

Evaluación de Impactos Ambientales del Consumo del Diésel en los Proyectos de Mejoramiento
de Vías Terciarias

Ing. Jairzinho Mauricio López Monroy

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Construcción Sostenible

Bogotá D.C.

Diciembre 10 de 2022

Evaluación de Impactos Ambientales del Consumo del Diésel en los Proyectos de Mejoramiento
de Vías Terciarias

Ing. Jairzinho Mauricio López Monroy

Ingeniero Ambiental - Especialista en Edificaciones Sostenibles

Directora de Trabajo de Grado:

Liliana Medina Campos

MSc LEED AP BD+C

Documento presentado para optar al grado de Máster en Construcción Sostenible.

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Construcción Sostenible

Bogotá D.C.

Diciembre 10 de 2022

“A la tierra que fueres, aprendiere de lo que vieres”

Francisco Monroy Urrego

“A mi madre, quien siempre me apoya con una caricia, con una palabra, con un platillo de
comida, con cualquier cosa, ella es mi fan número uno.

A Sandra Milena, y su mejor regalo de mi vida, una hija hermosa, Mariana, quienes con sus
besos y abrazos me hacen sentir su padre.

A mi familia, los que están y los que ya se fueron, y que ante cualquier cosa siempre me
acompañan.

A los amigos Marisol, Diego, Jorge, David, Patricia, Ana Milé, Daniela, Raúl, Johana,
Diana, Jairo, Juan, Carolina, Paola, Ricardo, Luisa, Sara, Aura, Alejandra, Bibiana, Camilo,
Rodrigo, Thatiana, Lorena, Carlos, Jhon, entre otros, que siempre son soporte cuando los
necesito.

A mis jefes y compañeros de trabajo por los espacios de tiempo y colaboración profesional.

A toda la comunidad universitaria, docentes, directivos, compañeros de maestría,
administrativos y operativos.

Gracias a todos”

Jairzinho Mauricio López Monroy

Resumen

Esta es una investigación que se realiza para optar al título de Máster en Construcción Sostenible de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, propende analizar los impactos ambientales del uso del diésel en la ejecución de un mejoramiento de vías terciarias en el territorio colombiano aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida, la cual se encuentra justificada a partir de la necesidad de minimizar los impactos negativos que deja la utilización de combustibles fósiles en el parque automotor y la maquinaria que se utiliza en la actividad constructiva en la infraestructura vial. Con este análisis se espera, generar conocimiento que apoye a dar cumplimiento a los compromisos gubernamentales que se han asumido en materia de cambio climático con la comunidad internacional y las políticas para tal fin que ya están establecidas en la legislación colombiana.

Este trabajo se realiza a partir de la recopilación de datos de tres proyectos de mejoramientos de vías terciarias en el Departamento de Santander en los municipios de Málaga, Rionegro y San Vicente de Chucurí, y en el que personal de campo realizó la toma de información durante la ejecución de los mismos, y con ella se realiza un análisis preliminar al análisis de ciclo de vida. En este análisis inicial, se encontró que aparte de las diferencias tecnológicas que tengan las máquinas y los vehículos, se debe tener en cuenta el entorno de la actividad constructiva con variables técnicas y operativas, como el tipo de terreno, la pendiente de la vía a mejorar, la altitud del sitio de obras, y factores como son la precipitación, la experiencia de los operadores y el método constructivo. Se evidenció de forma notoria que, en el proyecto de Rionegro, se reportaron 233 viajes de volqueta a la escombrera, debido a que varios tramos sufrieron afectación de las lluvias, y tuvieron que hacerse reprocesos de tendido y

compactado de material granular de subbase, mientras que, en San Vicente de Chucuri, solo se hicieron 44 viajes y tuvieron dos tramos con 60 centímetros de excavación.

