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0. 8				10.4	
		L	0. 5					
							LDR	57.5
							NDR	79.8
							ICF	57

- Tramo 1C-1D

Tabla 22. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1C-1D

FALLAS	IF	SEVERIDA D	IP	FRECUENCIA			
				RAR A	OCASIONA L	FRECUENT E	
Grietas lineales	14	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				12.3
		L	0. 6				
Piel de cocodrilo	22	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 7				4.2
		L	0. 4				
Parqueo	14	H	1. 3	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR

		M	0. 8				13.9
		L	0. 5				
Baches	31	H	0. 9	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 6				5.1
		L	0. 4				
Peladuras	15	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 8				0.0
		L	0. 5				
Desprendimiento de agregados	6	H	1. 8	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 2				5.7
		L	0. 7				
Exudación de asfalto	13	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				0.0
		L	0. 6				
Ahuellamiento	20	H	1. 2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 8				4.2

		L	0. 5				
						LDR	72.7
						NDR	68.1
						ICF	68

- Tramo 1D-1E

Tabla 23. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1D-1E

FALLAS	IF	SEVERIDA D	IP	FRECUENCIA			
				RAR A	OCASIONA L	FRECUENT E	
Grietas lineales	1 4	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				3.7
		L	0. 6				
Piel de cocodrilo	2 2	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 7				7.1
		L	0. 4				
Parcheo	1 4	H	1. 3	0.45	0.6	0.76	LDR , NDR
		M	0. 8				8.2

		L	0. 5				
Baches	3 1	H	0. 9	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 6				16.8
		L	0. 4				
Peladuras	1 5	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 8				0.0
		L	0. 5				
Desprendimiento de agregados	6	H	1. 8	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 2				6.7
		L	0. 7				
Exudación de asfalto	1 3	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				0.0
		L	0. 6				
Ahuellamiento	2 0	H	1. 2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 8				10.4
		L	0. 5				

LDR	57.5
NDR	81.4
ICF	58

- Tramo 1E-1F

Tabla 24. Hoja de cálculo para obtener ICF del tramo 1E-1F

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Grietas lineales	1 4	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	1. 0				9.3
		L	0. 6				
Piel de cocodrilo	2 2	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0. 7				10.6
		L	0. 4				
Parcheo	1 4	H	1. 3	0.45	0.6	0.76	LDR , NDR
		M	0. 8				13.9
		L	0. 5				
Baches	3 1	H	0. 9	0.45	0.6	0.76	LDR

		M	0. 6				12.6	
		L	0. 4					
Peladuras	1 5	H	1. 1	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0. 8				0.0	
		L	0. 5					
Desprendimiento de agregados	6	H	1. 8	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	1. 2				6.7	
		L	0. 7					
Exudación de asfalto	1 3	H	1. 5	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	1. 0				0.0	
		L	0. 6					
Ahuellamiento	2 0	H	1. 2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0. 8				13.8	
		L	0. 5					
							LDR	49.1
							NDR	70.2
							ICF	49

Para pavimentos rígidos:

Para el pavimento rígido los tramos analizados son 1A-1B (104 m.), 1A-60A (80 m.), 60A-62A (135 m.), y 62A-63A (51 m.), estos se analizan por el número de losas y el deterioro que tiene cada una según lo mencionado en la Normativa (ASTM D-6433, 2011).

La diferencia del cálculo de PCI para pavimentos flexibles y rígidos, es que, en este caso para pavimentos rígidos la densidad porcentual se obtiene de la división del número de losas entre el área total del tramo. Para el resto de cálculos se emplea el mismo procedimiento, por lo cual a continuación se mostrarán solamente los resultados. Si se desea observar el procedimiento, el mismo se encuentra en la sección de A, de la [Tabla 76](#) a la [Tabla 91](#).

- Tramo 1A-1B

En la [Tabla 25](#), se presenta como resultado del PCI para el tramo 1A-1B el valor de 64, el mismo que presenta una condición del pavimento de Bueno.

Tabla 25. Resultado PCI para tramo 1A-1B

MÁXIMO VDC	36
ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO PCI	64
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1A -60A

En la [Tabla 26](#), se presenta como resultado del PCI para el tramo 1A-60A el valor de 64, el mismo que presenta una condición del pavimento de Regular.

Tabla 26. Resultado PCI para tramo 1A-60A

MÁXIMO VDC	46
ÍNDICE DE CONDICIÓN DE	54

PAVIMENTO PCI	
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	REGULAR

- Tramo 60A-62A

En la Tabla 27, se presenta como resultado del PCI para el tramo 60A-62A el valor de 78, el mismo que presenta una condición del pavimento de Muy bueno.

Tabla 27. Resultado PCI para tramo 60A-62A

MÁXIMO VDC	22
ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO PCI	78
CONDICIÓN DEL PAVIMENTO	MUY BUENO

- Tramo 62A-63A

En la Tabla 28, se presenta como resultado del PCI para el tramo 62A-63A el valor de 6, el mismo que presenta una condición del pavimento de Colapsado.

Tabla 28. Resultado PCI para tramo 62A-63A

MÁXIMO VDC	78
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	22
CONDICION DEL PAVIMENTO	MUY POBRE

Para el método de Windshield, para la muestra representativa de pavimentos rígidos se obtienen los siguientes resultados presentados en la Tabla 29, Tabla 30, Tabla 31, y Tabla 32 para cada tramo respectivamente, de igual forma si se desea observar el procedimiento, el mismo se encuentra en la sección (3.4.3. Metodología Windshield aplicada a pavimentos rígidos) de este trabajo:

- Tramo 1A-1B

Tabla 29. Hoja de cálculo de ICF del tramo 1A-1B

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA				
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE		
Fisura lineal	17	H	1.4	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				11.7	
		L	0.6					
Losa Dividida	31	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				18.1	
		L	0.5					
Desprendimientos	7	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR	
		M	0.8				3.6	
		L	0.5					
Sellado y Fisura de Juntas	2	H	1.5	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	1.0				2.3	
		L	0.6					
Estallido por compresión	34	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				0.0	
		L	0.5					
Parcheo	17	H	1.3	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				9.0	
		L	0.5					
Fisura en esquina	23	H	1.1	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.7				10.3	
		L	0.4					
							LDR	70.5
							NDR	65.4

ICF	65
------------	-----------

- Tramo 1A -60A

Tabla 30. Hoja de cálculo de ICF del tramo 1A-60A

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA				
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE		
Fisura lineal	17	H	1.4	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				11.7	
		L	0.6					
Losa Dividida	31	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				27.2	
		L	0.5					
Desprendimientos	7	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR	
		M	0.8				6.8	
		L	0.5					
Sellado y Fisura de Juntas	2	H	1.5	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	1.0				0.9	
		L	0.6					
Estallido por compresión	34	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				18.1	
		L	0.5					
Parcheo	17	H	1.3	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				4.1	
		L	0.5					
Fisura en esquina	23	H	1.1	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.7				4.6	
		L	0.4					
							LDR	49.7
							NDR	72.8
							ICF	50

--	--

- Tramo 60A-62A

Tabla 31. Hoja de cálculo de ICF del tramo 60A-62A

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA				
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE		
Fisura lineal	17	H	1.4	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				6.9	
		L	0.6					
Losa Dividida	31	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				16.1	
		L	0.5					
Desprendimientos	7	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR	
		M	0.8				3.6	
		L	0.5					
Sellado y Fisura de Juntas	2	H	1.5	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	1.0				0.5	
		L	0.6					
Estallido por compresión	34	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				0.0	
		L	0.5					
Parcheo	17	H	1.3	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				4.1	
		L	0.5					
Fisura en esquina	23	H	1.1	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.7				7.7	
		L	0.4					
							LDR	79.3
							NDR	77.7
							ICF	78

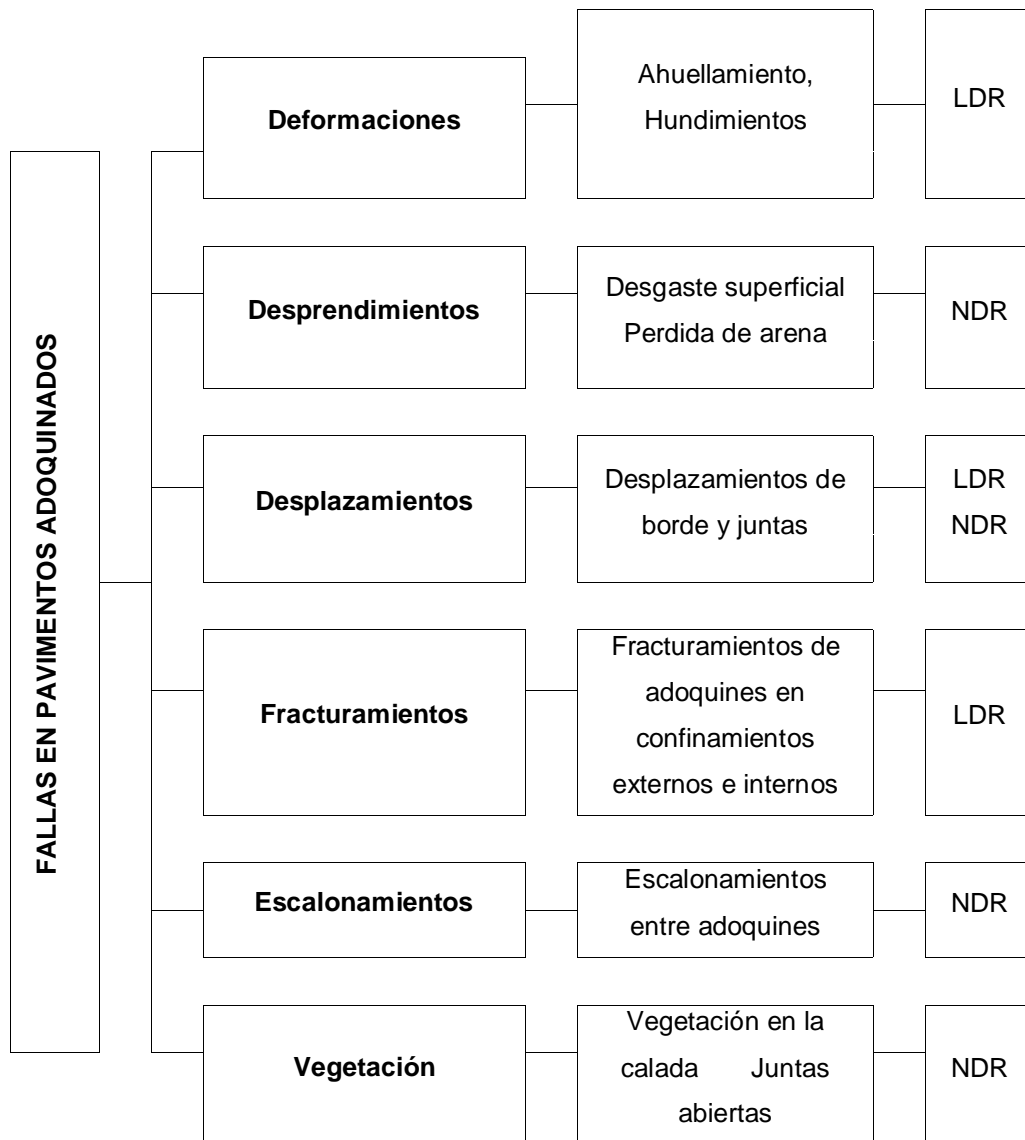
- Tramo 62A-63A

Tabla 32. Hoja de cálculo de ICF del tramo 62A-63A

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA				
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE		
Fisura lineal	17	H	1.4	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				17.5	
		L	0.6					
Losa Dividida	31	H	1.1	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				27.2	
		L	0.5					
Desprendimientos	7	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR	
		M	0.8				5.4	
		L	0.5					
Sellado y Fisura de Juntas	2	H	1.5	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	1.0				1.5	
		L	0.6					
Estallido por compresión	34	H	1.2	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.8				30.6	
		L	0.5					
Parcheo	17	H	1.3	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.9				17.1	
		L	0.5					
Fisura en esquina	23	H	1.1	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.7				19.6	
		L	0.4					
							LDR	23.5
							NDR	40.4
							ICF	24

3.4.6. Metodología Windshield aplicada a pavimentos adoquinados

Para obtener los factores de ponderación se utiliza la misma **Tabla 33** propuesta por (Apolo Bustamante, 2018), en donde tomamos los mismos coeficientes y parámetros para clasificar el tipo de deterioros que tienen y van a ser analizadas en las vías adoquinadas de la urbe del cantón Santa Isabel. (ver Figura 9)



*Figura 9. Fallas en pavimentos adoquinados.
Adaptado de (NCDOT, 2011) y (VDOT, 2006)*

Los coeficientes propuestos por Apolo se pueden observar en la Tabla 33 a continuación:

*Tabla 33. Valores para cálculo del ICF.
(Apolo Bustamante, 2018)*

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.94				
		L	0.60				
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.37				
		L	0.20				
Desplazamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.34				
		L	0.20				
Fracturamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.37				
		L	0.20				
Escalonamientos	15.6	H	0.72	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR

		M	0.4 0				
		L	0.2 0				
Vegetación	11. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.3 7				
		L	0.2 0				
						LDR	
						NDR	
						ICF	

El cuadro es válido para la metodología Windshield y el mismo está validado por la tesis de SGI para Gualaceo (Apolo Bustamante, 2018), el cual, muestra 5 deterioros y donde analiza su severidad en función del porcentaje de área afectada y los niveles de severidad.

3.4.7. Metodología de validación de Windshield para pavimentos adoquinados

A continuación, en la Tabla 34 se muestra el cuadro con el cual (Higuera & Pacheco, 2010), obtienen el Índice de Condición Funcional del Pavimento el cual es corroborado en la normativa colombiana.

Tabla 34. Factores para obtención de ICF
(Higuera & Pacheco, 2010)

Clase	Tipo de deterioro	Influencia	Peso	NFS			% Área Equivalente Afectada, FA				
				Bajo	Medio	Alto	0	5	10	15	>15
Deformaciones	Abultamiento	48	1.2	1	1.25	1.5	0	0.5	0.6	0.76	1
	Ahuellamiento		1.12	1	1.15	1.3					
	Depresiones		1	1	1.2	1.4					
Desprendimientos	Desgaste Superficial	9	1.1	1	1.15	1.3	0	0.5	0.6	0.76	1
	Perdida de arena		1	1	1.2	1.4					
Desplazamientos	Desplazamiento de borde	10	1.2	1	1.15	1.3	0	0.5	0.6	0.76	1
	Desplazamiento de juntas		1	1	1.1	1.2					
Fracturamientos	Fracturamiento de confinamientos internos	10	1.2	1	1.15	1.3	0	0.5	0.6	0.76	1
	Fracturamiento de confinamientos externos		1	1	1.1	1.2					
Otros deterioros	Escalonamientos entre adoquines	23	1.2	1	1.25	1.5	0	0.5	0.6	0.76	1
	Escalonamientos entre adoquines y confinamientos		1.1	1	1.15	1.3					
	Juntas abiertas		1	1	1.15	1.3					
	Vegetación en la calzada		1.1	1	1.15	1.3					

El procedimiento a llevar a cabo es similar, debe tenerse en cuenta que es necesario como un dato fundamental tener las medidas exactas de cada falla para saber el área afectada en porcentaje respecto al tramo de vía a tratar. Luego se clasifica la falla según su tipo de falla y severidad de la misma (NFS) y se encuentra el área equivalente con el que se obtiene el porcentaje de área equivalente de ahí se realiza una interpolación según los rangos que se encuentre el área equivalente y se obtiene el valor total a multiplicar que por cada falla va disminuyendo de 100 y finalmente se halla el índice de condición funcional de pavimento.

Los coeficientes utilizada por Apolo ha sido validados con éxito teniendo resultados positivos y muy semejantes. Por lo tanto, aquí se vuelve a corroborar el método en función del autor (Higuera & Pacheco, 2010) y (Apolo Bustamante, 2018) donde podemos observar la invariabilidad de los resultados de la Tabla 35 a la

Tabla 44:

- Tramo 2B-2C

*Tabla 35. Resultado de ICF del tramo 2B-2C
(Higuera & Pacheco, 2010)*

Resultado de Evaluación de pavimentos articulados	ICF	42.1
	Condición	Regular

Tabla 36. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2B-2C

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.94				46.7
		L	0.60				
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.37				0.0

		L	0.2 0				
Desplazamientos	12. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.3 4				2.4
		L	0.2 0				
Fracturamientos	12. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.3 7				2.0
		L	0.2 0				
Escalonamientos	15. 6	H	0.7 2	0.45	0.6	0.76	NDR , LDR
		M	0.4 0				1.4
		L	0.2 0				
Vegetación	11. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.3 7				2.4
		L	0.2 0				
						LDR	47.5
						NDR	93.7
						ICF	47

- Tramo 2C-3C

*Tabla 37. Resultado de ICF del tramo 2C-3C
(Higuera & Pacheco, 2010)*

Resultado de Evaluación de pavimentos articulados	ICF	38.7
	Condición	Pobre

Tabla 38. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2C-3C

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.94				59.1
		L	0.60				
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.37				0.9
		L	0.20				
Desplazamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.34				1.1

		L	0.2 0				
Fracturamientos	12. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.3 7				1.1
		L	0.2 0				
Escalonamientos	15. 6	H	0.7 2	0.45	0.6	0.76	NDR , LDR
		M	0.4 0				0.0
		L	0.2 0				
Vegetación	11. 0	H	0.6 2	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.3 7				5.2
		L	0.2 0				
						LDR	38.7
						NDR	92.8
						ICF	39

- Tramo 2A-2B

*Tabla 39. Resultado de ICF del tramo 2A-2B
(Higuera & Pacheco, 2010)*

Resultado de Evaluación de pavimentos articulados	ICF	59.5
	Condición	Regular

--	--	--

Tabla 40. Resultado ICF, método Windshield del tramo 2A-2B

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA				
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE		
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.94				35.0	
		L	0.60					
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.37				1.6	
		L	0.20					
Desplazamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR	
		M	0.34				0.0	
		L	0.20					
Fracturamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR	
		M	0.37				4.5	
		L	0.20					
Escalonamientos	15.6	H	0.72	0.45	0.6	0.76	NDR, LDR	
		M	0.40				5.1	
		L	0.20					
Vegetación	11.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.37				1.8	
		L	0.20					
							LDR	55.5
							NDR	91.5
							ICF	55

- Tramo 1B-2B

*Tabla 41. Resultado de ICF del tramo 1B-2B
(Higuera & Pacheco, 2010)*

Resultado de Evaluación de pavimentos articulados	ICF	64.0
	Condición	Regular

Tabla 42. Resultado ICF, método Windshield del tramo 1B-2B

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.94				35.0
		L	0.60				
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.37				0.0
		L	0.20				
Desplazamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.34				0.0
		L	0.20				
Fracturamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.37				3.4
		L	0.20				
Escalonamientos	15.6	H	0.72	0.45	0.6	0.76	NDR, LDR

		M	0.40				0.0	
		L	0.20					
Vegetación	11.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.37				2.4	
		L	0.20					
							LDR	61.6
							NDR	97.6
							ICF	62

- Tramo 1C-2C1

*Tabla 43. Resultado de ICF del tramo 1C-2C1
(Higuera & Pacheco, 2010)*

Resultado de Evaluación de pavimentos articulados	ICF	59
	Condición	Regular

Tabla 44. Resultado ICF, método Windshield del tramo 1C-2C1

FALLAS	IF	SEVERIDAD	IP	FRECUENCIA			
				RARA	OCASIONAL	FRECUENTE	
Deformaciones	57.6	H	1.35	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.94				32.5
		L	0.60				
Desprendimientos	9.9	H	0.67	0.45	0.6	0.76	NDR
		M	0.37				2.8
		L	0.20				
Desplazamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR, NDR
		M	0.34				0.0
		L	0.20				
Fracturamientos	12.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	LDR
		M	0.37				2.0

		L	0.20					
Escalonamientos	15.6	H	0.72	0.45	0.6	0.76	NDR, LDR	
		M	0.40				3.7	
		L	0.20					
Vegetación	11.0	H	0.62	0.45	0.6	0.76	NDR	
		M	0.37				1.8	
		L	0.20					
							LDR	61.8
							NDR	91.6
							ICF	62

3.5. METODOLOGÍA DE TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones está ligada a las matrices de Markov, esta a su vez después de obtener un ICF compuesto por las vías analizadas proponen un mantenimiento adecuado según sea la calificación del pavimento.

En primer lugar, se obtienen distintos mantenimientos por tipo de pavimento y severidad de la falla, que han sido tomados en cuenta en el análisis del botón mantenimiento por falla de la [sección 4.3.1](#), estos basados en (Vásquez, 2002):

A continuación, en la Tabla 45, Tabla 46, y Tabla 47 se muestran todos los mantenimientos:

1. Flexibles

Tabla 45. Mantenimientos para flexibles respecto a severidad de falla.
(Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos, 2016)

	Severidad		
	Alta	Media	Baja
Grieta lineal	Sellado de grietas, Parcheo parcial	Sellado de grietas	No se hace nada, Sellado de grietas de ancho mayor que 3.0 mm
Piel de cocodrilo	Parcheo parcial o full depth, Sobrecarpeta, Reconstrucción	Parcheo parcial o en toda la profundidad (Full Depth), Sobrecarpeta, Reconstrucción	No se hace nada, Sello superficial, Sobrecarpeta
Parcheo	Sustitución del parche	No se hace nada, Sustitución del parche	No se hace nada
Baches	Parcheo profundo	Parcheo parcial o profundo	No se hace nada, Parcheo parcial o profundo
Peladura	- Tratamiento superficial, Sobrecarpeta, Reconstrucción	Sello superficial, Tratamiento superficial, Sobrecarpeta	No se hace nada, Sello superficial, Tratamiento superficial
Desprendimiento de agregado	- Tratamiento superficial, Sobrecarpeta,	Sello superficial, Tratamiento	No se hace nada, Sello superficial,

	Reciclaje, Reconstrucción	superficial, Sobrecarpeta	Tratamiento superficial
Exudación	Se aplica arena / agregados y cilindrado (precalentado si fuera necesario)	Se aplica arena / agregados y cilindrado	No se hace nada
Ahuellamiento	- Parcheo superficial, parcial o profundo, Fresado y sobrecarpeta	Parcheo superficial, parcial o profundo, Fresado y sobrecarpeta	No se hace nada, Fresado y sobrecarpeta

2. Rígidos

Tabla 46. Mantenimientos para rígidos respecto a severidad de falla.

(Unidad de Auditoría Técnica - LanammeUCR, 2023)

	Severidad		
	Alta	Media	Baja
Fisura lineal	Sellado de grietas, Parcheo profundo, Reemplazo de la losa	Sellado de grietas	No se hace nada, Sellado de fisuras más anchas que 3 mm

Losa dividida	Reemplazo de la losa	Reemplazo de la losa	No se hace nada, Sellado de grietas de ancho mayor de 3mm
Descascaramiento de junta	Parqueo parcial, Reconstrucción de la junta	Parqueo parcial	No se hace nada
Sello de junta	Resellado de junta	Resellado de juntas	No se hace nada
Estallido por compresión	Parqueo profundo, Reemplazo de la losa	Parqueo profundo, Reemplazo de la losa	No se hace nada, Parqueo profundo o parcial
Parqueo	Reemplazo del parche	Sellado de grietas, Reemplazo del parche	No se hace nada
Fisura de esquina	Parqueo profundo	Sellado de fisuras, Parqueo profundo	No se hace nada, Sellado de fisuras

			de más de 3mm
--	--	--	------------------

3. Adoquinados

Tabla 47. Mantenimientos para adoquinados respecto a severidad de falla.

(Higuera & Pacheco, 2010)

	Severidad		
	Alta	Media	Baja
Deformaciones	Reposición del material de la capa, Readoquinado total	- Readoquinado parcial	No se hace nada
Desprendimientos	- Cambio de cama de arena, Mejoramiento de la base	No se hace nada	No se hace nada
Desplazamientos	Readoquinado parcial, Sello de juntas, Reconstrucción de juntas	Sello de juntas	No se hace nada, Sello de juntas
Fracturamientos	Cambio de adoquines, Readoquinado total	Reemplazo menor de adoquines	No se hace nada, Reemplazo menor de adoquines
Escalonamientos	Reposición del material de la capa,	Reposición del material de la capa	No se hace nada,

	Readoquinado parcial, Readoquinado total		Reposición del material de la capa
Vegetación	Limpieza de cunetas, Chapeo de montes, Limpieza de montes, Corte de ramas, Aplicar un herbicida	Chapeo de montes, Limpieza de montes, Corte de ramas	Chapeo de montes, Limpieza de montes

Además, se tiene tratamientos recomendados de acuerdo al tipo de mantenimiento y a algunos criterios de análisis tomados en cuenta. El análisis de estos mantenimientos se encuentra en el botón de “mantenimientos” del programa en la sección 4.4.2 de este trabajo.

A continuación, en la Tabla 49 se muestran los ocho criterios para el análisis, con sus respectivas ponderaciones. (Talmage, Mogrovejo, & Zhang, 2011) Además, se tienen las opciones que conlleva cada uno de los criterios para ser escogidas por el usuario, cada una de las opciones tiene un peso, los cuales se emplearán para el cálculo final de esta manera: se multiplica cada uno de los pesos (tienen que sumar 1) por los coeficientes que tiene cada opción de su respectivo criterio. Luego se suman estos productos y se dividen para la suma de los 8 pesos de cada criterio; es decir 1. Finalmente se obtendrá el valor del resultado combinado para definir el mantenimiento preventivo, correctivo, recapeo, rehabilitación y reconstrucción según la Tabla 48.

*Tabla 48. Tratamiento sugerido en base a la valoración del resultado ponderado.
(Talmage, Mogrovejo, & Zhang, 2011)*

Resultado ponderado	Mantenimiento sugerido
86-100	Preventivo
71-85	Correctivo
56-70	Recapeo
36-55	Rehabilitación
0-35	Reconstrucción

Tabla 49. Criterios para el análisis del tipo de mantenimiento.
(Talmage, Mogrovejo, & Zhang, 2011)

Criterios	Peso	Opciones
Valor ICF	0.6	Valor de ICF
Puntuación de expertos	0.1	Excelente: 100, Bueno: 90, Regular: 70, Pobre: 60, Muy pobre: 50
Importancia	0.1	Normal: 1.2, Importante: 1, Muy importante: 0.8, Sin datos: 1
Año de recapeo	0	0: 1.4, 5: 1.2, 10: 1, 15: 0.8, 20: 0.6, Sin datos: 1
Año de sellado	0	0: 1.4, 5: 1.2, 10: 1, 15: 0.8, 20: 0.6, Sin datos: 1
Uso	0.1	Normal: 1.2, Concurrido: 1, Muy concurrido: 0.8, Sin datos: 1
Periodo de diseño	0	Mayor a 15/20 años: 1.2, Entre 5/10 y 15/20 años: 1, Igual a 5/10 años: 0.8, Sin datos: 1
Opinión del usuario	0.1	Positiva: 1.2, Neutra: 1, Negativa: 0.8, Sin datos: 1
SUMA	1	

A continuación, en la Tabla 50, se muestran todos los tratamientos correspondientes a cada tipo de mantenimiento que han sido tomados en cuenta en el análisis del botón mantenimiento en la [sección 4.3.2](#) , estos basados en (Vásquez, 2002):

Tabla 50. Tratamientos según tipo de mantenimiento y tipo de pavimento.
(Vásquez, 2002)

Tipo de Mantenimiento	Tipo de pavimento		
	Flexible	Rígido	Adoquinado

<p>Preventivo</p>	<p>Limpieza de cunetas, Chapeo de montes, Limpieza de montes, Corte de ramas, Bacheo parcial</p>	<p>Limpieza de cunetas, Chapeo de montes, Limpieza de montes, Corte de ramas, Bacheo parcial</p>	<p>Limpieza de cunetas, Chapeo de montes, Limpieza de montes, Corte de ramas</p>
<p>Correctivo</p>	<p>Sello superficial de grietas, Sello de asfáltico, Tratamiento superficial, Bacheo mayor, Reparación del espesor dañado, Sustitución del parche</p>	<p>Sello superficial de grietas, Sello de juntas, Reconstrucción de juntas, Bacheo mayor o cambio de losa</p>	<p>Reacomodo del adoquinado, Reemplazo menor de adoquines, Sello de juntas, Reconstrucción de juntas</p>
<p>Recapeo</p>	<p>Reparación del espesor parcial, Colocación de carpeta asfáltica, Tratamiento superficial doble</p>	<p>Reanudado de la superficie o sobrecarpeta, Reemplazo de losa por mezcla asfáltica, Reposición de losa de hormigón</p>	<p>Reanudado de la superficie, Cambio de adoquines</p>
<p>Rehabilitación</p>	<p>Fresado y sobrecarpeta, Cambio de carpeta asfáltica</p>	<p>Reparación de todo el espesor, Colocación de barras de transferencia de carga, Sobrecarpeta</p>	<p>Readoquinado parcial, Reposición del material de la capa, Readoquinado total</p>

Reconstrucción	Mejoramiento de la subbase, Mejoramiento de la base, Cambio de la carpeta asfáltica parcial, Cambio de la carpeta asfáltica total	Mejoramiento de la base, Cambio de la carpeta asfáltica parcial, Cambio de la carpeta asfáltica total	Cambio de cama de arena, Mejoramiento de la base, Readoquinado total
-----------------------	--	---	--

Por último, de acuerdo al tipo de mantenimiento obtenido anteriormente se puede aplicar matrices de Markov, para determinar la predicción de deterioros en el tiempo para la red vial. Los porcentajes expuestos a continuación, se derivan de criterios técnicos respaldados tanto por teoría de deterioro como por la experiencia de tratamientos realizados. El objetivo es representar la condición de los pavimentos después de aplicar o no una intervención específica en ellos. La ICT (Illinois Center For Transportation), define que el procedimiento apropiado de tratamientos es mediante el uso de matrices de transición o valores de activación para mantenimientos. (Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

En consecuencia, la Figura 10 exhibe la matriz de evolución del deterioro correspondiente a una vía sometida a un mantenimiento preventivo. Para los pavimentos clasificados como "Excelente", se estima que el 96% de ellos permanecerán en dicho estado, mientras que el 4% restante experimentará una degradación al estado "Muy Bueno". En el caso de los pavimentos categorizados como "Bueno", se prevé que el 93% mantendrá su estado actual, mientras que el 7% restante se degradará a los estados "Regular" y "Pobre" con un 6% y 1% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Regular", se estima que el 85% se mantendrá en dicho estado, mientras que el 15% restante sufrirá una degradación a los estados "Pobre" y "Fallado" con un 13% y 2% respectivamente. Para los pavimentos clasificados como "Pobre", se prevé que el 80% se mantendrá en su estado actual, mientras que el 20% restante experimentará una degradación al estado "Fallado". Por último, en el caso de los pavimentos clasificados como "Fallado", se espera que la totalidad de ellos permanezcan en dicho estado.

Preventivo	Correctivo	Recapeo	Rehabilitación	Reconstrucción	
Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	96	4	0	0	0
Bueno	0	93	6	1	0
Regular	0	0	85	13	2
Pobre	0	0	0	80	20
Fallado	0	0	0	0	100

Figura 10. Valores de predicción de deterioro para un mantenimiento Preventivo. (Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

Para una matriz de mantenimiento correctivo (ver la Figura 11), se observa que la evolución del deterioro es la siguiente: un 95% de los pavimentos se mantendrá en el estado "Excelente", mientras que un 5% experimentará una degradación a los estados "Bueno" y "Regular" con un 4% y 1% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Bueno", se estima que el 85% permanecerá en el mismo estado, el 10% se degradará a los estados "Regular" y "Pobre" con un 7% y 3% respectivamente, y un 5% mejorará a un estado "Excelente". Para los pavimentos clasificados como "Regular", se prevé que el 80% mantendrá su estado actual, el 15% se degradará a los estados "Pobre" y "Fallado" con un 12% y 3% respectivamente, y un 5% mejorará a un estado "Bueno". En cuanto a los pavimentos clasificados como "Pobre", se estima que el 70% se mantendrá en su estado actual, el 20% se degradará a un estado "Fallado" y el 10% mejorará a un estado "Regular". Por último, en el caso de los pavimentos clasificados como "Fallado", se espera que la totalidad de ellos permanezcan en dicho estado.

Preventivo	Correctivo	Recapeo	Rehabilitación	Reconstrucción	
Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	95	4	1	0	0
Bueno	5	85	7	3	0
Regular	0	5	80	12	3
Pobre	0	0	10	70	20
Fallado	0	0	0	0	100

Figura 11. Valores de predicción de deterioro para un mantenimiento Correctivo.

(Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

Para una matriz de recapeo (ver la Figura 12), se observa que la evolución del deterioro es la siguiente: un 95% de los pavimentos se mantendrá en el estado "Excelente", mientras que un 5% experimentará una degradación a los estados "Bueno" y "Regular" con un 4% y 1% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Bueno", se estima que el 86% permanecerá en el mismo estado, un 6% se degradará al estado "Regular" y un 8% mejorará a un estado "Excelente". Para los pavimentos clasificados como "Regular", se prevé que el 78% mantendrá su estado actual, un 7% se degradará al estado "Pobre" y un 3% al estado "Fallado", mientras que un 12% mejorará a los estados "Bueno" y "Excelente" con un 4% y 8% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Pobre", se estima que el 65% se mantendrá en su estado actual, un 18% se degradará al estado "Fallado", mientras que un 17% mejorará a los estados "Excelente", "Bueno" y "Regular" con un 10%, 5% y 2% respectivamente. Por último, en el caso de los pavimentos clasificados como "Fallado", se espera que el 80% de ellos permanezcan en dicho estado, mientras que un 20% mejorará a los estados "Excelente", "Bueno", "Regular" y "Pobre" con un 10%, 5%, 3% y 2% respectivamente.

	Preventivo	Correctivo	Recapeo	Rehabilitación	Reconstrucción
Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	95	4	1	0	0
Bueno	8	86	6	0	0
Regular	8	4	78	7	3
Pobre	10	5	2	65	18
Fallado	10	5	3	2	80

Figura 12. Valores de predicción de deterioro para un Recapeo.
(Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

Para una matriz de rehabilitación (ver la Figura 13), se observa que la evolución del deterioro es la siguiente: un 95% de los pavimentos se mantendrá en el estado "Excelente",

mientras que un 5% experimentará una degradación a los estados "Bueno" y "Regular" con un 4% y 1% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Bueno", se estima que el 80% permanecerá en el mismo estado, un 10% se degradará a los estados "Regular" y "Pobre" con un 8% y 2% respectivamente, y un 10% mejorará a un estado "Excelente". Para los pavimentos clasificados como "Regular", se prevé que el 75% mantendrá su estado actual, un 10% se degradará al estado "Pobre" y un 3% al estado "Fallado", mientras que un 12% mejorará a los estados "Bueno" y "Excelente" con un 2% y 10% respectivamente. En cuanto a los pavimentos clasificados como "Pobre", se estima que el 55% se mantendrá en su estado actual, un 25% se degradará al estado "Fallado", y un 20% mejorará a un estado "Excelente". Por último, en el caso de los pavimentos clasificados como "Fallado", se espera que el 75% de ellos permanezcan en dicho estado, mientras que un 25% mejorará a un estado "Excelente".

	Preventivo	Correctivo	Recapeo	Rehabilitación	Reconstrucción
Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	95	4	1	0	0
Bueno	10	80	8	2	0
Regular	10	2	75	10	3
Pobre	20	0	0	55	25
Fallado	25	0	0	0	75

Figura 13. Valores de predicción de deterioro para una Rehabilitación.

(Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

Para una matriz de reconstrucción (ver la Figura 14), se observa que la evolución del deterioro es la siguiente: un 96% de los pavimentos se mantendrá en el estado "Excelente", mientras que un 4% experimentará una degradación al estado "Bueno". En cuanto a los pavimentos clasificados como "Bueno", se estima que el 80% permanecerá en el mismo estado, un 5% se degradará al estado "Regular", y un 15% mejorará a un estado "Excelente". Para los pavimentos clasificados como "Regular", se prevé que el 70% mantendrá su estado actual, un 7% se degradará al estado "Pobre", un 3% al estado "Fallado", y un 20% mejorará a un estado "Excelente". En cuanto a los pavimentos

clasificados como "Pobre", se estima que el 60% se mantendrá en su estado actual, un 10% se degradará al estado "Fallado", y un 30% mejorará a un estado "Excelente". Por último, en el caso de los pavimentos clasificados como "Fallado", se espera que el 50% de ellos permanezcan en dicho estado, mientras que el 50% mejorará a un estado "Excelente".

	Preventivo	Correctivo	Recapeo	Rehabilitación	Reconstrucción
Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	96	4	0	0	0
Bueno	15	80	5	0	0
Regular	20	0	70	7	3
Pobre	30	0	0	60	10
Fallado	50	0	0	0	50

Figura 14. Valores de predicción de deterioro para una Reconstrucción.
(Wolters, Zimmerman, Schattler, & Rietgraf, 2011)

3.6. METODOLOGÍA DE SOSTENIBILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTOS

Se realizará un análisis de sostenibilidad que involucre: la situación actual de planificación y gestión de movilidad en contraste con la situación esperada y sugerida para la correcta planificación y gestión vial en el cantón Santa Isabel. El programa INVEST (U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021) sugiere los criterios técnicos para su comparación.

Para el análisis de ciclo de vida, algunos datos no se tienen registrados por la municipalidad, en base a encuestas de usuarios se tabula la información, se toman las siguientes hipótesis:

- El año de construcción será en el año de 1995, sin un mantenimiento adecuado, pero al ser completamente nuevo su deterioro será leve.
- Para el año 2014-2015 existió un mantenimiento que recupera las condiciones del pavimento, pero tampoco se tiene registro de un control periódico de la vía.
- En el año de 2019-2020 se tiene un estado del pavimento muy semejante por la pandemia ocurrida que desgasta su capa de rodadura muy tenuemente.
- Se propondrán 2 alternativas viables y que muestren la diferencia según un criterio técnico y de sostenibilidad.

- El año de proyección de la vía se toma hasta el año 2040.
- Para el gráfico de ciclo de vida se consideran las matrices de Markov mencionadas anteriormente y ponderadas para obtener el valor de ICF del conjunto de tramos analizados.

Para el análisis de costos se utiliza el programa PALATE 2.0 (Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021) el cual calcula los costos totales de construcción y mantenimiento con sus debidos precios unitarios. En este también se obtiene criterios medioambientales que reforzarán el argumento de sostenibilidad antes propuesto.

3.6.1. INVEST

Para cubrir el ciclo de vida completo del transporte, los criterios de INVEST se dividen en cuatro módulos: Planificación de sistemas para estados (SPS), Planificación de sistemas para regiones (SPR), Desarrollo de proyectos (PD) y Operaciones y mantenimiento (OM). (U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021)

El presente trabajo se centrará en el módulo de Operaciones y mantenimiento. El mismo que cuenta con 14 criterios enlistados a continuación:

- Plan interno de sostenibilidad
- Eficiencia y uso de la energía eléctrica
- Uso y Eficiencia de combustible vehicular
- Reducir, reutilizar y reciclar
- Gestión de la seguridad
- Sistema de seguimiento de compromisos ambientales
- Sistema de gestión de pavimentos
- Sistema de gestión de puentes
- Sistema de gestión de mantenimiento
- Conservación y mantenimiento de la infraestructura vial
- Mantenimiento de infraestructura de control de tránsito
- Programa de gestión del clima vial
- Gestión y operaciones de transporte
- Control de tránsito Zona de Trabajo

Estos criterios reúnen cierto puntaje determinado por el software online, mediante el uso de varias preguntas. En el caso de este proyecto se comparan dos alternativas: ambas alternativas se basan en realizar un mantenimiento principal estructural y uno periódico leve a nivel de la red vial para una proyección hasta el año 2040, la primera manteniendo una planificación básica y poco estructurada y la segunda alternativa que se propone en el presente trabajo muestra una planificación más eficiente y organizada para ser más sostenible, Así, en el tiempo se tendrá un deterioro controlado; de esta manera se mantendrá a la tejido vial en mejores condiciones y se reducirán los costos de intervención.

El software determina un puntaje según los criterios ingresados y genera una calificación, basándose en el siguiente rango:

- 63 puntos totales necesarios para Bronce
- 84 puntos totales necesarios para Plata
- 105 puntos totales necesarios para Gold
- 126 puntos totales necesarios para Platino

3.6.2. PaLATE

El programa SGI para Santa Isabel sugiere un tipo de mantenimiento para cada una de sus vías. Los mantenimientos más comunes en el centro urbano de Santa Isabel son: el cambio de la carpeta asfáltica como alternativa “1” y bacheo mayor como alternativa “2”, esta anula muchas de las fallas más comunes con severidad alta. Según el (Servicio Nacional de Contratación Pública (Sercop), 2008-2023), se tiene que los rubros estimados para su ejecución constan de los siguientes costos (ver Tabla 51):

*Tabla 51. Rubros para cambio de carpeta asfáltica y bacheo.
(Servicio Nacional de Contratación Pública (Sercop), 2008-2023)*

Código	Actividad	Costo unitario	Unidad
500069	Excavación manual en suelo sin clasificar	14.47	m ³
500255	Excavación mecánica en suelo, con retroexcavadora	3.12	m ³
503020	Cargado y desalojo de material con Volquete.(Dist.<5.00 km.)	3.24	m ³

500353	Transporte de materiales (mejoramiento, base granular)	0.32	m ³ -km
500385	Bacheo Menor con Base (hasta 20 m ²)(no incluye transporte de base)	63.6	m ³
500386	Bacheo Mayor con Base (mayor a 20 m ²)(no incluye transporte)	32.81	m ³
500022	Bacheo asfáltico (hasta 20 m ²), incluye mezcla asfáltica	279.37	m ³
503038	Bacheo asfáltico (mayor a 20 m ² y menor a 1000 m ²), incluye mezcla asfáltica	259.76	m ³
500287	Acabado de obra básica existente	0.53	m ²
503074	Base clase 1 tipo "B" d<1 1/2in, conformación y compactación (No incluye material)	6.52	m ³
503048	Base Clase 1. TIPO "B". D<1 1/2". (sin transporte), suministro de material	9.6	m ³
500088	Capa de rodadura de hormigón asfáltico mezclado en planta, e= 2in, suministro tendido y compactado	10.94	m ²
503040	Asfalto para imprimación RC-250, suministro y tendido.	1.39	lt
503058	Asfalto RC-250 Para Capa de Liga	1.04	lt
500030	Transporte de mezcla asfáltica, (medido después de compactación)	0.35	m ³ -km
500387	Corte y sellado de juntas con emulsión asfáltica	3.4	m
500388	Corte de asfalto	1.27	m

Por lo tanto, se ejemplifica un análisis de costos para un pavimento asfáltico de aproximadamente 1 Km donde se sugieren cantidades específicas para su tratamiento en obra. Estos rubros son esenciales y necesarios para el correcto cumplimiento del mismo. Así mismo, estas constan de dos procesos: bacheo mayor y cambio de carpeta asfáltica. El programa PaLATE propone un análisis de los costos en el ciclo de vida con aspectos de sostenibilidad y características medioambientales.

El análisis se realiza para la calle Rafael Galarza por ser una de las más transitadas e importantes para el cantón Santa Isabel; utilizando las dimensiones, volúmenes, anchos y espesores de la vía, para su respectiva resolución. También se toman las decisiones adecuadas según el estado actual de la vía a analizar.

Alternativa 1: Mantenimiento de Rehabilitación (cada 10 años) + M. Preventivos (cada año).

Alternativa 2: Mantenimiento de Recapeo (cada 5 años) + M. Correctivo (cada 2 años).

Estas alternativas se manejarán con criterio conforme el estado de la vía decaiga se seleccionarán los tratamientos convenientes para un deterioro controlado del pavimento.

CAPÍTULO 4 - MANUAL DEL PROGRAMA DE GESTIÓN

El diseño del programa de gestión vial muestra un SGI que está realizado con un lenguaje de programación Python 3.9.

En la Figura 15, se muestra la ventana de inicio del programa llamado “SGI Santa Isabel”, en donde se cuenta con las siguientes opciones: ingresar nuevo tramo, visualizar base de datos, toma de decisiones, análisis del costo de ciclo de vida y adicionalmente se tiene un botón que dirige a los mapas de Santa Isabel con los ID tramos, nombre de vías y tipo de pavimentos.