El análisis de ciclo de vida, realizado con la herramienta Sima Pro, reportó las categorías de impactos a los ecosistemas, en la salud humana y en la obtención de recursos como las principales, encontrándose una correlación directa del impacto de la precipitación (lluvia) en cada sector de obra analizado, por la necesidad de reprocesos, así como la inexperiencia de los operadores de la maquinaria, incrementando las horas de trabajo de estas y por ende el consumo del combustible y los impactos evidenciados

El ACV generó como resultante, que el transporte del diésel a los frentes de obra solo representó menos del 2% con respecto al total de los impactos, mientras que el consumo de este combustible siempre estuvo por encima del 98%. En cuanto a los proyectos, el proyecto de Rionegro generó 125,46 GPt de los daños por efecto del cambio climático a la salud humana, a los ecosistemas y a los recursos, mientras que en los proyectos de Málaga y San Vicente de Chucuri generaron 27,33 y 72,78 GPt, respectivamente.

Se registró como resultante, que las emisiones atmosféricas están asociadas a las variables técnicas, ya que se demostró que el aumento de las mismas, está directamente relacionado con el aumento de la pendiente de los tramos que se intervienen y de la altitud donde se encuentra ubicado el proyecto. El espesor de la excavación no implicó mayor incidencia en la generación de emisiones, debido a que las diferencias de espesores son mínimas, y no representaron una variación en el rendimiento de la maquinaria.

Palabras Clave: Impactos ambientales, ACV, diésel, vías terciarias, emisiones, variable técnica, Santander, placa huella, maquinaria.

Tabla de contenido

Resumen.....	5
Tabla de contenido	7
Lista de Tablas	11
Lista de ilustraciones.....	14
Lista de anexos.....	22
1. Problema de investigación	23
1.1 Planteamiento del Problema	23
1.2 Justificación del Problema	30
1.3 Pregunta de Investigación	36
2. Objetivos	37
2.1 Objetivo General.....	37
2.2 Objetivos Específicos.....	37
3. Marco Referencial.....	38
3.1. Político	38
3.2. Económico	39
3.3. Social – Cultural	40
3.4. Ecológico - Ambiental	41
3.4.1. ¿Qué es el diésel y cómo se muestra en el país?.....	41
3.4.2. ¿Qué efectos tiene el diésel en el planeta?	44
3.4.3. ¿Qué se está haciendo?	45
3.5. Legal - Normativo.....	47

4.	Marco Teórico.....	53
5.	Metodología	62
6.	Los proyectos en estudio.....	64
6.1	Proyecto de mejoramiento vial del municipio de Málaga	65
6.1.1.	Suelos.....	66
6.1.2.	Topografía.....	68
6.1.3.	Diseño de pavimentos	72
6.1.4.	Diseño de obras complementarias	73
6.1.5.	Cantidades de obra.....	74
6.2	Proyecto de mejoramiento vial del municipio de Rionegro.....	75
6.2.1.	Suelos.....	76
6.2.2.	Topografía.....	77
6.2.3.	Diseño de pavimentos	85
6.2.4.	Diseño de obras complementarias	86
6.2.5.	Cantidades de obra.....	87
6.3	Proyecto de mejoramiento vial del municipio de San Vicente de Chucuri	87
6.3.1.	Suelos.....	89
6.3.2.	Topografía.....	90
6.3.3.	Diseño de pavimentos	98
6.3.4.	Diseño de obras complementarias	100
6.3.5.	Cantidades de obra.....	101
7.	Análisis de ciclo de vida del diésel	103
7.1	Definiciones del ACV.....	103

7.1.1	Alcance del ciclo de vida	103
7.1.2	Límites del análisis	103
7.1.3	Unidad funcional.....	104
7.1.4	Elección del modelo de ACV	104
7.1.5	Definición de la base de datos.	104
7.2	Insumos para el ACV	105
7.2.1	Datos de campo.....	105
7.2.2	Modificaciones de la base de datos de EcoInvent	106
7.3	Proceso de ejecución del ACV	108
7.3.1	Descripción del modelo	109
7.3.2	Inventario de datos del modelo	111
7.3.3	Determinación de los impactos	113
7.4	Inventario del ACV.....	115
7.5	Categorías de impacto que se analizarán en el ACV	118
7.6	Panorama de riesgos de los datos obtenidos para el ACV.....	120
7.7	Análisis de los datos obtenidos en campo.....	122
7.7.1	Cálculo de horas de trabajo de la maquinaria	122
7.7.2	Cálculo de las distancias recorridas por las volquetas	125
7.7.3	Cálculo de la cantidad de energía utilizada por la maquinaria	127
7.7.4	Cálculo de la cantidad de energía utilizada por las volquetas	137
7.7.5	Cálculo de la cantidad de toneladas de diésel por kilómetro dispuestas para su uso	144
7.8	Impactos ambientales obtenidos bajo la metodología del ACV	146