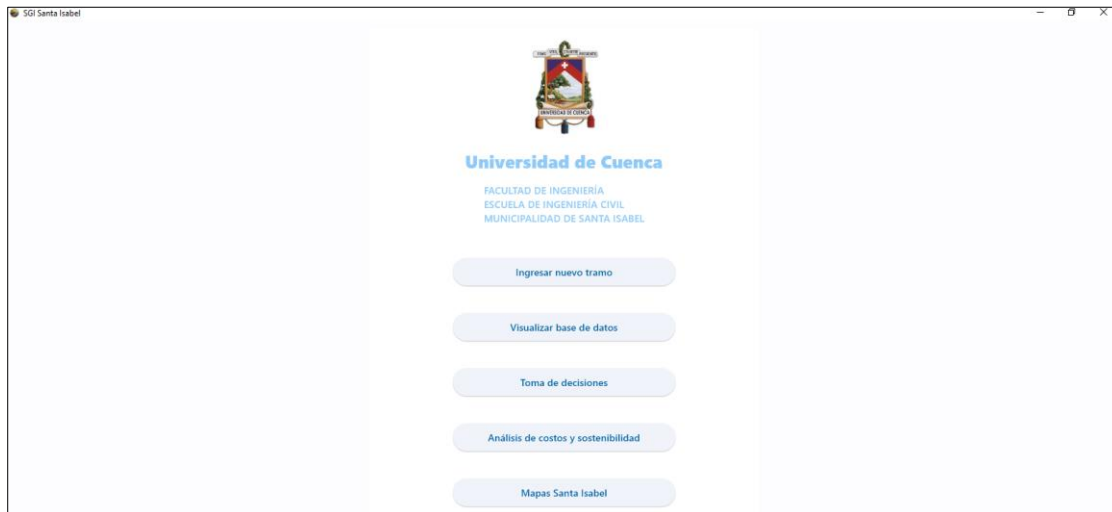


Figura 15. Menú principal del programa de gestión vial

4.1. ENTRADA DE DATOS

Al presionar el botón “Ingresar nuevo tramo”, el programa dirige a la siguiente ventana (Ver Figura 16). En donde se debe ingresar el nombre de la sección de vía que se desea evaluar,

por ejemplo: 2E-2F, el nombre de la vía y su área correspondiente. También, se debe seleccionar el tipo de pavimento de esa sección que puede ser adoquín, flexible o rígido. Dependiendo del tipo de pavimento se desplegará una lista de fallas, las mismas que podrán ser seleccionadas si el caso lo amerita para cada sección. Al momento de seleccionar cada falla se tendrá que identificar la severidad (alta, media o baja) y frecuencia (frecuente, ocasional o raro) de la misma. Se procede a presionar el botón calcular ICF para que el programa realice la evaluación y determine el ICF del tramo, este valor aparecerá en la parte superior derecha de la ventana.

Para poder guardar el nuevo tramo en la base de datos, el programa realiza la verificación de que el nombre de la sección se haya ingresado, de que para cada falla seleccionada se haya identificado la severidad y frecuencia. Finalmente, para que se habilite el botón de guardar tramo se debe primero calcular el ICF.

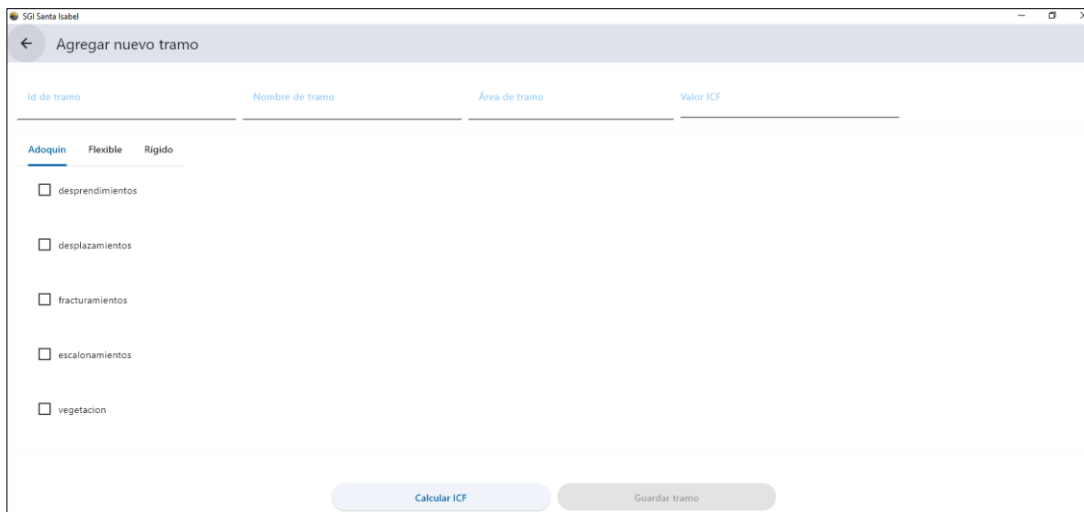


Figura 16. Ventana para agregar nuevo tramo

4.2. VISUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Al presionar el botón “Visualizar base de datos”, el programa dirige a la siguiente ventana (Ver Figura 17). En la parte superior izquierda se pueden filtrar los tramos por tipo de vía, es decir se puede seleccionar solo los tramos que correspondan al tipo de pavimento flexible, rígido, o adoquín. Además, junto a este se encuentra la opción para buscar por ID del tramo más específicamente.

Si por algún motivo se agregó un tramo incorrecto o se desea actualizar un tramo (ID o fallas), en esta parte se puede seleccionar los tramos y eliminarlos. Para luego dirigirse al botón “Ingresar nuevo tramo” y corregir cualquier error.

<input type="checkbox"/>	ID TRAMO	NOMBRE VIA	TIPO VIA	FLEXIBLE GRIETA LINEAL SEVERIDAD	FLEXIBLE GRIETA LINEAL FRECUENCIA	FLEXIBLE PIEL DE COCODRILO SEVERIDAD	FLEXIBLE PIEL DE COCODRILO FRECUENCIA	FLEX
<input type="checkbox"/>	11A-12A-13A	Alberto Gómez	flexible	media	ocasional	baja	frecuente	baja
<input type="checkbox"/>	1G2-1G3	Sin nombre	flexible	baja	frecuente	ninguna	ninguna	baja
<input type="checkbox"/>	10A-11A-13A	Av. Cañaribamba	flexible	media	frecuente	media	raro	baja
<input type="checkbox"/>	10A-18A	9 de octubre	flexible	baja	frecuente	baja	frecuente	medi
<input type="checkbox"/>	10A-30A	9 de octubre	flexible	alta	frecuente	alta	raro	medi
<input type="checkbox"/>	40A-41A	Sin Nombre	flexible	alta	frecuente	ninguna	ninguna	ning.
<input type="checkbox"/>	12A-40A	Lucio Gutierrez	flexible	baja	frecuente	baja	raro	medi
<input type="checkbox"/>	18A-7D	Amparito Tamariz	flexible	media	ocasional	ninguna	ninguna	baja
<input type="checkbox"/>	19A-21A	9 de octubre	flexible	media	raro	ninguna	ninguna	ning.
<input type="checkbox"/>	18A-19A-20A	9 de octubre	flexible	baja	frecuente	ninguna	ninguna	baja
<input type="checkbox"/>	1F-1G-1H	Rafael Galarza	flexible	media	frecuente	media	frecuente	alta
<input type="checkbox"/>	1A2-66A	Rafael Galarza	flexible	alta	raro	ninguna	ninguna	ning.
<input type="checkbox"/>	2D-3D	José Peralta	flexible	alta	frecuente	alta	ocasional	medi
<input type="checkbox"/>	2E-3E	Manabí	flexible	media	ocasional	baja	raro	medi
<input type="checkbox"/>	3F-3G-3H-4H-5H	Isauro Rodríguez	flexible	media	frecuente	media	frecuente	medi
<input type="checkbox"/>	1G1-4H	Isauro Rodríguez	flexible	alta	raro	ninguna	ninguna	ning.
<input type="checkbox"/>	2C-2D	Fidel Rosales	flexible	alta	raro	alta	raro	alta

Figura 17. Ventana para visualizar base de datos

4.3. TOMA DE DECISIONES

Al regresar al menú principal, tenemos una opción de “Toma de decisiones”, al abrir la misma el programa se dirige a una nueva ventana (Ver Figura 18). Como se puede observar esta ventana tiene 3 opciones nuevas. (Mantenimiento por fallas, Mantenimiento y Matrices de Markov)

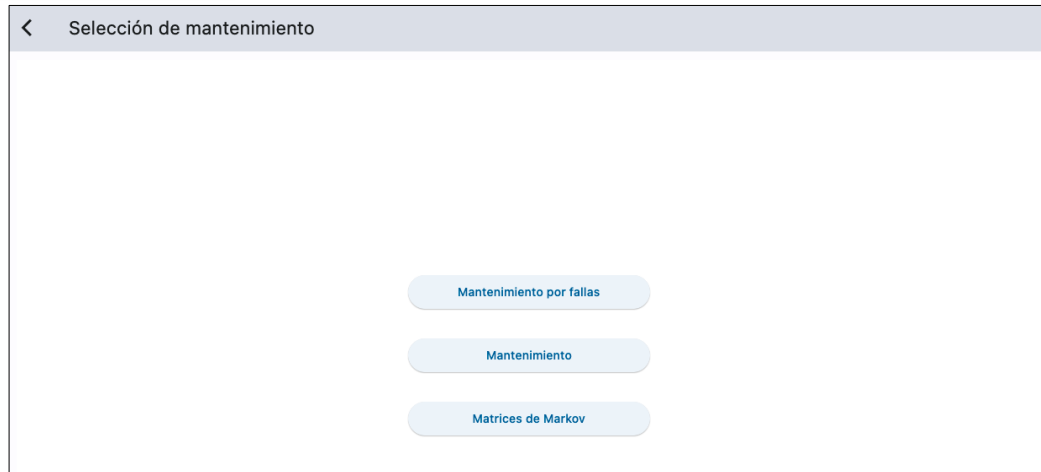


Figura 18. Ventana de toma de decisiones

4.3.1. Mantenimiento por falla

Al ingresar a la opción de “Mantenimiento por fallas”, el programa dirige a una nueva ventana (Ver Figura 19) donde se puede seleccionar el tramo a analizar, de esto se desplegarán la lista de fallas que ese tramo tiene. A continuación, se tiene la opción de elegir que fallas se quieren corregir y al seleccionarlás se obtendrán los mantenimientos específicos recomendados para esas fallas. Cabe recalcar que para la recomendación de esos mantenimientos se tomó en cuenta la severidad (alta, media, o baja) de cada falla. Todos los mantenimientos se pueden observar en la [sección 0](#) de este trabajo.

Mantenimiento por falla

Buscar por tipo de vía: Todo

Imprimir

<input type="checkbox"/>	id tramo	tipo vía	icf
<input type="checkbox"/>	11A-12A-13A	flexible	66.02
<input checked="" type="checkbox"/>	1G2-1G3	flexible	82.08
<input checked="" type="checkbox"/>	10A-11A-13A	flexible	73.62
<input type="checkbox"/>	10A-18A	flexible	66.89
<input type="checkbox"/>	10A-30A	flexible	60.32
<input type="checkbox"/>	40A-41A	flexible	80.99
<input type="checkbox"/>	12A-40A	flexible	59.78
<input type="checkbox"/>	18A-7D	flexible	86.47
<input type="checkbox"/>	19A-21A	flexible	91.81
<input type="checkbox"/>	18A-19A-20A	flexible	78.3
<input type="checkbox"/>	1F-1G-1H	flexible	41.15
<input type="checkbox"/>	1A2-66A	flexible	79.81
<input type="checkbox"/>	2D-3D	flexible	48.43
<input type="checkbox"/>	2E-3E	flexible	64.08
<input type="checkbox"/>	3F-3G-3H-4H-5H	flexible	47.78
<input type="checkbox"/>	1G1-4H	flexible	82.2
<input type="checkbox"/>	2C-2D	flexible	33.7

1G2-1G3

- grieta_lineal
- parcheo No se hace nada
- baches Sellado de grietas de ancho mayor que 3.0 mm
- peladura Sello superficial
- desprendimiento_de_agregado Tratamiento superficial
- ahuellamiento

10A-11A-13A

- grieta_lineal
- piel_de_cocodrilo Sellado de grietas
- parcheo Parcheo parcial o en toda la profundidad (Full D
- baches Sobrecarpeta
- peladura

Figura 19. Ventana de mantenimiento por falla

Por otra parte, se tiene la opción de imprimir, donde se generará un informe simplificado de los tramos analizados anteriormente con su respectivo tipo de vía, valor de ICF, y mantenimiento recomendado. Además, el informe presentará una media del valor del ICF por cada tipo de pavimento. (Ver Figura 20)



Resultado de evaluación



Nombre: _____ Provincia: _____
 Nombre vía: _____ Cantón: _____
 Orientación: _____ Parroquia: _____

id_tramo	tipo_via	icf	mantenimiento
1G2-1G3	flexible	82.08	Sellado de grietas de ancho mayor que 3.0 mm
1G2-1G3	flexible	82.08	Sello superficial
10A-11A-13A	flexible	73.82	Sellado de grietas
10A-11A-13A	flexible	73.82	Parqueo parcial o en toda la profundidad (Full Depth)
10A-11A-13A	flexible	73.82	Sobrecarpeta

Media

Pavimento adoquinado: 0

Pavimento flexible: 77.85

Pavimento rígido: 0

Firma: _____

Figura 20. Informe de resultados de mantenimiento

4.3.2. Mantenimientos

Al ingresar al botón “Mantenimiento”, el programa se dirige a la siguiente ventana (Ver Figura 21), en la cual se puede elegir tramos de tipo flexibles, rígidos y adoquinados. Al seleccionar cada tramo se despliega en la parte de alado una lista de 8 criterios técnicos para la toma de decisiones, explicados en la sección 0 en la Tabla 49 de este trabajo. Por último, el programa mostrara los tratamientos respectivos de acuerdo al tipo de mantenimiento y al tipo de pavimento (flexibles, rígido o adoquinado).

Por ejemplo, en la Figura 21, uno de los tramos elegidos es el 10A-11A-13A, luego se elegirá para cada uno de los 8 criterios las opciones mencionadas anteriormente. Si no se tiene datos de uno de los criterios requeridos, en la lista de opciones desplegable, hay una opción que muestra “Sin Datos”. Otra opción para no elegir “Sin Datos”, es dar un peso en la configuración de criterios (ver Figura 22) de cero; a los criterios de evaluación que no se

tenga información, y con ello dar un peso más significativo para aquellos que tengan información disponible.



Figura 21. Ventana para mantenimiento según criterios

A continuación, es obligatorio configurar las ponderaciones de cada criterio. Para esto, en el botón de configuración de criterios (Ver Figura 22), se tienen las ponderaciones por defecto de cada criterio, esto basándose en (Peñaloza & Calle, 2017). Por otro lado, se tiene la opción de modificar estos criterios y guardarlos como se indica en la Figura 23. Dependiendo del proyecto que el usuario se encuentre realizando, los datos que este consiga y lo que él considere más importante; asignará un peso, es decir un valor de 0 a 1, teniendo en cuenta que la suma de todos los ocho pesos que se pudieran asignar, no debe ser mayor a 1.

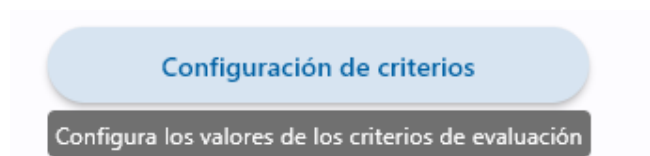


Figura 22. Botón para configuración de criterios

Figura 23. Valores por defecto de los 8 criterios

Luego de haber configurado las ponderaciones de los criterios y haber elegido las opciones para cada criterio, en la parte derecha se despliegan los tratamientos recomendados para ese tramo. En el caso de la Figura 24 se tienen las opciones de rehabilitación para el tramo de pavimento flexible. Todos los mantenimientos recomendados para el análisis del programa, se pueden observar en la [sección 0](#) de este trabajo.

Figura 24. Ejemplo de opciones de rehabilitación para un tramo

Luego se tiene la opción de imprimir los resultados de los tramos que se hayan analizado, al dar click en el botón imprimir aparece la ventana (Ver Figura 25) donde se puede elegir un nombre para el archivo pdf y guardarlo en la PC en el lugar que se requiera.

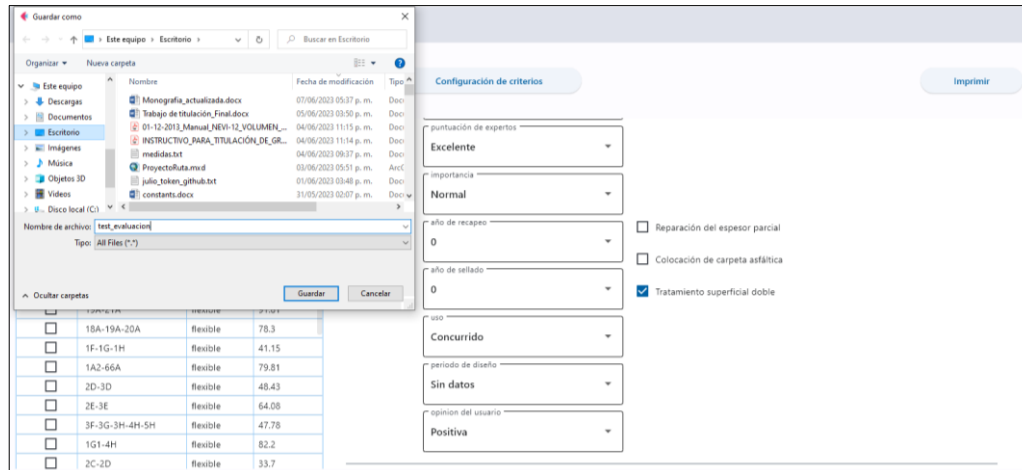


Figura 25. Ventana para guardar resultados de evaluación con pdf en la PC

La Figura 26 muestra el archivo pdf con el resultado de evaluación, datos informativos y un cálculo de la media de los ICF de los tramos agrupados por tipo de pavimento.



Resultado de evaluación



Nombre: _____ **Provincia:** _____
Nombre vía: _____ **Cantón:** _____
Orientación: _____ **Parroquia:** _____

ID TRAMO	TIPO VIA	ICF	TIPO DE MANTENIMIENTO	TRATAMIENTO
10A-11A-13A	flexible	73.62	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta
2D-3D	flexible	48.43	Rehabilitación	Mejoramiento de la base
2D-3D	flexible	48.43	Rehabilitación	Cambio de la carpeta asfáltica parcial

Media

Pavimento adoquinado: 0
Pavimento flexible: 61.03
Pavimento rígido: 0

Firma: _____

Figura 26. Archivo pdf de resultado de evaluación

El botón “Mantenimientos” sugiere el mantenimiento más propicio para los tramos de vía seleccionados. Según el tipo de mantenimiento se tendrá en cuenta para la proyección de las matrices de probabilidad y transición.

4.3.3. Matrices de Markov

Al ingresar en el botón de matrices de Markov se muestra la siguiente ventana (ver Figura 27), donde se pueden elegir varios tramos que representen una vía extensa, o de otro modo ciertos tramos que requieran el análisis de su evolución en el tiempo. Tal como se muestra a continuación al ir agregando diferentes tramos se muestra el área porcentual de los tramos agrupados por estado del pavimento (Excelente, Bueno, Regular, Pobre, Fallado). Para obtener estos porcentajes primero se agrupo a los tramos seleccionados por su ICF y se determina en qué estado del pavimento se encuentran. Luego con la suma del área total de los tramos seleccionados y la suma del área según las agrupaciones anteriores, se realiza una ponderación y se determina los porcentajes para cada estado de los tramos seleccionados. A continuación, se explicará cómo visualizar la evolución de la red vial aplicando las matrices de Markov.

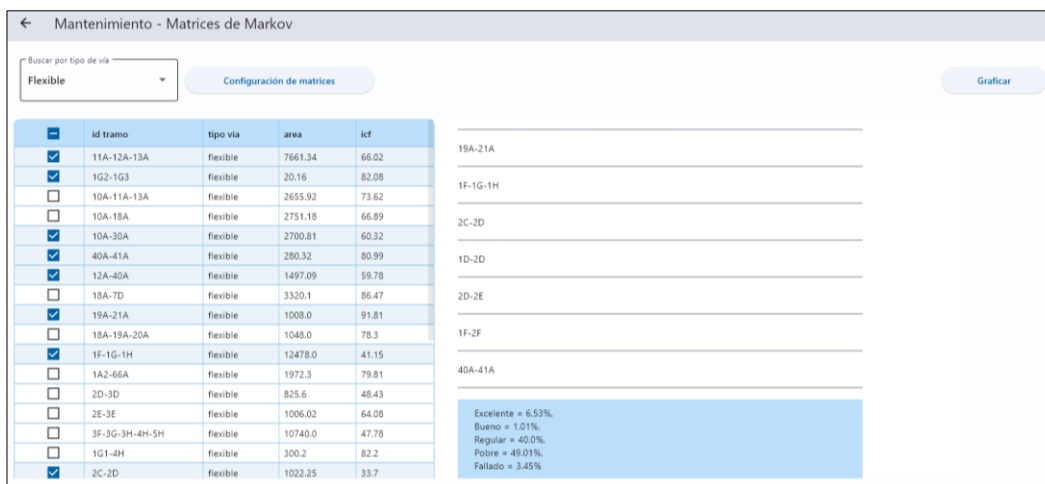


Figura 27. Ventana para aplicar matrices de Markov

Para poder graficar la evolución de la red vial, necesariamente se debe ingresar en el botón configuración de matrices (ver Figura 28).

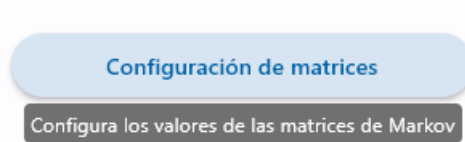


Figura 28. Botón para configurar los valores de las matrices de Markov

Al hacer esto el programa lleva al usuario a una ventana (ver Figura 29) en donde se encuentran las diferentes matrices, para los diferentes tipos de mantenimientos, que son: sin intervención, preventivo, correctivo, Recapeo/refuerzo, rehabilitación y reconstrucción.

El programa presenta estimaciones del deterioro para cada una de las matrices, los cuales se utilizan para generar las curvas de evolución del nivel de servicio según el tipo de mantenimiento que se esté llevando a cabo. Estos valores de las matrices fueron determinados por el investigador siguiendo un criterio que se basa en la forma en que evoluciona el deterioro. En términos generales, cuanto más deteriorada esté la vía, más rápido será el avance del deterioro y, como resultado, se reducirá el nivel de servicio.

 Una ventana de software con el título "Actualizar matriz". Encabezado con pestañas: "Sin intervención", "Preventivo", "Correctivo", "Recapeo", "Rehabilitación", "Reconstrucción". Una tabla de transición de estados con columnas "Estados", "Excelente", "Bueno", "Regular", "Pobre", "Fallado" y filas "Excelente", "Bueno", "Regular", "Pobre", "Fallado". Un botón "Editar" con un ícono de lápiz. Campos de entrada para "Año de inicio de proyección" (valor 2023) y "Años de proyección" (valor 30). Un botón "Salir" en la esquina inferior derecha.

Estados	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	85	6	5	3	1
Bueno	0	72	15	8	5
Regular	0	0	64	20	16
Pobre	0	0	0	50	50
Fallado	0	0	0	0	100

Figura 29. Ventana para elegir el mantenimiento y años de proyección

Las matrices tienen valores por defecto, sin embargo, estas se pueden editar al aplastar el botón "Editar", ahí se mostrará la matriz como tabla en formato de texto (ver Figura 30). Estos valores se pueden editar cada vez que se ingrese al botón tomar decisiones, ya que cuando se sale al menú principal; los valores volverán a ser los que están por defecto. Solo

se pueden ingresar números, ya que el programa no permite ingresar letras u otros caracteres distintos de un número. Además, se puede ingresar el año de inicio de la proyección y el número de años para la proyección de deterioros de la red vial. El mantenimiento propuesto del anterior botón de “Mantenimientos” es idóneo para elegir la matriz más pertinente.