7.8.1	Impactos generados por el proyecto de Málaga.....	146
7.8.2	Impactos generados por el proyecto de Rionegro.....	150
7.8.3	Impactos generados por el proyecto de San Vicente de Chucurí.....	155
7.9	Análisis de los impactos ambientales obtenidos	160
7.9.1	Análisis de las categorías de impacto	160
7.9.2	Análisis específico del daño producido por la categoría de impacto cambio climático	162
7.9.3	Análisis de las emisiones atmosféricas emitidas	163
7.9.4	Análisis de las categorías de impacto ambiental por tramo ejecutado.....	166
7.9.5	Análisis del daño generado por el cambio climático por tramo ejecutado .	169
7.9.6	Análisis de las emisiones generadas por tramo ejecutado	171
7.9.7	Determinación de los rangos de máximos y mínimos de emisiones, daños e impactos	175
8.	Recomendaciones	178
9.	Conclusiones	183
	Bibliografía	186

Lista de Tablas

Tabla 1. Objetivos y actividades específicas justificantes de este estudio	36
Tabla 2. Categorías de impacto ambiental	55
Tabla 3. Tramos a intervenir en el municipio de Málaga-Santander	66
Tabla 4. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de Málaga-Santander.....	68
Tabla 5. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de Málaga-Santander	73
Tabla 6. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Málaga-Santander	75
Tabla 7. Tramos a intervenir en el municipio de Rionegro-Santander	75
Tabla 8. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de Rionegro-Santander.....	77
Tabla 9. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de Rionegro-Santander	86
Tabla 10. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Rionegro-Santander	87
Tabla 11. Tramos a intervenir en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander	88
Tabla 12. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander	89
Tabla 13. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de San Vicente de Chucuri-Santander	100
Tabla 14. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Rionegro-Santander	102
Tabla 15. Probabilidad del riesgo	120

Tabla 16. Impacto del riesgo.....	120
Tabla 17. Valoración del riesgo	120
Tabla 18. Categorización del riesgo.....	121
Tabla 19. Matriz de riesgos.....	121
Tabla 20. Comparación de variables técnicas con el consumo de combustible en cada proyecto.	133
Tabla 21. Volumen de diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en centímetros cúbicos.	135
Tabla 22. Diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en términos de masa.	136
Tabla 23. Diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en términos de energía.	137
Tabla 24. Total de recorridos efectuados por las volquetas en cada tramo de cada proyecto. ...	138
Tabla 25. Distancia total recorrida por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.	141
Tabla 26. Diésel consumido en términos de volumen por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.....	143
Tabla 27. Diésel consumido en términos de energía por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.....	144
Tabla 28. Distancia de la refinería de Barrancabermeja a cada frente de trabajo de cada proyecto.	145
Tabla 29. Cálculo de la tasa de carga de combustible por cada tramo de cada proyecto.	146
Tabla 30. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Málaga.....	149
Tabla 31. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Málaga.....	150
Tabla 32. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.	153
Tabla 33. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.	154

Tabla 34. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.	158
Tabla 35. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de San Vicente de Chucurí.....	159
Tabla 36. Valoración de los impactos en cada uno de los proyectos estudiados.....	160
Tabla 37. Valoración de los impactos asociados al cambio climático en los proyectos de mejoramiento vial.	163
Tabla 38. Compuestos emitidos a la atmósfera por la ejecución de los tres proyectos de mejoramiento vial.	164
Tabla 39. Impactos ambientales generados por cada tramo intervenido.	168
Tabla 40. Daños por el cambio climático generados por cada tramo intervenido.	170
Tabla 41. Emisiones generadas en cada uno de los tramos.	174
Tabla 42. Rangos calculados de impactos, daños y emisiones en los mejoramientos de un kilómetro de vía terciaria en Colombia	177

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Relación de las políticas que aplican a la investigación	38
Ilustración 2. Evolución del precio del diésel en Bogotá.....	39
Ilustración 3. Sección tipo de una placa huella.....	58
Ilustración 4. Proceso de mejoramiento vial.....	60
Ilustración 5. Balance de insumos e impactos ambientales en el proceso de construcción de una vía.....	61
Ilustración 6. Proceso de toma de datos	62
Ilustración 7. Ubicación de los tramos del proyecto de Málaga-Santander.....	66
Ilustración 8. Toma de muestras de suelos en los tramos del proyecto de Málaga-Santander	67
Ilustración 9. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de Málaga-Santander	69
Ilustración 10. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de Málaga-Santander.....	69
Ilustración 11. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de Málaga-Santander	70
Ilustración 12. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de Málaga-Santander.....	70
Ilustración 13. Perfil longitudinal del tramo 3 del proyecto de Málaga-Santander	71
Ilustración 14. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de Málaga-Santander.....	72
Ilustración 15. Corte de la estructura de pavimento para el proyecto de Málaga-Santander.....	73
Ilustración 16. Planta de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Málaga- Santander.....	74
Ilustración 17. Corte A-A´ de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Málaga- Santander.....	74
Ilustración 18. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de Rionegro-Santander	77

Ilustración 19. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de Rionegro-Santander	78
Ilustración 20. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de Rionegro-Santander	78
Ilustración 21. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de Rionegro-Santander	79
Ilustración 22. Perfil longitudinal del tramo 3 del proyecto de Rionegro-Santander	79
Ilustración 23. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de Rionegro-Santander	80
Ilustración 24. Perfil longitudinal del tramo 4 del proyecto de Rionegro-Santander	80
Ilustración 25. Imagen de planta del tramo 4 del proyecto de Rionegro-Santander	81
Ilustración 26. Perfil longitudinal del tramo 5 del proyecto de Rionegro-Santander	81
Ilustración 27. Imagen de planta del tramo 5 del proyecto de Rionegro-Santander	82
Ilustración 28. Perfil longitudinal del tramo 6 del proyecto de Rionegro-Santander	82
Ilustración 29. Imagen de planta del tramo 6 del proyecto de Rionegro-Santander	83
Ilustración 30. Perfil longitudinal del tramo 7 del proyecto de Rionegro-Santander	83
Ilustración 31. Imagen de planta del tramo 7 del proyecto de Rionegro-Santander	84
Ilustración 32. Perfil longitudinal del tramo 8 del proyecto de Rionegro-Santander	84
Ilustración 33. Imagen de planta del tramo 8 del proyecto de Rionegro-Santander	85
Ilustración 34. Corte de la estructura de pavimento para el proyecto de Rionegro-Santander.....	85
Ilustración 35. Planta de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Rionegro-Santander.....	86
Ilustración 36. Corte de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Rionegro-Santander.....	87
Ilustración 37. Ubicación de los frentes en el proyecto de Rionegro-Santander	88
Ilustración 38. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	90

Ilustración 39. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	90
Ilustración 40. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	91
Ilustración 41. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	91
Ilustración 42. Perfil longitudinal del tramo 3 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	92
Ilustración 43. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	92
Ilustración 44. Perfil longitudinal del tramo 4 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	92
Ilustración 45. Imagen de planta del tramo 4 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	93
Ilustración 46. Perfil longitudinal del tramo 5 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	93
Ilustración 47. Imagen de planta del tramo 5 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	94
Ilustración 48. Perfil longitudinal del tramo 6 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	94
Ilustración 49. Imagen de planta del tramo 6 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	95

Ilustración 50. Perfil longitudinal del tramo 7 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	95
Ilustración 51. Imagen de planta del tramo 7 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	96
Ilustración 52. Perfil longitudinal del tramo 8 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	96
Ilustración 53. Imagen de planta del tramo 8 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	97
Ilustración 54. Perfil longitudinal del tramo 9 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	97
Ilustración 55. Imagen de planta del tramo 9 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	98
Ilustración 56. Corte de la estructura de pavimento para los tramos 1, 2, 5, 6, 7, 8 y 9 el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	99
Ilustración 57. Corte de la estructura de pavimento para los tramos 3 y 4 el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	100
Ilustración 58. Planta de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	101
Ilustración 59. Corte de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander	101
Ilustración 60. Proceso de construcción de una vía	103
Ilustración 61. Proceso de modificación de un material en SimaPro	107
Ilustración 62. Captura de pantalla de la creación del proyecto en SimaPro	110