The screenshot shows a web interface titled "Actualizar matriz". At the top, there are tabs for different maintenance types: "Sin intervención", "Preventivo", "Correctivo", "Recapeo", "Rehabilitación", and "Reconstrucción". Below the tabs is a table with a grid of values. The columns are labeled "Excelente", "Bueno", "Regular", "Pobre", and "Fallado". The rows are also labeled "Excelente", "Bueno", "Regular", "Pobre", and "Fallado". Below the table is a blue "Actualizar" button. At the bottom, there are two input fields: "Año de inicio de proyección" with the value "2023" and "Años de proyección" with the value "30". A green "Salir" button is located at the bottom right corner.

	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
Excelente	85	6	5	3	1
Bueno	0	72	15	8	5
Regular	0	0	64	20	16
Pobre	0	0	0	50	50
Fallado	0	0	0	0	100

Figura 30. Ventana para actualizar valores de matriz

Para entender a profundidad los valores porcentuales de cada matriz, revisar la [sección 0](#) de este trabajo.

Por último, al aplastar la opción graficar se tiene la siguiente ventana ([ver Figura 31](#)), con una tabla que muestra cuantitativamente la evolución de la red vial y también una gráfica con la proyección del estado de la red vial.

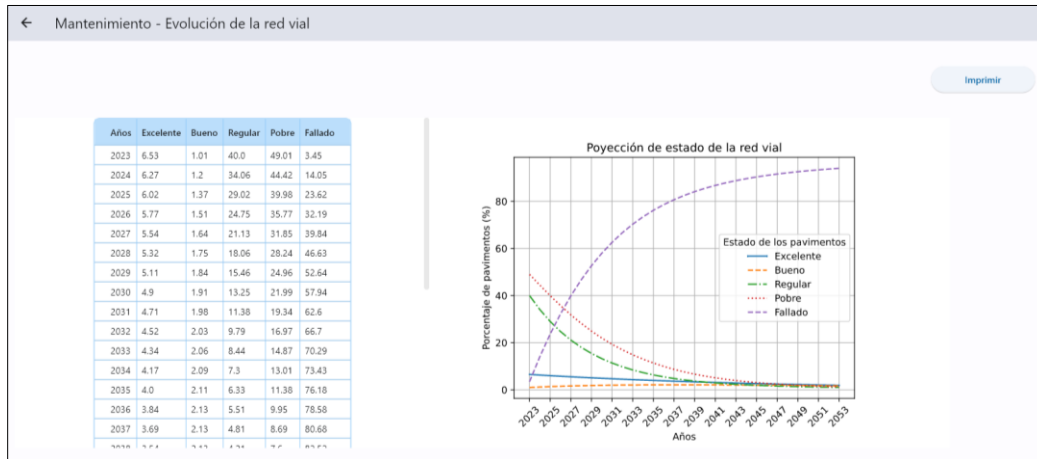


Figura 31. Ventana de evolución de la red vial

De igual manera, este se puede imprimir y se genera un archivo como el de la Figura 32, con los resultados de la evaluación, la tabla y gráfica de la proyección de estados de la red vial.

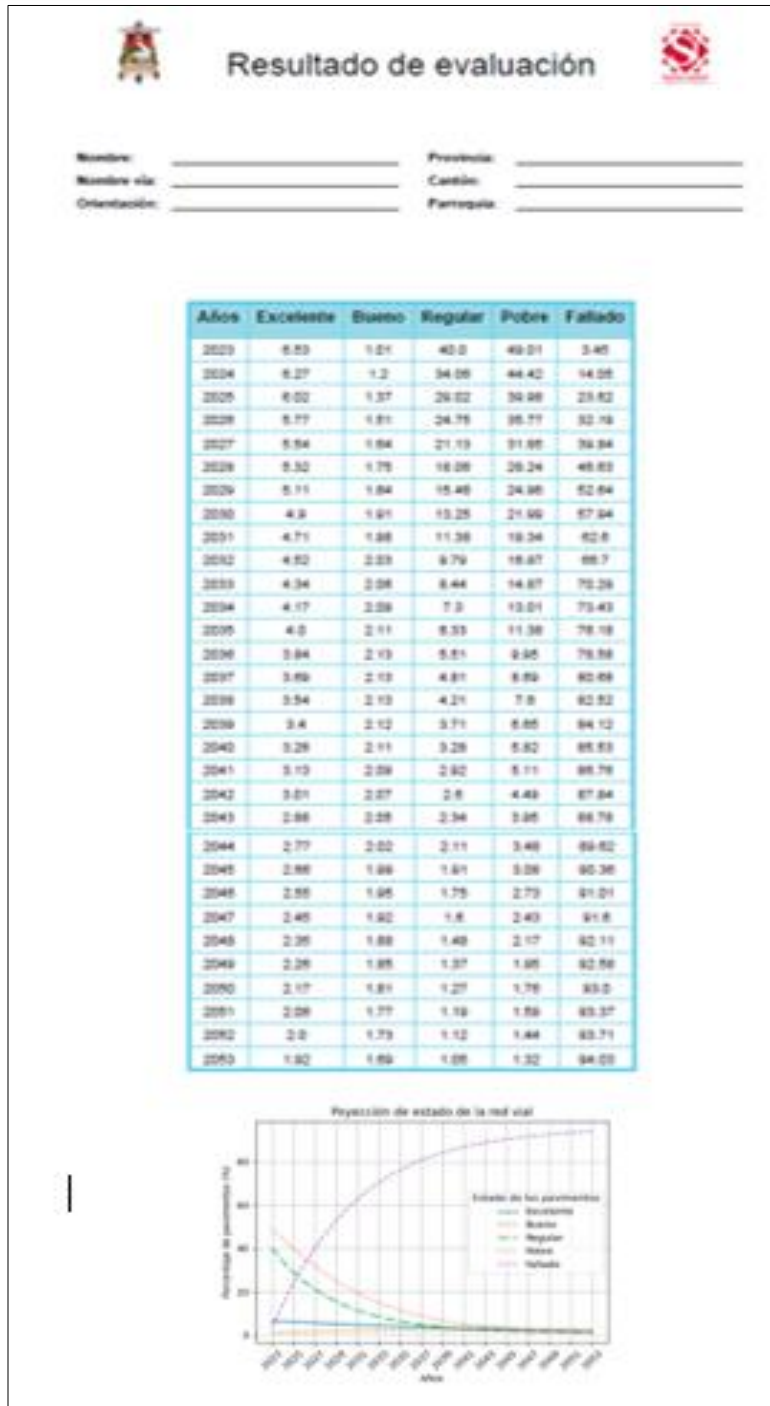


Figura 32. Archivo pdf de la evolución de la red vial

4.4. ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD

Al ingresar al botón de “Análisis de costos y sostenibilidad”, se tienen 2 botones adicionales. (ver Figura 33) Los dos botones “PaLATE” e “INVEST”, dirigen a una página web donde se pueden descargar los programas para su posterior análisis de costos y sostenibilidad como se explica en la sección 2.12

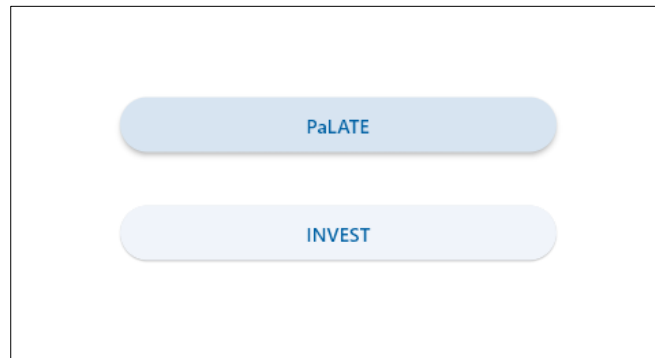


Figura 33. Botones para análisis del costo de ciclo de vida.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. RESULTADOS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO WINDSHIELD RESPECTO AL PCI

A continuación, la Tabla 52, Tabla 53, y Tabla 54; muestran los resultados obtenidos de condición del pavimento mediante el método Windshield y el PCI. Los resultados de los dos métodos para pavimentos flexibles y rígidos, presentan una desviación estándar de 1.7. Mientras que para adoquinados se tiene una desviación más alta de 1.9.

Tabla 52. Resultados de PCI y Windshield para pavimento flexible

TRAMO	Método PCI		Método Windshield		Error Absoluto	(Er- \bar{x}) ²
	PCI	Condición	ICF	Condición		
1B-1C	54	Regular	57	Pobre	3	2.25
1C-1D	68	Bueno	68	Regular	0	2.25
1D-1E	58	Bueno	58	Pobre	0	2.25
1E-1F	46	Regular	49	Fallado	3	2.25
Media (\bar{x})						1.5
Desviación						1.732

Tabla 53. Resultados de PCI y Windshield para pavimento rígido.

TRAMO	Método PCI		Método Windshield		Error Absoluto	(Er- \bar{x}) ²
	PCI	Condición	ICF	Condición		
1A-1B	64	Bueno	65	Bueno	1	0.56
1A -60A	54	Regular	50	Pobre	4	5.06
60A-62A	78	Muy Bueno	78	Regular	0	3.06
62A-63A	22	Fallado	24	Fallado	2	0.06
Media (\bar{x})						1.75

Desviación	1.708
-------------------	-------

Tabla 54. Resultados de PCI y Windshield para pavimento articulado.

TRAMO	Método Higuera		Método Windshield		Error Absoluto	(Er- \bar{x}) ²
	ICF	Condición	ICF	Condición		
2B-2C	42.1	Regular	47	Fallado	4.9	4.08
2C-3C	39	Malo	39	Fallado	0	8.29
2A-2B	59.5	Regular	55	Pobre	4.5	2.62
1B-2B	64	Regular	62	Regular	2	0.77
1C-2C1	59	Regular	62	Regular	3	0.01
					Media (\bar{x})	2.88
					Desviación	1.987

Las desviaciones estándar muestrales revelan un rango de dispersión baja entre los dos métodos, por lo tanto, entre los valores de PCI y Windshield existe una variación entre los resultados que es aceptable debido a su baja desviación. Esto demuestra una relación estable y confiable para la metodología aplicada.

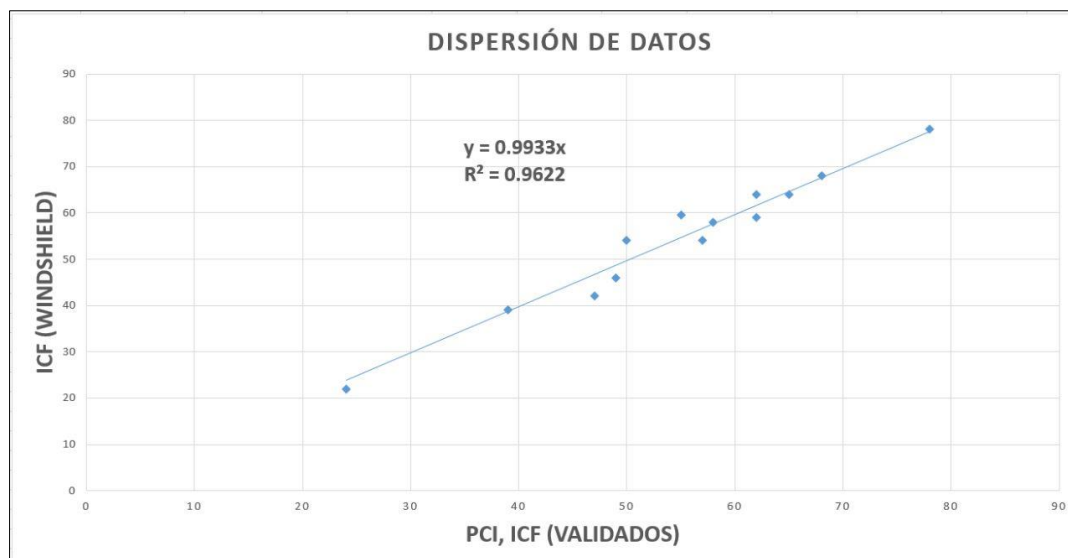


Figura 34. Dispersión de datos PCI vs ICF

En la Figura 34 se muestran los valores PCI con relación al ICF, estos datos de la validación se ajustan con el R^2 (Coeficiente de determinación del ajuste de datos) de 0.96, demostrando una buena fiabilidad porque su valor es cercano a 1.

5.2. RESULTADOS DEL SOFTWARE (ICF)

A continuación, en la Tabla 55, se presentan las 22 vías analizadas, cada una con su ID del tramo, su tipo de pavimento, y su respectivo ICF. Existen vías que tienen distintos pavimentos en cada tramo son: Rafael Galarza, Isauro Rodríguez, Euclides Gómez, Entrada en Fidel Rosales, y Av. Pasaje. El resto de vías presenta el mismo pavimento en todos los tramos que conforman la vía.

Tabla 55. Resultados de ICF por cada vía.

Nombre de la vía	ID tramo	Tipo de pavimento	ICF
Alberto Gómez	11A-12A	Flexible	66.02
Lucio Gutiérrez	12A-40A	Flexible	59.78
Sin nombre	1G2-1G3	Flexible	82.08
Av. Cañaribamba	10A-11A	Flexible	73.62
	11A-13A	Flexible	73.62
	1A-10A	Adoquín	51.58
9 de Octubre	10A-17A	Flexible	66.89
	17A-18A	Flexible	66.89
	10A-30A	Flexible	60.32
	19A-21A	Flexible	91.81
	18A-19A	Flexible	78.3
S181 (Sin Nombre)	40A-41A	Flexible	80.99
Amparito Tamariz	18A-7D	Flexible	86.47
La Cantera	19A-20A	Flexible	78.3
Rafael Galarza	1F-1G	Flexible	41.15
	1G-1G1	Flexible	82.2

	1E-1F	Flexible	49.07
	1D-1E	Flexible	53.97
	1C-1D	Flexible	68.11
	1B-1C	Flexible	57.46
	1A2-66A	Rígido	79.81
	1A-1B	Rígido	75.91
Isauro Rodríguez	1G-1G1	Flexible	82.21
	1G1-1H	Flexible	82.21
	1G1-4H	Flexible	82.2
	3F-3G	Flexible	47.78
	3G-3H	Flexible	47.78
	3H-4H	Flexible	47.78
	4H-5H	Flexible	47.78
	1A-2A	Adoquín	71.17
Euclides Gómez	1A1-1A2	Rígido	84.1
	1A2-66A	Flexible	79.81
José Peralta	2D-3D	Flexible	48.43
	1D-2D	Flexible	37.1
Manabí	2E-3E	Flexible	64.08
	1E-1E_1	Flexible	64.78
	1E_1-2E	Flexible	64.78
Fidel Rosales	2C-2D	Flexible	33.7
	2D-2E	Flexible	94.95
	2E-2F	Flexible	64.55
	2F-3G	Flexible	36.51
César Astudillo	1F-2F	Flexible	50.87
Entrada en Fidel Rosales	2E1-2E2	Flexible	91.1a
	2D1-2D2	Rígido	68.38
	2G-2G_1	Rígido	69.65
Av. Pasaje	1A-60A	Rígido	49.72
	60A-62A	Rígido	67.31
	62A-63A	Rígido	30.06

	63A-66A	Rígido	49.9
	1A-2A	Adoquín	71.17
Zamora Chinchipe	10A-40A	Adoquín	93.71
	40A-50A	Adoquín	93.71
3 de Noviembre	2A-2B	Adoquín	55.49
	2B-2C	Adoquín	62.58
Sucre	1B-2B	Adoquín	59.35
24 de Mayo	2C-3C	Adoquín	38.92
	1C-2C	Adoquín	79.64
Entrada en Manabí	1E_1-	Adoquín	52.13
	1E_2		

Se obtiene que las vías que tienen distintos pavimentos en cada tramo son: Rafael Galarza, Isauro Rodríguez, Euclides Gómez, Entrada en Fidel Rosales, y Av. Pasaje. El resto de vías presenta el mismo pavimento en todos los tramos que conforman la vía. Por lo que se concluye que la mayoría de vías de la red del cantón presentan el mismo tipo de pavimento en todos los tramos que la conforman.

5.3. RESULTADOS DE TIPOS DE MANTENIMIENTOS Y TRATAMIENTOS QUE DETERMINA EL PROGRAMA.

En la Tabla 56, se tiene un resumen con datos informativos de la calle Rafael Galarza. Se ha tomado ésta como una de las vías de mayor importancia, por conectar la entrada-salida del cantón con otros sectores. Además, es una de las más concurridas por conectar varias escuelas, colegios y al centro urbano del cantón.

La vía mencionada presenta un valor promedio de ICF de 63 aproximadamente, lo cual significa que la vía se encuentra en un estado Regular. Más a profundidad, se obtuvo que 3 tramos que la contienen están en estado Pobre, 1 tramo en estado fallado, 3 tramos en buen estado, y 1 tramo en estado regular. Los tramos que se encuentran al Norte del cantón; es decir más cerca del parque central, se encuentran en peor estado. Además, se obtuvo que para esta vía la mitad de los tramos que la contienen; siendo estos de tipo flexible; necesitan un mantenimiento de rehabilitación y se recomiendan como tratamientos: El fresado y sobrecarpeta, como también se podría realizar un cambio de carpeta asfáltica. Para los tramos de pavimento rígido se recomienda sello superficial de grietas, sello de juntas, bacheo mayor o también un cambio de losa.

Tabla 56. Mantenimientos para la calle Rafael Galarza

Nombre de la vía	ID Tramo	Tipo de mantenimiento	Tratamientos recomendados					
Rafael Galarza	1F-1G-1H	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	1G-1G1-4H	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
	1E-1F	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	1D-1E	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de				

				carpeta asfáltica				
	1C-1D	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	1B-1C	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	1A2-66A	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		
	1A-1B	Recapeo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		

En la **Tabla 57**, se presentan los tratamientos recomendados para cada una de las 21 vías analizadas de la red del cantón; con lo que se obtiene que un 4.8% necesita un mantenimiento preventivo, el 14.3% un mantenimiento correctivo, el 33.3% un recapeo, el 38.1% una rehabilitación y 9.5% una reconstrucción.

Tabla 57. Mantenimientos recomendados para toda la red vial

Nombre de la vía	ID Tramo	Tipo de mantenimiento	Tratamientos recomendados					
Alberto Gómez	11A-12A-13A	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
Lucio Gutiérrez	12A-40A	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
Sin nombre	1G2-1G3	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche

S181 (Sin Nombre)	40A-41A	Recapeo	Reparación del espesor parcial	Colocación de carpeta asfáltica	Tratamiento superficial doble			
Amparito Tamariz	18A-7D	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
La Cantera	19A-20A	Recapeo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		
César Astudillo	1F-2F	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
Sucre	1B-2B	Recapeo	Reanudado de la superficie	Cambio de adoquines				
Entrada en Manabí	1E_1-1E_2	Rehabilitación	Readoquina do parcial	Reposición del material de la capa	Readoquinado total			
Av. Cañaribamba	10A-11A	Recapeo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		
	11A-13A	Recapeo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		
	1A-10A	Rehabilitación	Readoquina do parcial	Reposición del material de la capa	Readoquinado total			
9 de Octubre	10A-17A	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	17A-18A	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	10A-30A	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	19A-21A	Preventivo	Limpieza de cunetas	Chapeo de montes	Bacheo parcial			

	18A-19A	Recapeo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa		
Isauro Rodríguez	1G-1G1	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
	1G1-1H	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
	1G1-4H	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de asfáltico	Tratamiento superficial	Bacheo mayor	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
	3F-3G	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	3G-3H	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	3H-4H	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	4H-5H	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	1A-2A	Correctivo	Reacomodo del adoquinado	Reemplazo menor de adoquines	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas		
Euclides Gómez	1A1-1A2	Correctivo	Sello superficial de grietas	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas	Bacheo mayor o cambio de losa	Reparación del espesor dañado	Sustitución del parche
	1A2-66A	Recapeo	Reparación del espesor parcial	Colocación de carpeta asfáltica	Tratamiento superficial doble			
José Peralta	2D-3D	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta				

				asfáltica parcial				
	1D-2D	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
Manabí	2E-3E	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	1E-1E_1	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	1E_1-2E	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
Fidel Rosales	2C-2D	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
	2D-2E	Preventivo	Limpieza de cunetas	Chapeo de montes	Bacheo parcial			
	2E-2F	Rehabilitación	Fresado y sobrecarpeta	Cambio de carpeta asfáltica				
	2F-3G	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de la carpeta asfáltica parcial				
Entrada en Fidel Rosales	2E1-2E2	Preventivo	Limpieza de cunetas	Chapeo de montes	Bacheo parcial			
	2D1-2D2	Rehabilitación	Reparación de todo el espesor	Colocación de barras de transferencia de carga	Sobrecarpeta			
	2G-2G_1	Recapeo	Reanudado de la superficie o sobrecarpeta	Reemplazo de losa por mezcla asfáltica	Reposición de losa de hormigón			
Av. Pasaje	1A-60A	Rehabilitación	Reparación de todo el espesor	Colocación de barras de	Sobrecarpeta			

				transferencia de carga				
	60A-62A	Rehabilitación	Reparación de todo el espesor	Colocación de barras de transferencia de carga	Sobrecarpeta			
	62A-63A	Reconstrucción	Mejoramiento de la base	Cambio de carpeta asfáltica parcial	Cambio de carpeta asfáltica total			
	63A-66A	Rehabilitación	Reparación de todo el espesor	Colocación de barras de transferencia de carga	Sobrecarpeta			
	1A-2A	Correctivo	Reacomodo del adoquinado	Reemplazo menor de adoquines	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas		
Zamora Chinchipe	10A-40A	Preventivo	Limpieza de cunetas	Limpieza de montes	Corte de ramas			
	40A-50A	Preventivo	Limpieza de cunetas	Limpieza de montes	Corte de ramas			
3 de Noviembre	2A-2B	Rehabilitación	Readoquinado parcial	Reposición del material de la capa	Readoquinado total			
	2B-2C	Rehabilitación	Readoquinado parcial	Reposición del material de la capa	Readoquinado total			
24 de Mayo	2C-3C	Reconstrucción	Cambio de cama de arena	Mejoramiento de la base	Readoquinado total			
	1C-2C	Correctivo	Reacomodo del adoquinado	Reemplazo menor de adoquines	Sello de juntas	Reconstrucción de juntas		

5.4. RESULTADOS DE LA EVOLUCIÓN DE LA RED VIAL, USANDO MATRICES DE MARKOV.

- Pavimentos flexibles

Para los pavimentos flexibles se tiene los siguientes resultados de todas las vías analizadas (ver Figura 35):

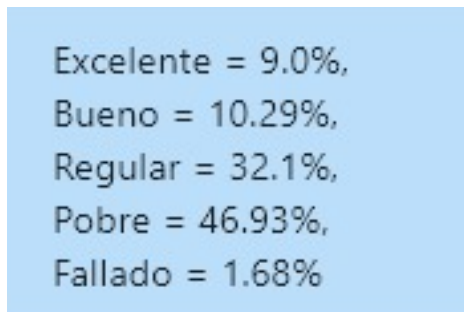


Figura 35. Estado de red vial en pavimentos flexibles.

Al pavimento flexible de la zona se puede dar cualquier mantenimiento mencionado, pero por su condición se debe buscar el más apropiado para su futuro. Por lo cual, dicta que el estado de los pavimentos flexibles le corresponde un mantenimiento de Rehabilitación en la mayor parte del conjunto de pavimento asfáltico para el cantón de Santa Isabel. Realizando este tratamiento para una proyección de 10 años se obtiene lo siguiente en la Figura 36:

Años	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
2023	9.0	10.29	32.1	46.93	1.68
2024	22.6	9.23	24.99	29.23	13.95
2025	34.22	8.79	19.71	18.76	18.52
2026	43.74	8.8	15.83	12.46	19.17
2027	51.3	9.1	13.01	8.61	17.97
2028	57.16	9.59	11.0	6.22	16.02
2029	61.62	10.18	9.59	4.71	13.9
2030	64.93	10.8	8.62	3.75	11.89
2031	67.35	11.41	7.98	3.14	10.12
2032	69.08	11.98	7.57	2.76	8.61
2033	70.28	12.5	7.33	2.51	7.38

Figura 36. Estado de red vial en pavimentos flexibles con porcentajes (10 años)

Es decir en la Figura 37 se puede observar, que para el año 2033 realizando el mantenimiento sugerido para el pavimento de tipo asfáltico se obtendrá una mejora de la su red vial en un 70.3% en estado Excelente, 12.5% en Bueno, 7.33% en Regular, 2.51% en Pobre y 7.38% en Fallado.

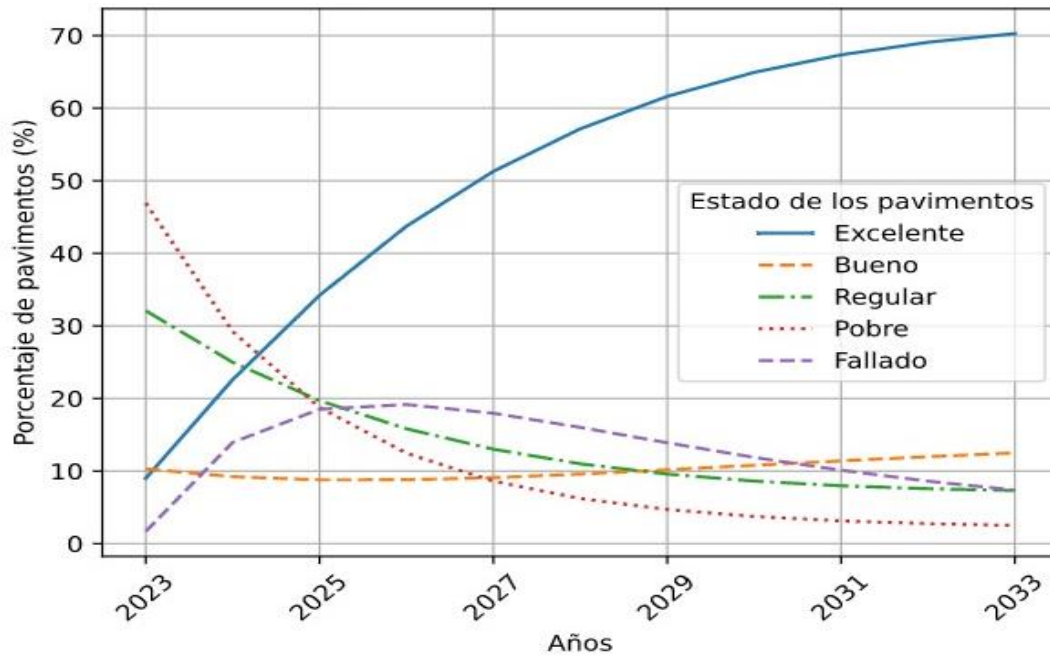


Figura 37. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos flexibles.

Cabe recalcar que, si bien es posible realizar el siguiente mantenimiento de reconstrucción obteniendo un porcentaje mayor al 70,3% de las vías en estado Excelente, esto no es lo ideal ya que los trabajos para este mantenimiento deben ser mayores e involucran una mayor inversión y uso de recursos.

- **Pavimentos rígidos**

Para los pavimentos rígidos se tiene los siguientes resultados de todas las vías de analizadas (ver la Figura 38):

Excelente = 0%,
 Bueno = 23.93%,
 Regular = 30.96%,
 Pobre = 37.93%,
 Fallado = 7.18%

Figura 38. Estado de red vial en pavimentos rígidos.

En el pavimento rígido, según su condición del pavimento le corresponde un mantenimiento de Rehabilitación en la mayor parte del conjunto de pavimento de hormigón para el cantón de Santa Isabel. Realizando este tratamiento para una proyección de 10 años se consigue lo siguiente (Ver Figura 39):

Años	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
2023	0.0	23.93	30.96	37.93	7.18
2024	14.87	19.76	25.13	24.44	15.8
2025	27.45	16.91	20.58	16.35	18.71
2026	37.78	15.03	17.06	11.39	18.74
2027	46.06	13.88	14.38	8.27	17.41
2028	52.59	13.23	12.35	6.26	15.56
2029	57.66	12.94	10.85	4.95	13.61
2030	61.55	12.87	9.75	4.06	11.77
2031	64.49	12.96	8.96	3.47	10.13
2032	66.68	13.12	8.4	3.06	8.74
2033	68.3	13.33	8.02	2.79	7.57

Figura 39. Estado de red vial en pavimentos rígidos con porcentajes (10 años)

Por lo tanto, en la Figura 40 se puede observar que para el año 2033 realizando el mantenimiento sugerido para el pavimento rígido se obtendrá una mejora de la su red vial en un 68.3% en estado Excelente, 13.3% en Bueno, 8.0% en Regular, 2.79% en Pobre y 7.57% en Fallado.

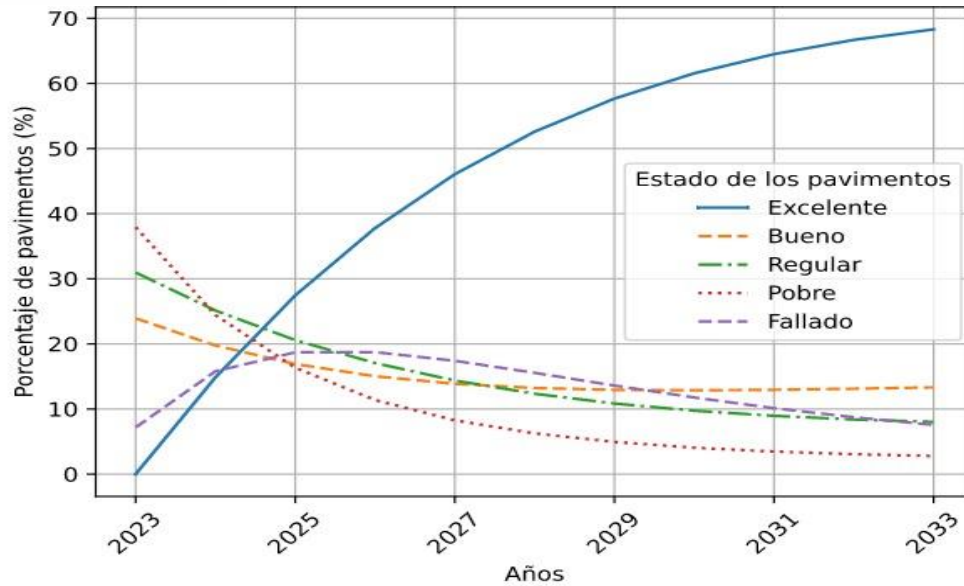


Figura 40. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos rígidos.

- Pavimentos Adoquinados

En los pavimentos articulados según Windshield muestra la condición general de sus vías adoquinadas (ver Figura 41):

Excelente = 28.96%,
 Bueno = 14.14%,
 Regular = 19.51%,
 Pobre = 37.39%,
 Fallado = 0%

Figura 41. Estado de red vial en pavimentos adoquinados

En el pavimento adoquinado, por la condición del pavimento le corresponde también un mantenimiento de Rehabilitación en la mayor parte del conjunto de tramos del centro urbano de Santa Isabel. Realizando este tratamiento para una proyección de 10 años se obtiene lo siguiente (ver Figura 42):

Años	Excelente	Bueno	Regular	Pobre	Fallado
2023	28.96	14.14	19.51	37.39	0.0
2024	38.36	12.86	16.05	22.8	9.93
2025	46.37	12.14	13.45	14.4	13.63
2026	52.9	11.84	11.52	9.51	14.23
2027	58.05	11.82	10.12	6.62	13.39
2028	62.02	11.98	9.12	4.89	12.0
2029	65.0	12.24	8.41	3.84	10.5
2030	67.21	12.56	7.94	3.2	9.09
2031	68.81	12.9	7.63	2.8	7.85
2032	69.95	13.22	7.44	2.56	6.82
2033	70.74	13.53	7.34	2.42	5.98

Figura 42. Estado de red vial en pavimentos adoquinados con porcentajes (10 años)

Luego, en la Figura 43, se observa que para el año 2033 realizando el mantenimiento sugerido para el pavimento de tipo articulado se obtendrá una mejora de la su red vial en un 70.7% en estado Excelente, 13.5% en Bueno, 7.3% en Regular, 2.42% en Pobre y 5.98% en Fallado.

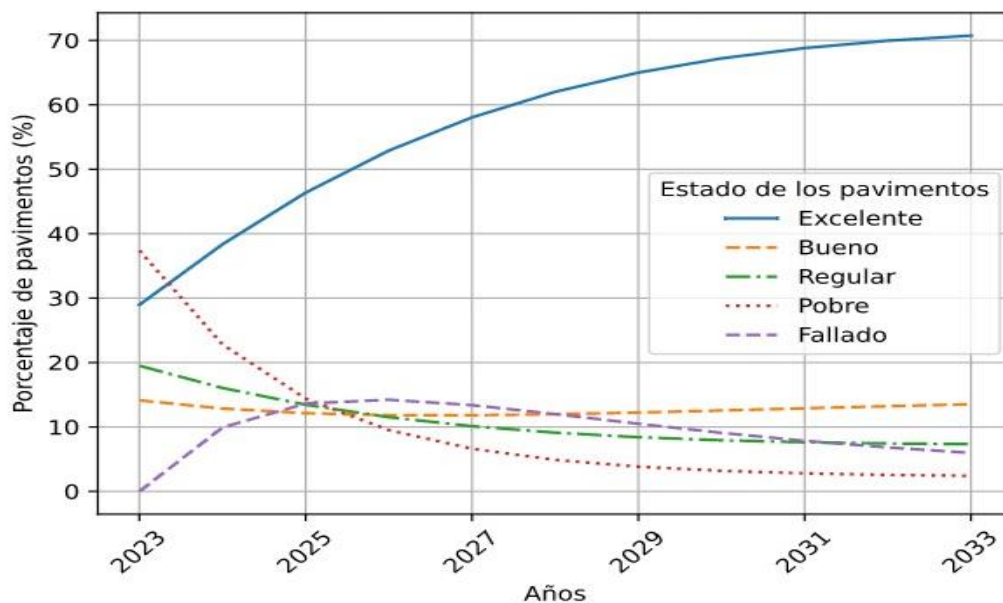


Figura 43. Gráfica de proyección de estado de red vial en pavimentos adoquinados.

- Red Vial General

En la Figura 44, se puede observar el estado general de la red vial del centro urbano de Santa Isabel con un porcentaje de 84% de pavimentos asfálticos, 11% de pavimento rígido y 5% de pavimentos articulados exponiendo las siguientes condiciones:

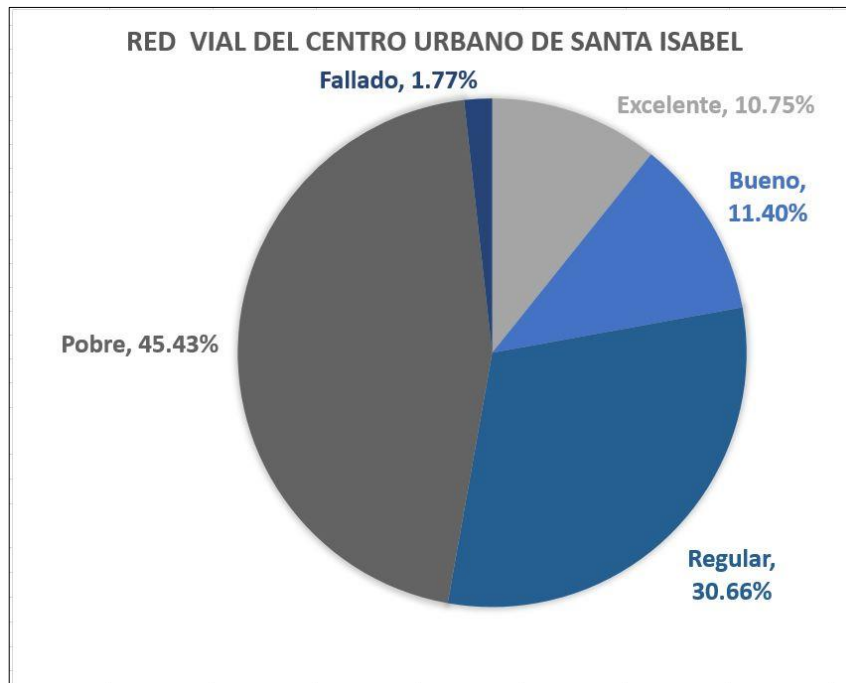


Figura 44. Gráfica de pastel del estado de la red vial total

Se corrobora que el estado general de la vía es Pobre y Regular en su gran mayoría, por lo tanto, se deben realizar los mantenimientos sugeridos según su tipo de pavimento para que en los años futuros se obtenga un aumento de más del 50% de la red vial en un Excelente Estado.

5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COSTOS Y SOSTENIBILIDAD

5.5.1. RESULTADOS DE INVEST

En la Figura 45, se puede observar que la alternativa 1, muestra un puntaje de 46. Mientras que en la Figura 46, se tiene un puntaje más alto de 68, llegando a una clasificación de Bronce.

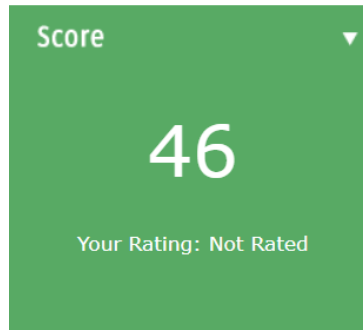


Figura 45. Resultado en INVEST de alternativa 1.
(U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021)



Figura 46. Resultado en INVEST de alternativa 2.
(U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021)

La alternativa 2 alcanza un puntaje más alto con respecto a la alternativa 1, es decir logra una insignia de sostenibilidad tipo bronce; ya que toma en cuenta criterios que mejoran el desarrollo de operaciones y mantenimiento para la municipalidad de Santa Isabel. Los parámetros propuestos por (U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration , 2021) para mejorar la sostenibilidad del proyecto son:

- Un plan integral de sostenibilidad interna que incluye objetivos, métricas de desempeño, objetivos cuantificables, estrategias y acciones.
- Monitoreo y seguimiento que propone un cronograma de medición de desempeño.
- Tomar medidas relacionadas con la puntualidad del proyecto de las actividades de rehabilitación, conservación y mantenimiento; monitoreando el progreso hacia los objetivos durante al menos un año después del establecimiento del objetivo.

- Tiene especificaciones estándar para al menos una solución de pavimento sostenible y requiere la consideración de pavimentos sostenibles como primera solución.
- Se tiene un sistema de gestión que incluye, como mínimo la planificación, programación y elaboración de presupuestos, gestión de recursos, monitoreo y evaluación, soporte y administración de mantenimiento, incluido el procesamiento y seguimiento de permisos.
- El sistema de gestión se vincula con agencias externas para vincular los proyectos de reparación, conservación y mantenimiento de pavimentos con las necesidades de mantenimiento adyacentes.
- Relaciona el mantenimiento vial con el desempeño vial, y comprender las condiciones de mantenimiento, establece prioridades y documenta la relación entre costos y resultados.

A continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan las diferencias entre las dos alternativas analizadas en INVEST, la alternativa 1 considera muy pocos aspectos de sostenibilidad respecto a la alternativa 2.

Tabla 58. Diferencias entre alternativas probadas en INVEST

Alternativa 1	Alternativa 2
La agencia está probando soluciones de pavimento sustentables.	La agencia tiene especificaciones estándar o disposiciones especiales específicas para al menos una solución de pavimento sostenible y requiere la consideración de pavimentos sostenibles como una primera solución.
El plan integral de sostenibilidad no cuenta con estrategias y acciones a futuro.	Un plan integral de sostenibilidad interna que incluye objetivos, métricas de desempeño, objetivos cuantificables, estrategias y acciones.
No se mide el desempeño, ni se realiza monitoreo y seguimiento	Monitoreo y seguimiento que propone un cronograma de medición de desempeño.

<p>Las actividades de rehabilitación, conservación y mantenimiento no se cumplen con puntualidad.</p>	<p>Se tienen medidas relacionadas con la puntualidad del proyecto de las actividades de rehabilitación, conservación y mantenimiento; monitoreando el progreso hacia los objetivos durante al menos un año después del establecimiento del objetivo.</p>
<p>Tiene especificaciones estándar para al menos una solución de pavimento, sin embargo no hace consideraciones de pavimentos sostenibles.</p>	<p>Tiene especificaciones estándar para al menos una solución de pavimento sostenible y requiere la consideración de pavimentos sostenibles como primera solución.</p>
<p>No se tiene un sistema de gestión que incluye planificación, programación y elaboración de presupuestos, gestión de recursos, monitoreo y evaluación, soporte y administración de mantenimiento, incluido el procesamiento y seguimiento de permisos.</p>	<p>Se tiene un sistema de gestión que incluye, como mínimo la planificación, programación y elaboración de presupuestos, gestión de recursos, monitoreo y evaluación, soporte y administración de mantenimiento, incluido el procesamiento y seguimiento de permisos.</p>
<p>El sistema de gestión no está vinculado con agencias externas para vincular los proyectos de reparación, conservación y mantenimiento de pavimentos.</p>	<p>El sistema de gestión se vincula con agencias externas para vincular los proyectos de reparación, conservación y mantenimiento de pavimentos con las necesidades de mantenimiento adyacentes.</p>
<p>No se analizan costos y resultados, ni se relaciona el mantenimiento vial con el desempeño vial.</p>	<p>Relaciona el mantenimiento vial con el desempeño vial, y comprende las condiciones de mantenimiento, establece prioridades y documenta la relación entre costos y resultados.</p>

Para observar más a detalle los criterios dirigirse a la sección de [A](#), en el ANEXO E.

5.5.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Al mostrar la red vial en su mayoría un estado Regular a Pobre, para ambas alternativas se selecciona un Mantenimiento fuerte, es decir, que mejore el estado estructural del pavimento y también se adiciona mantenimientos pequeños que mantengan su estado funcional y de rodamiento.

Con el programa a utilizar se obtienen los siguientes resultados dado que se aplique un mantenimiento de Rehabilitación su estado para el próximo año será Excelente mientras que para un Recapeo Parcial el estado del pavimento caerá en un estado Muy Bueno. De ahí que, utilizando las matrices de Markov según sea preventivo, correctivo o sin intervención se exponen los resultados correspondientes:

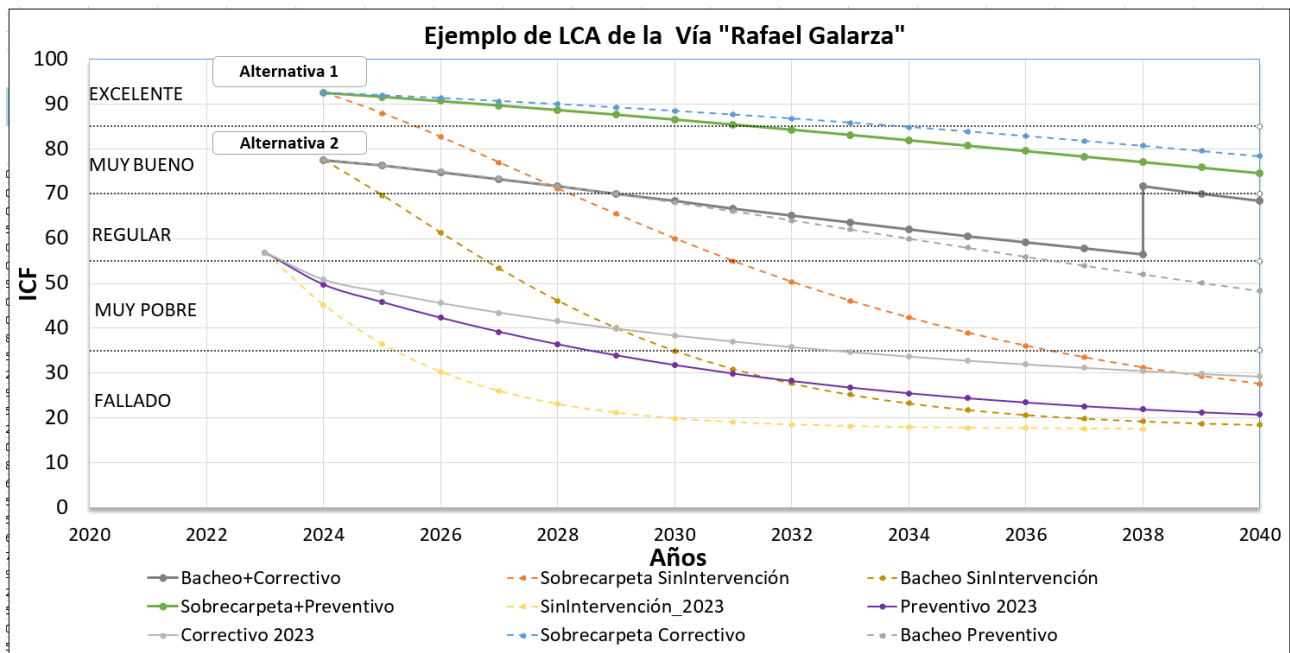


Figura 47. Ejemplo de LCA de la vía "Rafael Galarza"

En la Figura 47, se pueden observar las posibles opciones a tratar en el pavimento. Existen muchas variaciones que se pueden realizar en los pavimentos con Markov. Ahora, el estado actual de la vía en 2023 es Regular. Si no se realiza ninguna intervención o no se le da un mantenimiento correctivo o preventivo su estado seguirá empeorando.

Para la alternativa 1, desde 2024 luego de un cambio de la carpeta asfáltica, los mantenimientos preventivos anuales mantienen un nivel aceptable y en 2040 el estado del pavimento será Muy Bueno.

Para la alternativa 2, desde 2024 los mantenimientos correctivos cada 2 años consiguen un deterioro que disminuye el estado del pavimento lentamente llegando a un estado regular y muy pobre antes de 2040. Por lo tanto, es necesario adicionar un mantenimiento de bacheo mayor para aumentar la vida útil del pavimento.

5.5.3. ANALISIS DE COSTOS DE CICLO DE VIDA

Utilizando el software PaLATE se obtienen los siguientes resultados:

Alternativa 1: Mantenimiento de Rehabilitación + Mantenimientos Preventivos.

En la Figura 48, se muestra la alternativa 1 la cual arroja los resultados y los costos que puede tener el cambio de una carpeta asfáltica para un pequeño tramo de vía de la Rafael Galarza, este tratamiento señala un mantenimiento de rehabilitación la cual es la intervención correspondiente ya que el estado de la condición del pavimento es Regular y se toma como el inicio de la construcción. Para los mantenimientos preventivos se toman a lo largo del tiempo.

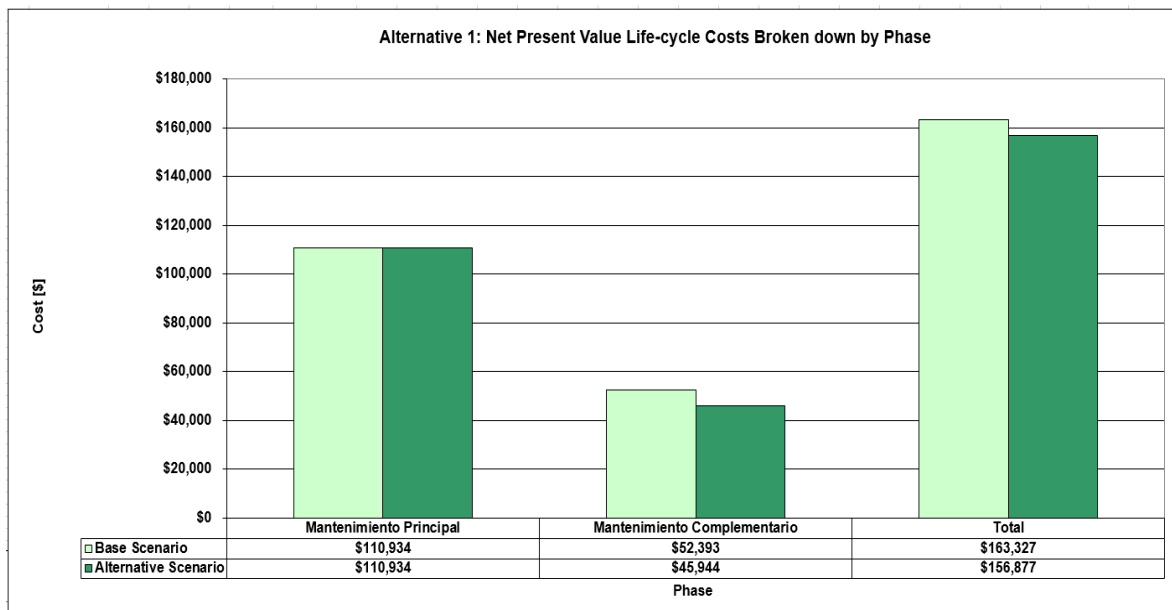
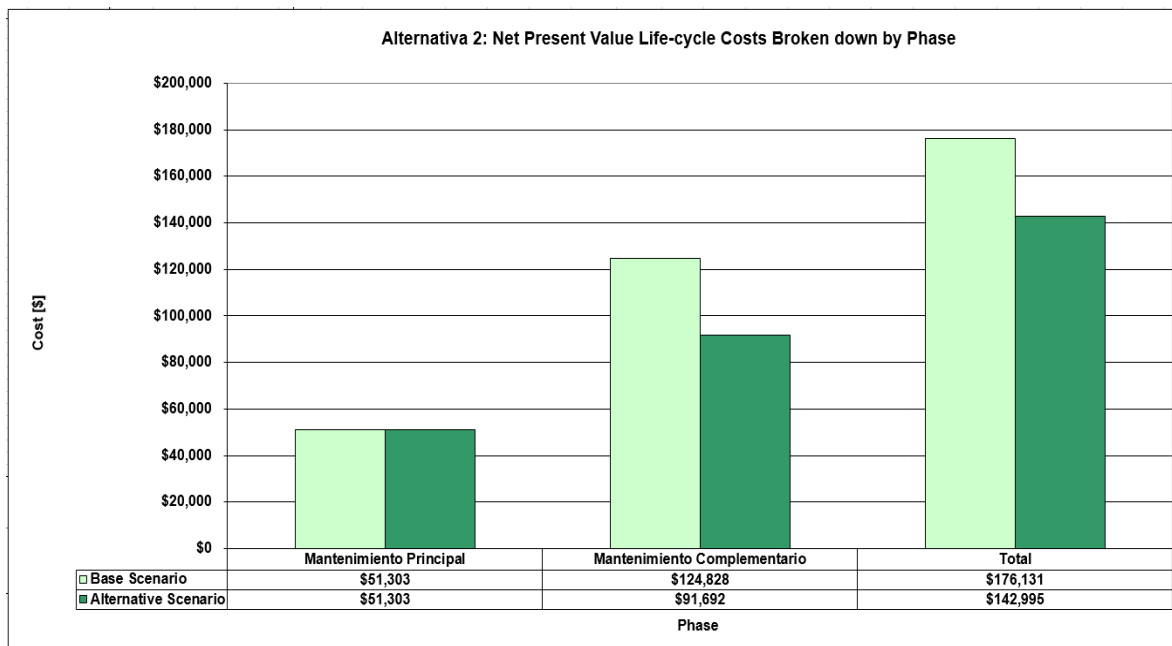


Figura 48. Costos de Mantenimiento de Alternativa 1.

Alternativa 2: Mantenimiento de Recapeo + Mantenimientos Correctivos.

La alternativa 2 se puede observar en la [Figura 49](#), esta pertenece a un mantenimiento de Recapeo el cual muestra los costos de un bacheo mayor en el mismo tramo de vía, esta opción se maneja cuando el estado del pavimento se encuentre en un estado Regular, es decir, el área afectada o fallas del tramo sean menores y puedan ser cubiertas por este tipo de tratamiento.



*Figura 49. Costos de mantenimiento de Alternativa 2.
(Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)*

Las dos alternativas propuestas muestran los gastos iniciales en 2023 según cada alternativa y en el Mantenimiento se muestran los costos totales hasta el año 2040.

En la [Tabla 59](#), se puede observar los resultados del presupuesto correspondiente a las dos alternativas mencionadas, teniendo una diferencia de \$ 13 000 aproximadamente.

Tabla 59. Resultados de presupuestos para dos alternativas

Intervención	Tratamiento Principal	Costo Inicial	Tratamiento Secundario	Costo
--------------	-----------------------	---------------	------------------------	-------

Mantenimiento Rehabilitación	Carpeta Asfáltica	\$ 110 934	M. Preventivo	\$ 3 274.56 (anual)
Mantenimiento Recapeo	Bacheo Mayor	\$ 51 303	M. Correctivo	\$ 10 503.57 (cada 2 años)

Cabe recalcar que, para requerir solo de un mantenimiento rehabilitación, la aplicación del mismo debe ser más recurrente; así los costos serán menores a lo largo del tiempo y el envejecimiento del pavimento será lenta. Mientras que, en el caso de descuidar el pavimento por un largo periodo de tiempo, es menos probable que el pavimento pueda corregirse con un tratamiento leve; pues probablemente necesitará de una corrección interna más exhaustiva de su estructura.

Análisis de Costos en el ciclo de vida.

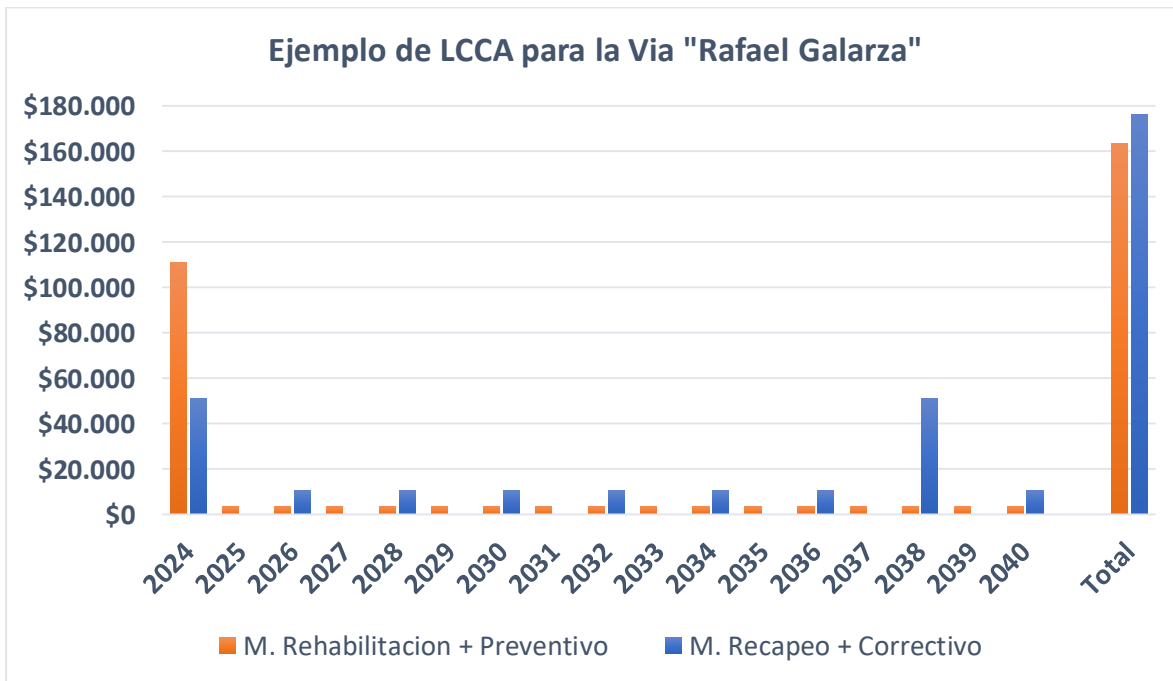


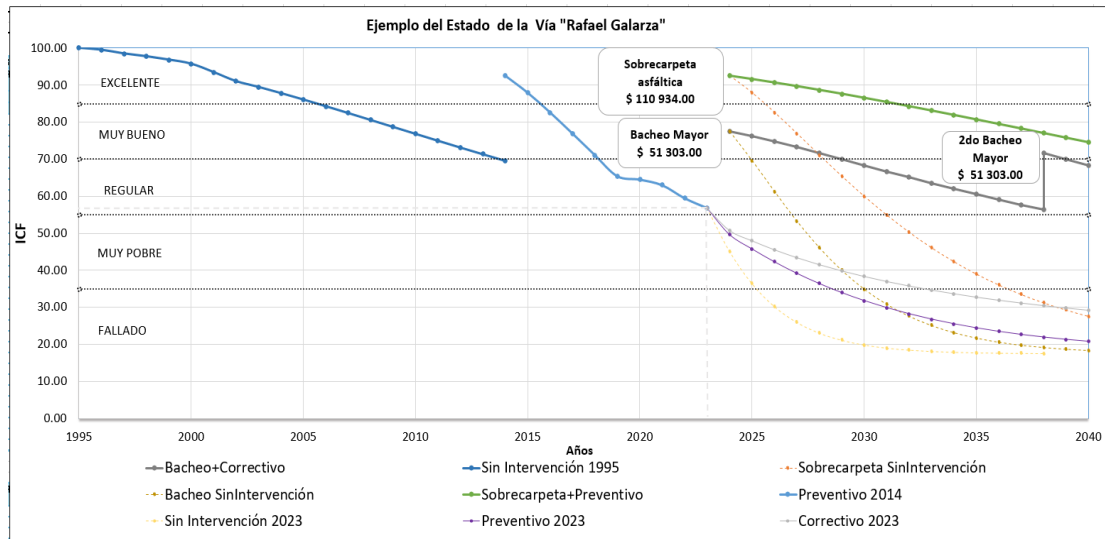
Figura 50. Costos a lo largo del tiempo para la vía Rafael Galarza

En la **Figura 50**, se puede observar que a lo largo del tiempo para el año 2040 la variación de inversión de mantenimientos para el deterioro controlado de la vía Rafael Galarza es mínimo, lo cual con un criterio técnico la inversión inicial es muy importante siendo más viable un Bacheo Mayor para el tramo. Pero existe un criterio muy importante y es que para el año 2040 el estado de la vía con la alternativa 1 estará en una Condición de Muy Buena. Mientras que para la alternativa 2 el estado del pavimento caerá en una condición Regular, lo cual, lo vuelve menos factible y es difícil que pueda recuperar de nuevo su condición sin una intervención fuerte que mejore estructuralmente su capa de rodadura.

Estado de la Red Vial a lo largo del tiempo.

En la **Figura 51**, se observa como el estado de la vía va disminuyendo conforme avanza en el tiempo, es decir tendrá una mayor caída conforme su condición disminuye lo que vuelve más vulnerable y sin el tratamiento se vuelve irreversible.

Figura 51. Estado de red vial a lo largo del tiempo.



Por lo tanto, como se observa en el gráfico es claro ver que las dos alternativas propuestas desencadenan en diferentes resultados a lo largo del tiempo. Dando mantenimientos preventivos y correctivos para una sobrecarpeta asfáltica pasará de un estado Excelente a Muy bueno mientras que, para un Bacheo Mayor estará de un estado Muy Bueno a Regular.

Resultados medioambientales (PaLATE)

Hipótesis:

- Año 1995 se supone la construcción de la vía
- Existió un mantenimiento en el año 2014.
- En el año 2019-2020 se considera un desgaste leve por el Covid-19
- Alternativa 1 considera una mejora que supone un estado Excelente del pavimento.
- Alternativa 2 considera una mejora que supone un estado Muy Bueno.
- Las curvas sin intervención son hipotéticas y deberán ajustarse con una según la iteración según datos reales.

En términos medio ambientales es importante decir que las emisiones que producen los pavimentos flexibles son muy fuertes con respecto a otros tipos de pavimentos, sin embargo, para la mayoría de cantones de las zonas rurales estas vías son las más empleadas por su facilidad y costos de operación.

Hay una gran ventaja al obtener un mantenimiento correctivo sobre un mantenimiento de rehabilitación debido a que el volumen de materiales y transporte de los mismos se reduce. Así este tipo de tratamiento disminuye las emisiones y lo vuelve más sostenible y amigable con el entorno.

En la [Figura 52](#) y [Figura 53](#) se puede observar el consumo de energía en el ciclo de vida para la alternativa 1 y alternativa 2 respectivamente.

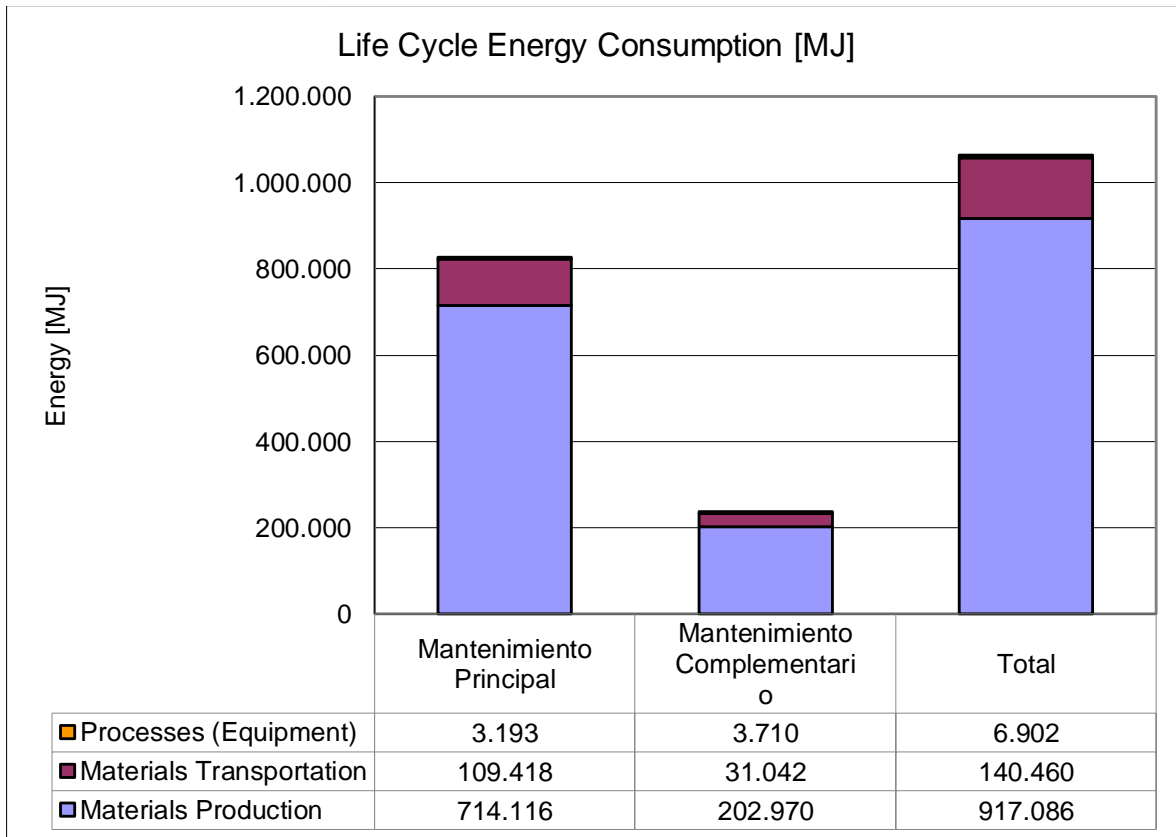


Figura 52. Consumo de energía de la Alternativa 1.
(Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)

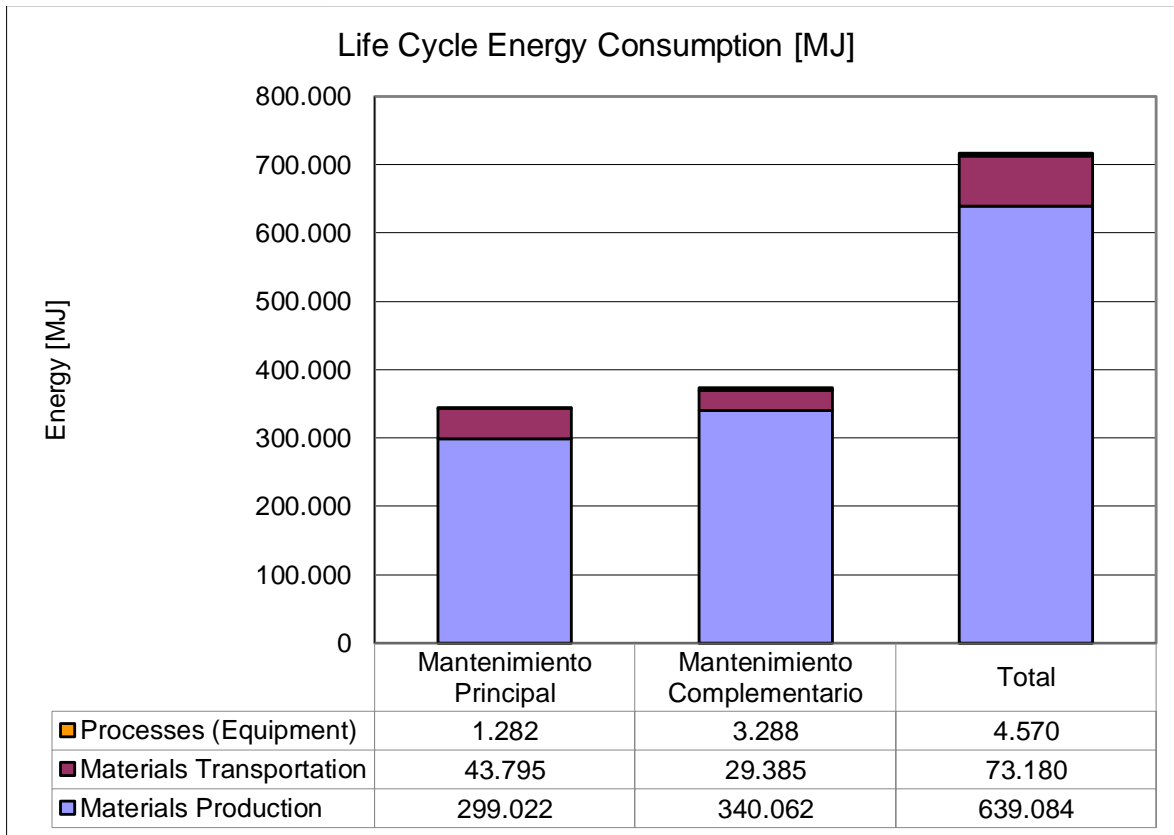
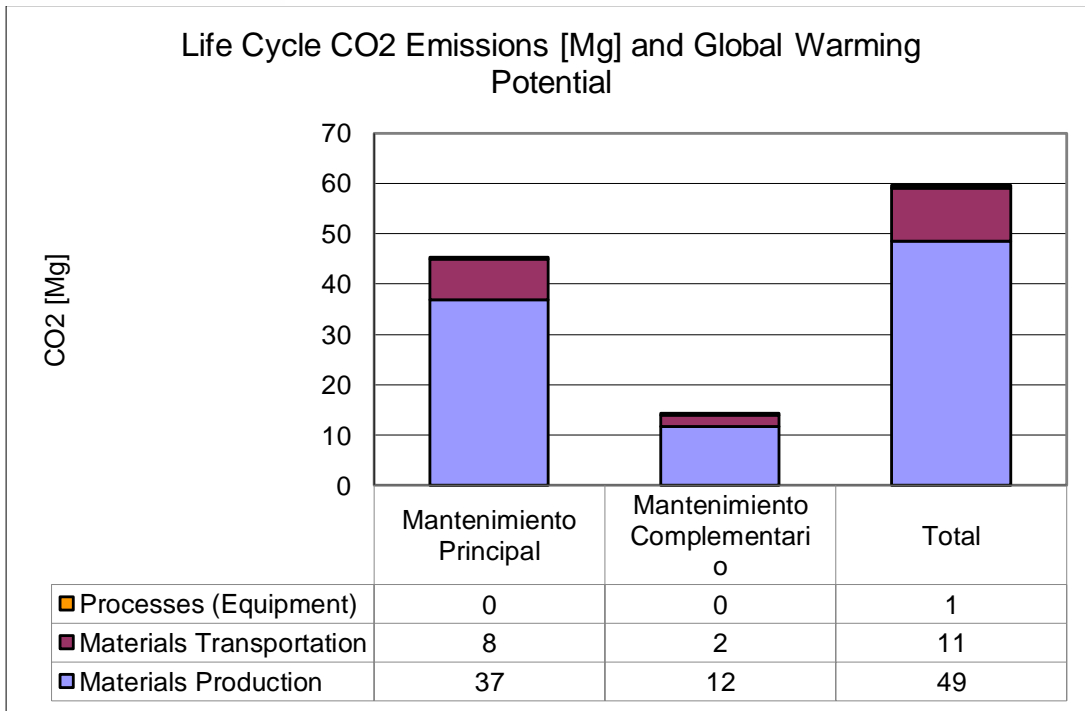


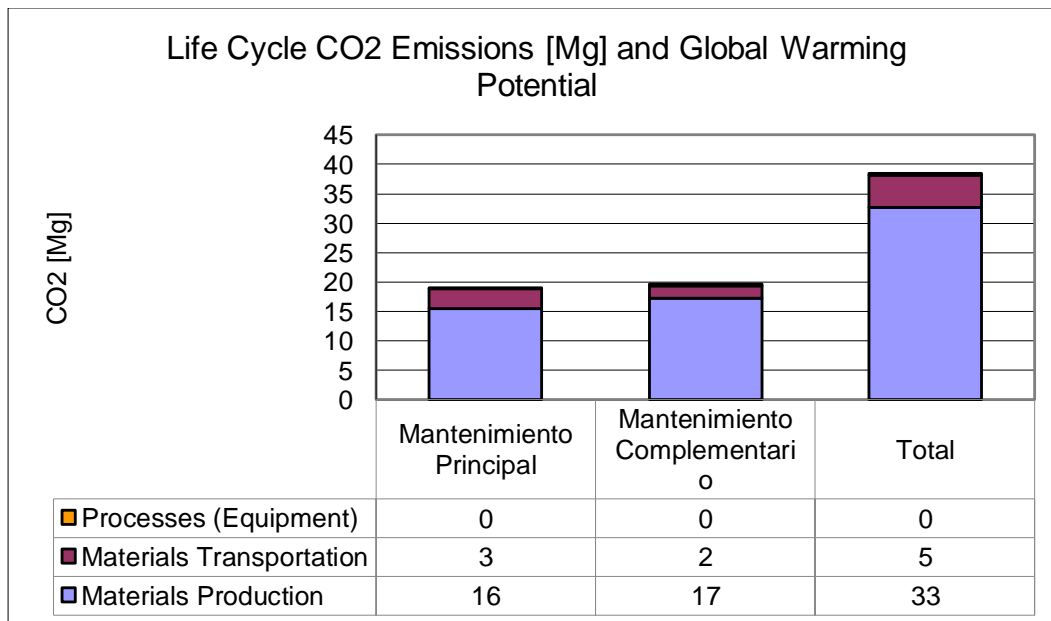
Figura 53. Consumo de energía de la Alternativa 2.
(Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)

La alternativa 1 sobrepasa en un 43% de Energía utilizada a la alternativa 2, es decir 277.246 MJ existe de diferencia entre ambas.

En la Figura 54 y Figura 55 se pueden observar las emisiones de CO₂ para la alternativa 1 y alternativa 2 respectivamente.



*Figura 54. Emisiones de CO₂ para Alternativa 1.
(Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)*



*Figura 55. Emisiones de CO₂ para Alternativa 2.
(Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)*

Existe un 48% más de Emisiones de CO2 (Mg) en la realización de la alternativa 1 sobre la 2.

En la Figura 56 y Figura 57 puede observar el ciclo de vida potencial de toxicidad en humanos (cáncer) para la alternativa 1 y alternativa 2 respectivamente.

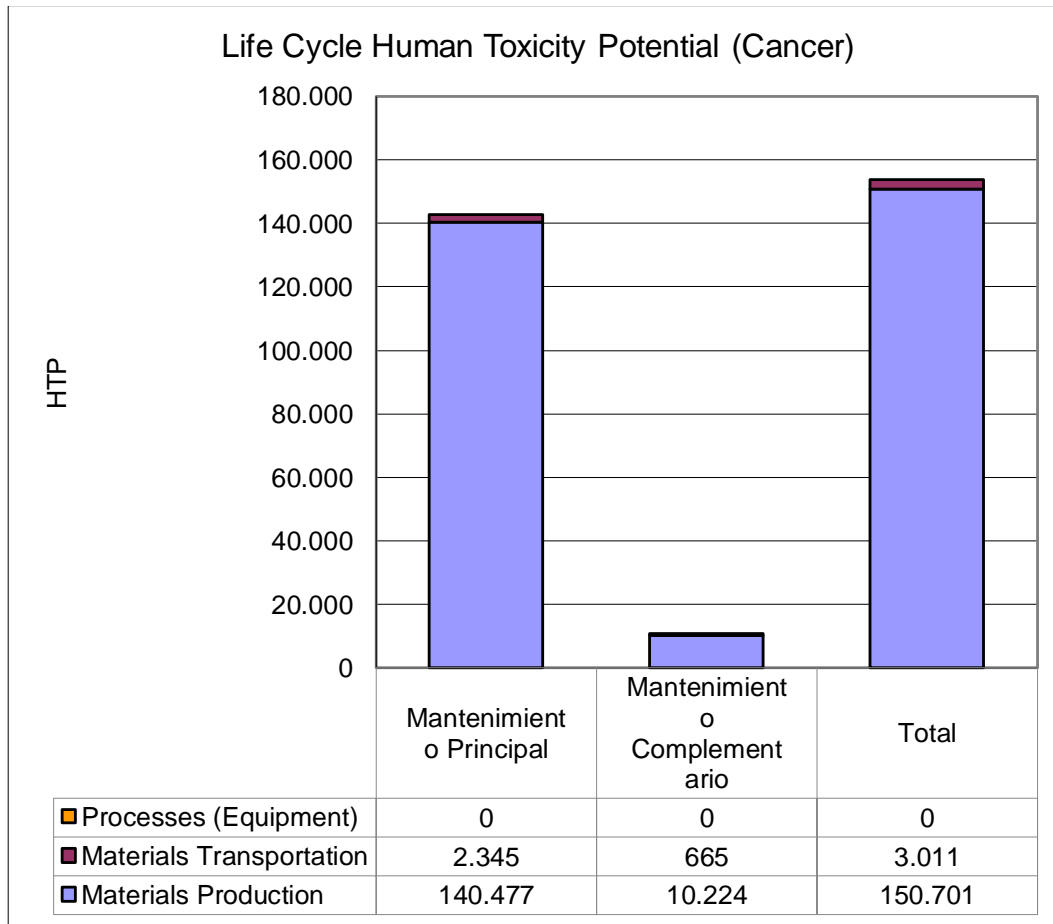


Figura 56. Ciclo de vida Potencial de Toxicidad en Humanos para alternativa 1. (Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)

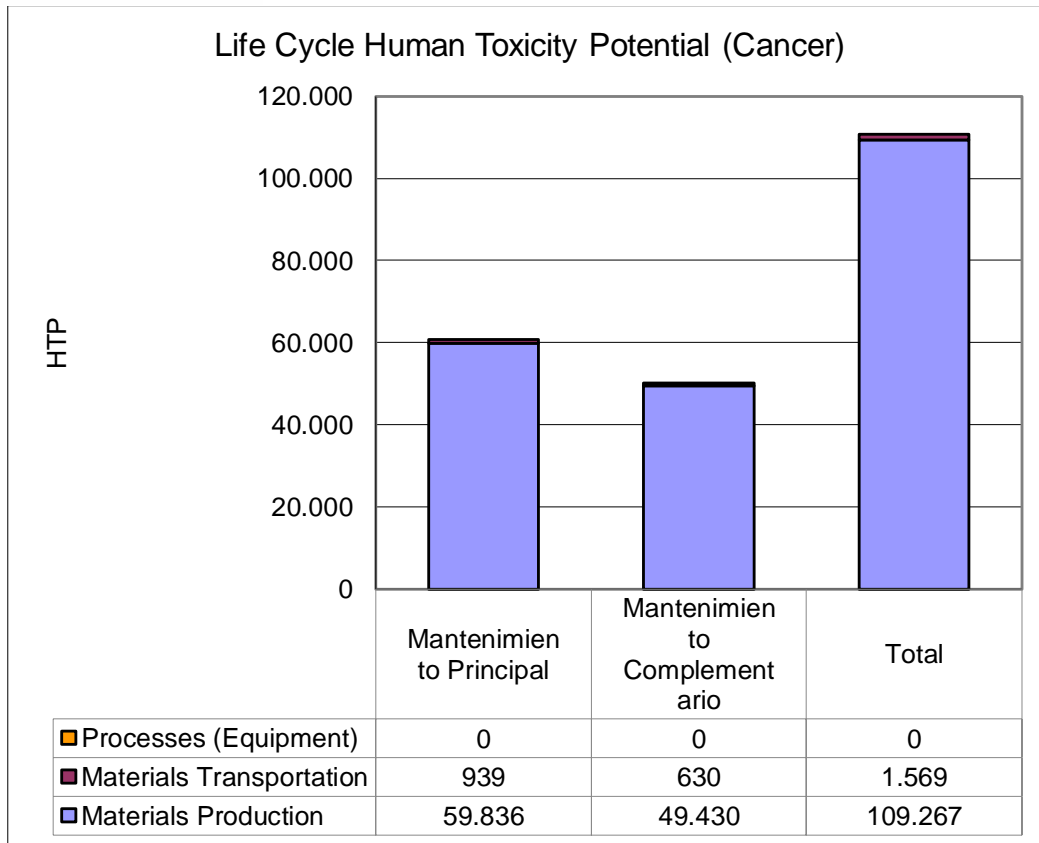


Figura 57. Ciclo de vida Potencial de Toxicidad en Humanos para alternativa 2. (Recycled Materials Resource Center (RMRC), 2021)

Existe mayor Potencial Cancerígeno para el ciclo de vida con una diferencia 41.434 HTP (Human Toxicity Potential) entre la alternativa 1 y la alternativa 2.

Por lo tanto, realizando un análisis de estos resultados es indiscutible el mayor daño e impacto que genera un mantenimiento de Rehabilitación+Preventivo que implica el cambio de carpeta asfáltica, con respecto a un mantenimiento Recapeo que involucra un Bacheo Mayor+Correctivo. Los usos de recursos como cantidad de asfalto, proceso de producción y transporte de material generan grandes emisiones contaminantes y consumen mayor energía. También el cambio de carpeta asfáltica genera una mayor cantidad de residuos lo que puede tener impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación del suelo y el agua. Es importante ver el factor humano ya que el mantenimiento de Rehabilitación perjudica significativamente en la salud de los operadores y fabricantes de asfalto. Cabe destacar que el tratamiento de cambio de carpeta asfáltica prolonga considerablemente la vida útil del pavimento y mejora formidablemente la calidad de conducción del usuario, para

el tramo de la vía “Rafael Galarza”. Sin embargo, requiere una mayor inversión inicial y propaga una línea más alta de contaminación para la población del centro urbano de Santa Isabel.

A continuación en la Tabla 60, se muestran las diferencias de las dos alternativas analizadas por los criterios técnicos y de sostenibilidad.

Tabla 60. Tabla Comparativa de Resultados de las dos alternativas.

Alternativa 1		Alternativa 2	
Más económica	\$163 327	Menos económica	\$176 131
Inversión inicial mayor	\$110 934	Inversión inicial baja	\$51 30
En 2040, Estado Muy Bueno	ICF = 75	En 2040, Estado Regular	ICF = 68
Impacto ambiental fuerte	49 Mg de CO2	Impacto ambiental moderado	33 Mg de CO2
Menos sostenible	43 (Sin Calificación)	Más Sostenible	68 (Bronce)

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Mediante el software “SGI Santa Isabel” creado en este trabajo con respecto al sistema de gestión de la infraestructura vial para Santa Isabel, se implementó con éxito la metodología Windshield validada por PCI, las matrices de probabilidad de Markov, y herramientas adicionales de análisis de costos y sostenibilidad como PaLATE e INVEST. Además, se realizó una inspección visual, cuantificó la condición del pavimento, jerarquizó prioridades y determinó los tratamientos más adecuados basándose en criterios de sostenibilidad y análisis de costos.

En función del cumplimiento del primer y segundo objetivo específico:

Se evaluó la red vial mediante la metodología Windshield, y se validó su fiabilidad a través del método PCI. La variación de valores del ICF con respecto al PCI presentan un R^2 de 0.96, el ajuste es cercano a 1; lo que significa que el método Windshield es altamente confiable. Por lo tanto, este método es más fácil y económico de aplicar, ya que cubre una mayor área de la red vial en menor tiempo y disminuye los costos de evaluación en términos de recursos humanos y logísticos respecto a la metodología PCI.

Con respecto al cumplimiento del tercer objetivo específico se tiene que:

De manera pertinente se obtuvo la salud de la red vial, en donde se determinó que la mayoría de los pavimentos se encuentran en estado pobre y representan el 45.43% de todas las vías analizadas, para el resto de pavimentos se obtuvo que en orden de porcentaje le sigue el estado regular con 30.66%, luego se encuentran en estado bueno un 11.4% de pavimentos, en estado excelente un 10.75% y por último 1.77% de pavimentos en estado fallado. Por lo cual, les corresponde un tratamiento de rehabilitación a todas las vías que presenten el estado Pobre. Entre los tratamientos recomendados de rehabilitación se determinó: fresado y sobrecarpeta. Para los tramos de pavimento rígido se recomienda sello superficial de grietas, sello de juntas, bacheo mayor o también un cambio de losa.

Con relación al cumplimiento del cuarto y quinto objetivo:

Se proyectaron los deterioros de los pavimentos en el tiempo, a través de las probabilidades de Markov aplicando las distintas matrices que reflejan el mantenimiento Preventivo para un estado Excelente, Correctivo para un Estado Muy Bueno, Recapeo para un estado Regular, Rehabilitación para un estado Pobre y Reconstrucción para un estado Fallado y además una matriz sin intervención en caso de no tomar acciones sobre la red vial.

Se comprobó que, aplicando un tratamiento de rehabilitación, para una proyección de 10 años sugerida por la Municipalidad; se reveló una mejora de la Red General de Pavimento obteniendo un 70% en estado Excelente, 13% Bueno, 8% Regular, 2% Pobre y 7% Fallado. Esto quiere decir que, las matrices de transición correctamente seleccionadas incrementan el porcentaje de pavimentos de estado Excelente. Sin embargo, seleccionando un mantenimiento inapropiado empeorará la condición del pavimento obteniendo un alto porcentaje de pavimento en estado Fallado.

Como ejemplo se tomó la calle Rafael Galarza, una de las vías de mayor importancia, por lo que conecta la entrada-salida del cantón con otras parroquias y se concluye que ésta se encuentra en estado Regular como la mayoría de vías de la red. Al no intervenir oportunamente y no mejorar la condición del pavimento, éste fallaría antes del año 2030. Si se aplican las alternativas de tratamiento propuestas se puede mantener un deterioro controlado del pavimento incrementando su vida útil hasta el año 2040.

En consecuencia, para el sexto objetivo específico se tiene que:

En el análisis de sostenibilidad y costos se obtuvo resultados muy distintos debido a la aplicación de los diferentes mantenimientos para el mismo tramo de la vía en el centro urbano de Santa Isabel. Se propuso un mantenimiento de Rehabilitación con Preventivo periódicamente siendo más eficiente, económico y una inversión inicial \$110 934, mientras que un tratamiento de Recapeo con Correctivo a largo plazo aumenta sus costos de operación y materiales con una inversión inicial de \$ 51 303.

Por lo cual, realizar una planificación y cronograma apropiado cumple con los requisitos de sostenibilidad. Cada alternativa responde a una solución técnica y razonable. Para el caso “1”, es la solución más económica y técnica y se obtendría

una mejor condición de la red con un impacto ambiental significativo. Mientras que, la alternativa “2” es la solución más sostenible y amigable con el medio ambiente, esta no será la más económica y no se esperará la condición más óptima del pavimento. En definitiva, existe un 43% más de contaminación de la alternativa 1 vs la alternativa 2.

Se concluye que INVEST y PaLATE son herramientas adicionales de toma de decisiones, las cuales optimizan al sistema de gestión vial no solo desde el punto de vista de costos si no también incluyen aspectos de sostenibilidad. Finalmente, la toma de decisiones velará por el bien de su comunidad y se debe tomar en cuenta el aspecto económico y a su vez el sostenible que garantice un estado de la red vial eficiente.

6.2. RECOMENDACIONES

Se sugiere tener un catálogo de las fallas a tratar y su respectivo plano de distribución de los tramos de vías para que el recorrido realizado para cada segmento sea eficiente.

Se propone establecer horarios de inspección en campo que involucren horarios de tráfico bajo, haciendo uso de instrumentos de seguridad que garanticen la integridad personal, tales como conos de señalización, chaleco reflectante y casco de seguridad.

Es recomendable revisar de forma exhaustiva los parámetros de severidad y frecuencia del método ya que estos están sujetos a errores de apreciación siendo dificultosos para su desarrollo y pueden perjudicar el ICF y sus respectivas calificaciones.

La metodología utilizada en campo puede ser muy efectiva como una evaluación cualitativa y no debe sobrepasar los 300m de longitud excepto que tengan cierta uniformidad en su deterioro se llegara hasta 500m, sin embargo, en caso de necesitar una magnitud real de las fallas del pavimento se recomienda utilizar el índice PCI. Recalcando que los costos de la inspección serán mayores por necesidad de equipos especializados, volviendo el proyecto más costoso.

Se recomienda para las municipalidades tener un registro de los mantenimientos y años de realización que se hicieron con su respectivo estado de condición de pavimento. Estos

datos son importantes para un correcto funcionamiento y predicción de la red vial en el tiempo

6.2.1. Recomendaciones del Software “SGI Santa Isabel”.

Se recomienda actualizar los valores de cambio de probabilidad de transición en las matrices de Markov, en función de los resultados posteriores de evaluación; ya que los propuestos se basan en la primera evaluación.

Para los resultados del análisis de Markov es recomendable al usuario dar el tipo de tratamiento que se sugiere en el programa, el cual se basa en el resultado final compuesto ya sea este mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, recapeo, rehabilitación o reconstrucción; porque estas son las intervenciones recomendadas.

Es recomendable utilizar el software para simular cambios en las fallas de los tramos de pavimento y obtener diferentes valores de Índice de Condición Funcional (ICF) y estados del pavimento. Además, utilice el software para aplicar distintos escenarios de tratamientos en las matrices de Markov. Esto facilita el análisis de diversas opciones de mantenimiento con el objetivo de determinar cuál es la alternativa más recomendable en términos de sostenibilidad y costo.

Se recomienda para futuras actualizaciones del software, implementar un botón de costos unitarios para cada tramo de la red vial, ya que la versión actual tiene esa limitación y es muy pertinente dar una idea del presupuesto mínimo de cualquier tipo de mantenimiento necesario.

Es importante tener en cuenta que las herramientas mencionadas en este trabajo deben ser utilizadas por personal capacitado con conocimientos en vialidad y pavimentos, ya que requieren comprensión y experiencia en el análisis de datos y en la evaluación de alternativas de mantenimiento. Además, se deben considerar otros factores relevantes, como las características específicas de la infraestructura vial, las condiciones ambientales y las políticas de mantenimiento establecidas por las autoridades correspondientes.

Referencias

- Amado, C., & Gil, O. (2017). *Análisis del costo en el ciclo de vida para dos alternativas de pavimento*. Bogota.
- Apolo Bustamante, D. M. (2018). *Diseño de un sistema de infraestructura vial sustentable en la municipalidad de Gualaceo*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Asphalt Pvement Alliance. (2011). *Life-cycle cost analysis: A position paper*.
- ASTM D-6433. (2011). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index*.
- Avila Redrovan, E., & Albarracín Llivisaca, F. (2014). *Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso, caso de estudio vía Chicti-Sevilla de Oro*. Cuenca.
- Departamento de Administración y Evaluación de Pavimentos. (2016). Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación. 13-150.
- Espinosa, D. (2009). *Guía de mantenimientos para pavimentos asfálticos de vías locales en Bogotá D.C.* Bogotá.
- Federal Highway Administration. (16 de Noviembre de 2022). *Federal Highway Administration*. Obtenido de U. S. Department of transportation: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/lcca/lccafact/>
- Ferrer, A. S. (2013). *Análisis de la Capacidad de Gestión de la Seguridad Vial*. Colombia: Fondo Mundial para la Seguridad Vial.
- Haas, R., Hudson, W., & Uddin, W. (2013). *Public Infrastructure Asset Management* (Vol. II). California: McGraw-Hill Education.
- Higuera Sandoval, C., & Pacheco Merchan, O. (2010). *Patología de Pavimentos Articulados*. Medellin, Colombia: Revista Ingenierías, Universidad de Medellin.
- Higuera, C., & Pacheco, Ó. (2010). Patología de pavimentos articulados. *Revista Ingenierías*, 70-85.

- Horvath, A., Pacca, S., Masanet, E., & Canapa, R. (2004). Pavement life-cycle assessment tool for environmental and economic effects (PaLATE). *Recycled Materials Resource Center*.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design-Second Edition*. Kentucky, U. S.: Pearson Education, Inc.
- Hugo, I. (2010). Clasificación de Pavimentos. *Pavimentos Blogspot*, 1.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2004). *Metodología para la determinación y calificación del estado de la red vial*. Colombia.
- Jugo, B. (2005). *Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles*. Caracas, Venezuela.
- Kohan, D. (2014). Cadenas de Markov. *Revista Métodos Estadísticos En Ciencias de La Vida*, 1-8.
- Leiva, F. (2013). *Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras*. Costa Rica: Repositorio Centroamericano.
- Macías, D. (2016). *Estudio de fallas que presenta la carpeta asfáltica con alternativas solución - diagnóstico PCI en la vía Sasay cantón Santa Ana*. Manabí.
- Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería para Carreteras Tomo I*. Bogota D. C.: Agora Editorial.
- Navazo, M. (2011). Hacia un plan de infraestructuras de transporte que cumpla con la legislación. *Boletín CF+S*, 15-28.
- NCDOT. (2011). *Digital Imagery Distress. Evaluacion Handbook*. North Carolina: North Carolina Department of Transportation.
- NEVI-12. (2013). *Normas Ecuatorianas Viales (Vol. 6)*. Ecuador: Ministerios de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Norma Técnica Colombiana. (2004). *ADOQUIN DE ARCILLA PARA TRÁNSITO PEATONAL Y VEHICULAR LIVIANO*. Bogotá: ICONTEC.

- PDOT de Santa Isabel. (2020). *PDOT de Santa Isabel*. Santa Isabel: Municipalidad de Santa Isabel.
- Peñaloza, S., & Calle, G. (2017). *SISTEMA DE GESTIÓN SOSTENIBLE DE PAVIMENTOS APLICADO A LAS VÍAS Y PARQUEADEROS DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA*.
- Recycled Materials Resource Center (RMRC). (2021). *PaLate 2.0*. Madison.
- Rooney, C., Ryan, H., Bloniarz, D., & Kane, B. (2005). THE RELIABILITY OF A WINDSHIELD SURVEY TO LOCATE HAZARDS IN ROADSIDE TREES. *Journal of Arboriculture*, 89, 90, 91.
- Ruiz Robles, A. (2017). *PRÁCTICAS SOSTENIBLES EN INFRAESTRUCTURA VIAL*. Bogota, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Servicio Nacional de Contratación Pública (Sercop). (2008-2023). *Compras Públicas*. Ecuador.
- Talmage, H., Mogrovejo, D., & Zhang, G. (2011). *VT Parking Lot PMS*. Virginia.
- Tomassian, G. (2011). Principios de políticas de infraestructura, logística y movilidad basadas en la integralidad y la sostenibilidad. *Recursos naturales e infraestructura*.
- U. S. Department of Transportation. (2013). *Practical Guide for Quality Management of Pavement Condition Data Collection*. Washington D.C.: FHA.
- U.S. Department of Transportation- Federal Highway Administration . (2021). *INVEST (Versión 1.3)*. Washington.
- Unidad de Auditoría Técnica - LanammeUCR. (2023). *Guía para la inspección y reparación de deterioros en pavimentos de concreto hidráulico*. Costa Rica.
- Vásquez, L. (2002). *MANUAL DE DAÑOS EN VÍAS CON SUPERFICIE DE CONCRETO*. Colombia.
- VDOT. (2006). *Interstate and Primary Flexible Pavements*. Virginia, US: Virginia Department Of Transportation.

- Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K., & Rietgraf, A. (2011). *IMPLEMENTING PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS FOR LOCAL AGENCIES*. Illinois.
- Wulff, F., Kogan, J., & Saavedra, J. C. (2010). *MANTENIMIENTO VIAL. Informe Sectorial*. Corporacion Andina de Fomento (CAF).
- Yan Jiang, J. (2016). *Long-Term Pavement Performance Program- Pavement Performance Measures and Forecasting and the Effects on Maintenance and Rehabilitation Strategy on Treatment Effectiveness*.
- Zúñiga García, N., & Prozzi, J. (2018). ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA DE TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN DE PAVIMENTOS. *Revista Asfalto y Pavimentación VIII (30)*, 23-31.

Anexos

Anexo A

En este anexo, se presenta el proceso de cálculo para la obtención del PCI para los 4 tramos analizados de pavimento flexible.

- Tramo 1C-1D

Tabla 61. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1C-1D

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	AREA/LONGITUD/UNIDAD			CANTIDAD PARCIALES	TOTAL
			Longitud (m)	Ancho (m)	Cantidad		
1	L	m ²	2.3	0.3		0.69	1.11
1	L	m ²	0.6	0.7		0.42	
4	L	m ²	0.5	0.6		0.3	0.3
7	M	m ²	0.6			0.6	0.6
7	H	m ²	2.3			2.3	2.3
11	L	m ²	2.3	10.35		23.805	36.255
11a	L	m ²	2.1	3.1		6.51	
11	L	m ²	1.4	2.2		3.08	
11	L	m ²	1.3	2.2		2.86	
19	M	m ²	6	26		156	156

Tabla 62. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1C-1D

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
1	L	m ²	1.11	0.2%	5
4	L	m ²	0.30	0.0%	0.1
7	M	m	0.60	0.1%	2
7	H	m	2.30	0.3%	9
11	L	m ²	36.255	5.0%	10
19	M	m ²	156.00	21.4%	27

Tabla 63. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1C-1D

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	4
Valor deducido más alto	27
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	7.70

Tabla 64. Obtención del VDC para PCI para tramo 1C-1D

N°	VALORES DEDUCIDOS							VDT	q	VDC
1	27	10	9	5	2	0.1		53.1	5	24
2	27	10	9	2	2	0.1		50.1	4	28
3	27	10	2	2	2	0.1		43.1	3	32
4	27	2	2	2	2	0.1		35.1	2	30

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 65. Resultado de PCI para tramo 1C-1D

MAXIMO VDC	32
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	68
CONDICION DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1D-1E

Tabla 66. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1D-1E

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	AREA/LONGITUD/UNIDAD			CANTIDADES PARCIALES	TOTAL
			Longitud (m)	Ancho (m)	Cantidad		
1	L	m ²	0.6	0.6		0.36	2.82

1	L	m ²	1.8	0.9		1.62	
1	L	m ²	0.7	1.2		0.84	
1	M	m ²	1.4	1		1.4	1.4
7	L	m	2			2	2
7	H	m	1.4			1.4	3.7
7	H	m	1.5			1.5	
7	H	m	0.8			0.8	
10	L	m	3.1			3.1	3.1
11	L	m ²	4.4	9.7		42.68	71.31
11	L	m ²	1.40	8.30		11.62	
11	L	m ²	2.10	8.10		17.01	
13	H	unid			1.00	1	2.00
13	H	unid			1.00	1	

Tabla 67. Hoja de cálculo de valores deducidos para tramo 1D-1E

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
1	L	m ²	2.82	0.3%	5
1	M	m ²	1.40	0.2%	10
7	L	m	2.00	0.2%	1
7	H	m	3.70	0.4%	9
10	L	m	3.1	0.3%	0.9
11	L	m ²	71.31	7.7%	14
13	H	unid	2.00	0.2%	26

Tabla 68. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1D-1E

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	5
Valor deducido más alto	26

número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	7.80
---	------

Tabla 69. Obtención del VDC para PCI para tramo 1D-1E

N°	VALORES DEDUCIDOS							VDT	q	VDC
1	26	14	10	9	5	1	0.9	65.9	5	32
2	26	14	10	9	2	1	0.9	62.9	4	40
3	26	14	10	2	2	1	0.9	55.9	3	36
4	26	14	2	2	2	1	0.9	47.9	2	40
5	26	2	2	2	2	1	0.9	35.9	1	42

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 70. Resultado de PCI para tramo 1D-1E

MAXIMO VDC	42
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	58
CONDICION DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1E-1F

Tabla 71. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1E-1F

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	AREA/LONGITUD/UNIDAD			CANTIDADES PARCIALES	TOTAL
			Longitud (m)	Ancho (m)	Cantidad		
1	M	m ²	0.70	1.00		0.70	0.70
4	L	m ²	0.60	0.70		0.42	0.42
4	M	m ²	3.10	7.90		24.49	25.89
4	M	m ²	1.40	1.00		1.40	
4	H	m ²	3.40	1.90		6.46	6.46
7	M	m	2.10			2.10	2.45
7	M	m	0.35			0.35	
7	H	m	0.70			0.70	0.70
9	M	m	0.06			0.06	0.06
10	M	m	14.80			14.80	14.80
11	L	m ²	4.00	4.20		16.80	83.97
11	L	m ²	6.10	2.60		15.86	
11	L	m ²	2.10	3.80		7.98	
11	L	m ²	1.00	1.90		1.90	
11	L	m ²	2.00	4.20		8.40	
11	L	m ²	1.45	1.80		2.61	
11	L	m ²	1.30	1.00		1.30	
11	L	m ²	3.30	3.10		10.23	
11	L	m ²	1.30	7.50		9.75	
11	L	m ²	2.10	4.35		9.14	

Tabla 72. Hoja de cálculo inicial con fallas del tramo 1E-1F

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	TOTAL	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
1	M	m ²	0.70	0.1%	7
4	L	m ²	0.42	0.1%	1
4	M	m ²	25.89	4.3%	27

4	H	m ²	6.46	1.1%	35
7	M	m	2.45	0.4%	4
7	H	m	0.70	0.1%	9.5
9	M	m	0.06	0.0%	2
10	M	m	14.80	2.5%	6.5
11	L	m ²	83.97	14.0%	19

Tabla 73. Número máximo de fallas permitidas para tramo 1D-1E

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	7
Valor deducido más alto	35
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	6.97

Tabla 74. Obtención del VDC para PCI para tramo 1E-1F

N°	VALORES DEDUCIDOS							VDT	q	VDC
1	35	27	19	9.5	7	6.5	0.388	104.4	7	50
2	35	27	19	9.5	7	6.5	2	106	6	50
3	35	27	19	9.5	7	2	2	101.5	5	51
4	35	27	19	9.5	2	2	2	96.5	4	54
5	35	27	19	2	2	2	2	89	3	53
6	35	27	2	2	2	2	2	72	2	50
7	35	2	2	2	2	2	2	47	1	45

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 75. Resultado de PCI para tramo 1E-1F

MAXIMO VDC	54
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	46
CONDICION DEL PAVIMENTO	REGULAR

Anexo B

En este anexo, se presenta el proceso de cálculo para la obtención del PCI para los 4 tramos analizados de pavimento rígido.

- Tramo 1A-1B

Tabla 76. Hoja de cálculo de PCI para tramo 1A-1B

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	# losas	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
22	L	m ²	1.00	2.9%	2
23	L	m ²	1.00	2.9%	3
28	L	m	9.00	26.5%	14
29	L	m ²	10.00	29.4%	12
29	M	m ²	3	8.8%	6
31	L	m ²	21.00	61.8%	8
31	H	m ²	1.00	2.9%	1
32	M	unid	1.00	2.9%	1
32	H	unid	5.00	14.7%	3
37	L	m ²	1.00	2.9%	0

Tabla 77. Cálculo número máximo de VD para tramo 1A-1B

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	6
Valor deducido más alto	14
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	8.90

Tabla 78. Cálculo de VDC para tramo 1A-1B

N°	VALORES DEDUCIDOS								VDT	q	VDC
1	14	12	8	6	3	3	2	1	49	6	22
2	14	12	8	6	3	2	2	1	48	5	36
3	14	12	8	6	2	2	2	1	47	4	30
4	14	12	8	2	2	2	2	1	43	3	28
5	14	12	2	2	2	2	2	1	37	2	34
6	14	2	2	2	2	2	2	1	27	1	28

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 79. Resultado PCI para tramo 1A-1B

MAXIMO VDC	36
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	64
CONDICION DEL PAVIMENTO	BUENO

- Tramo 1A -60A

Tabla 80. Hoja de cálculo de PCI para tramo 1A-60A

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	# losas	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
22	L	m	2.00	7.7%	7
28	L	m	5.00	19.2%	9
28	M	m	4.00	15.4%	13
34	M	m ²	4.00	15.4%	34

Tabla 81. Cálculo número máximo de VD para tramo 1A-60A

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	4
Valor deducido más alto	34
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	7.06

Tabla 82. Cálculo de VDC para tramo 1A-60A

N°	VALORES DEDUCIDOS				VDT	q	VDC
	34	13	9	4.2			
1	34	13	9	4.2	60.2	4	36
2	34	13	9	4.2	60.2	3	42
3	34	13	2	4.2	53.2	2	44
4	34	2	2	4.2	42.2	1	46

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 83. Resultado PCI para tramo 1A-60A

MAXIMO VDC	46
-------------------	----

INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	54
CONDICION DEL PAVIMENTO	REGULAR

- Tramo 60A-62A

Tabla 84. Hoja de cálculo de PCI para tramo 60A-62A

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	# losas	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
28	L	m	9.00	20.5%	10
28	M	m	5.00	11.4%	8
34	L	m ²	3.00	6.8%	9
37	L	m ²	1.00	2.3%	0
39	M	m ²	1	2.3%	1

Tabla 85. Cálculo número máximo de VD para tramo 60A-62A

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	3
Valor deducido más alto	10
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	9.27

Tabla 86. Cálculo de VDC para tramo 60A-62A

N°	VALORES DEDUCIDOS				VDT	q	VDC
1	10	9	8	1	28	3	18
2	10	9	2	1	22	2	22
3	10	2	2	1	15	1	16

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 87. Resultado PCI para tramo 60A-62A

MAXIMO VDC	22
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	78
CONDICION DEL PAVIMENTO	MUY BUENO

- Tramo 62A-63A

Tabla 88. Hoja de cálculo de PCI para tramo 62A-63A

DAÑO	SEVERIDAD	UNIDAD	# losas	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO
22	M	m ²	3.00	18.8%	26
23	M	m ²	7.00	43.8%	54
28	M	m ²	1.00	6.3%	5
28	H	m ²	2.00	12.5%	22
32	H	unid	1	6.3%	1
34	L	m ²	2.00	12.5%	18
34	M	m ²	1.00	6.3%	16

Tabla 89. Cálculo número máximo de VD para tramo 62A-63A

Numero de valores deducidos mayor a 2 (q)	6
Valor deducido más alto	54
número máximo de VD (FALLAS PERMITIDAS) (mi)	5.22

Tabla 90. Cálculo de VDC para tramo 62A-63A

N°	VALORES DEDUCIDOS						VDT	q	VDC
1	54	26	22	18	16	1.1	137.1	6	68
2	54	26	22	18	16	2	138	5	78
3	54	26	22	18	2	2	124	4	68
4	54	26	22	2	2	2	108	3	67
5	54	26	2	2	2	2	88	2	65
6	54	2	2	2	2	2	64	1	64

Con lo cual se obtiene de resultado:

Tabla 91. Resultado PCI para tramo 62A-63A

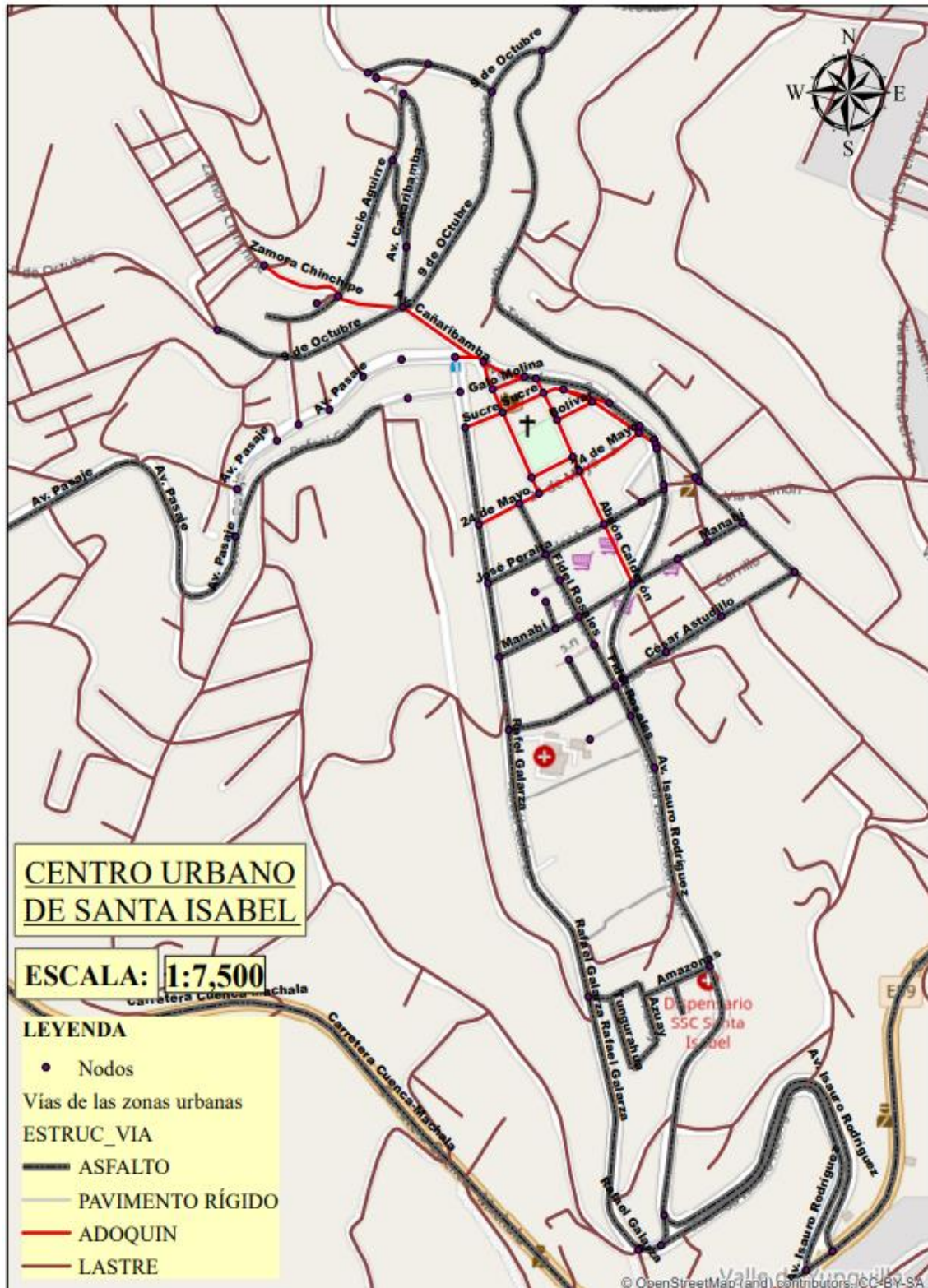
MAXIMO VDC	78
INDICE DE CONDICION DE PAVIMENTO PCI	22
CONDICION DEL PAVIMENTO	MUY POBRE

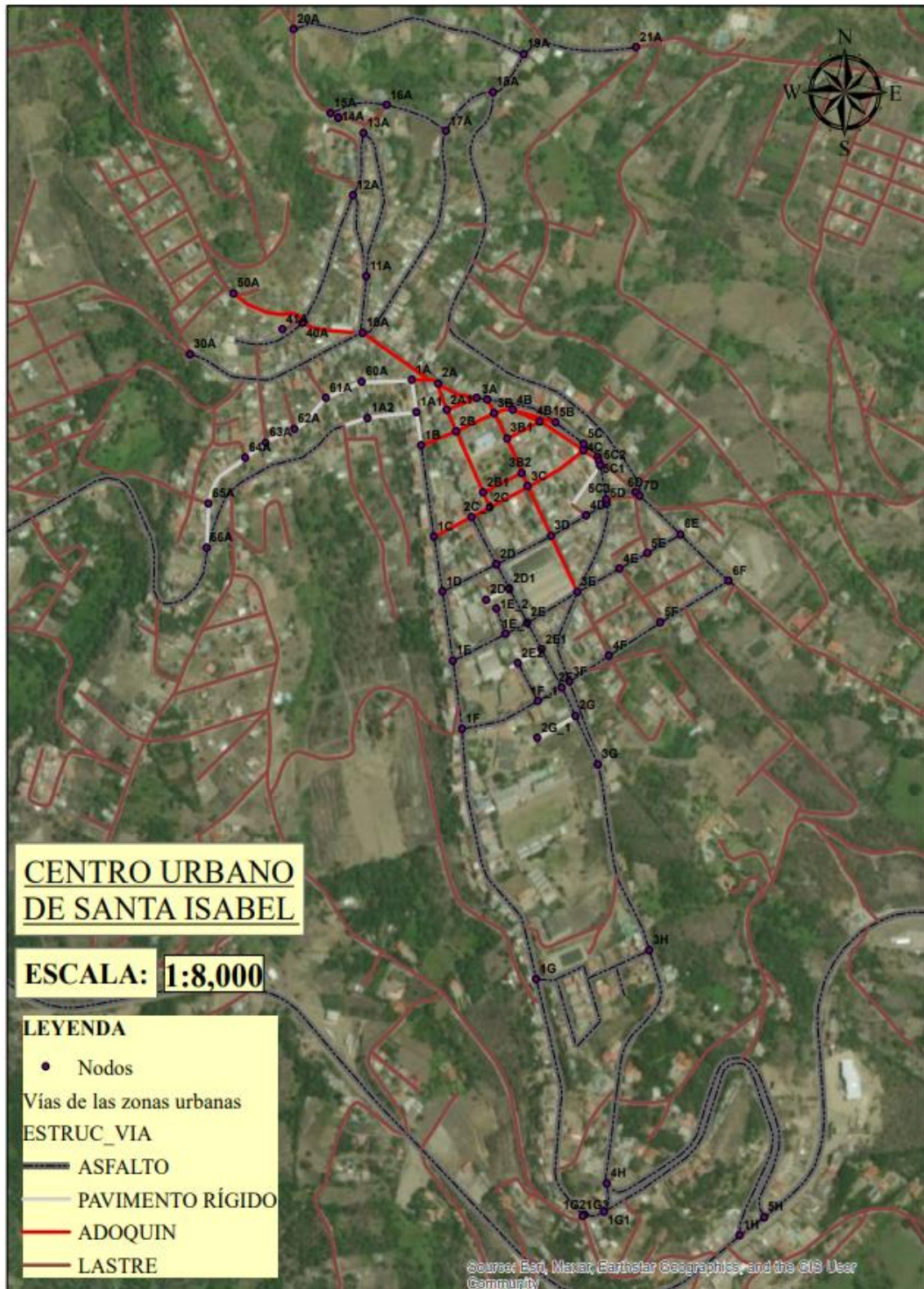
Anexo C

Se anexan los mapas utilizados para el inventario vial y la distribución de los nodos:

- Mapa de las vías del centro urbano de Santa Isabel.

- Mapa de distribución de Nodos de Santa Isabel.

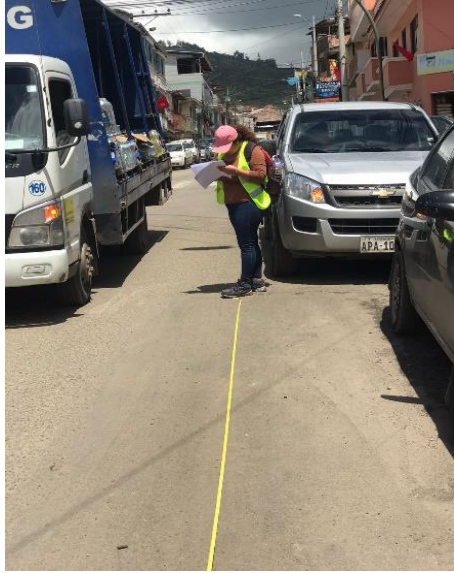


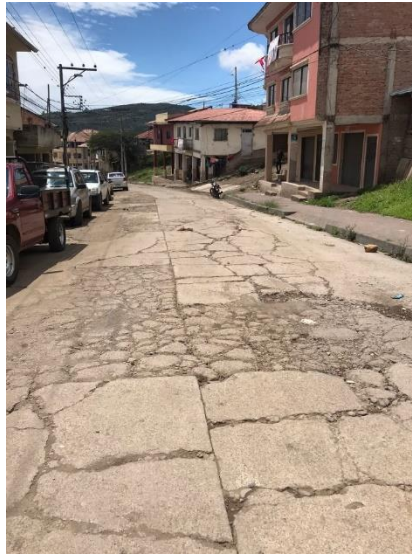


Anexo D

Toma de medidas para PCI, en Av. Rafael Galarza (flexible) y Av. Pasaje (Rígido):







Anexo E

Descargar aquí:

<https://drive.google.com/drive/folders/1oPZjP2zwpbUE11TgZH5B2bYPjD7lc1z3>

Anexo F

En esta parte se incluyen los resultados que INVEST determina para las dos alternativas de sostenibilidad analizadas.