Ilustración 63. Captura de pantalla de la selección de la base de datos de EcoInvent.....	110
Ilustración 64. Captura de pantalla de la selección del proceso en SimaPro	111
Ilustración 65. Estructura de manejo de la información en el programa de simulación.....	112
Ilustración 66. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos por proyecto.....	112
Ilustración 67. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos por tramo de cada proyecto.....	113
Ilustración 68. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos con las materias primas y procesos de cada uno.	113
Ilustración 69. Captura de pantalla de la creación de un módulo de cálculo en el software SimaPro.....	114
Ilustración 70. Captura de pantalla de un ejemplo de la gráfica de árbol.....	114
Ilustración 71. Captura de pantalla de un ejemplo de la gráfica de magnitud de impactos ambientales	115
Ilustración 72. Formato de ficha técnica del equipo	116
Ilustración 73. Formatos de toma de datos en campo.....	117
Ilustración 74. Personal en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander inspeccionado una retroexcavadora.....	117
Ilustración 75. Motoniveladora trabajando en el municipio de Málaga-Santander	118
Ilustración 76. Motoniveladora trabajando en el municipio de Rionegro-Santander	118
Ilustración 77. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de Málaga-Santander.....	123
Ilustración 78. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de Rionegro-Santander.....	124
Ilustración 79. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de San Vicente de Chucurí- Santander.....	124

Ilustración 80. Comparación de las distancias recorridas por las volquetas en cada proyecto...	126
Ilustración 81. Comparación de la cantidad de viajes realizados por las volquetas en cada proyecto.....	127
Ilustración 82. Comparación del consumo de combustible por hora de trabajo de la maquinaria en cada proyecto	128
Ilustración 83. Año de fabricación de la maquinaria en cada proyecto	129
Ilustración 84. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de Málaga.	129
Ilustración 85. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de Málaga.....	130
Ilustración 86. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de Rionegro.....	130
Ilustración 87. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de Rionegro.....	131
Ilustración 88. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de San Vicente de Chucurí.....	131
Ilustración 89. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de San Vicente de Chucurí	132
Ilustración 90. Comparación del consumo de combustible de las máquinas en cada proyecto..	133
Ilustración 91. Comparación grafica del consumo de combustible de las máquinas en cada proyecto.....	134
Ilustración 92. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de Málaga.	138
Ilustración 93. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de Rionegro.	139
Ilustración 94. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de San Vicente de Chucurí.	140

Ilustración 95. Distancias totales recorridas por las volquetas en todos los proyectos.....	141
Ilustración 96. Consumo total de diésel por los recorridos de las volquetas en cada proyecto. .	143
Ilustración 97. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de Málaga.	147
Ilustración 98. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de Málaga.	148
Ilustración 99. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de Málaga.	150
Ilustración 100. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de Rionegro.	151
Ilustración 101. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de Rionegro.	152
Ilustración 102. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de Rionegro.....	154
Ilustración 103. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de San Vicente de Chucurí.	156
Ilustración 104. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de San Vicente de Chucurí.	157
Ilustración 105. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de San Vicente de Chucurí.	159
Ilustración 106. Valoración de las categorías de impacto en los proyectos de mejoramiento vial.	161

Ilustración 107. Valoración de los impactos ambientales efectuados por el cambio climático por la ejecución de proyectos de mejoramiento vial.	162
Ilustración 108. Participación de los proyectos de mejoramiento vial en la generación de impactos ambientales.	163
Ilustración 109. Geoceldas utilizadas en la construcción de vías.	181

Lista de anexos

Anexo 1. Distancia de los frentes de obra.....	195
Anexo 2. Cantidades de materiales por frente de obra	196
Anexo 3. Datos para cargue en el software.....	197
Anexo 4. Parámetros de base de la actividad “TRANSPORTE COMBUSTIBLE A FRENTE DE TRABAJO COL”	198
Anexo 5. Parámetros de base de la actividad “DIESEL, CONSUMIDO EN MOTORES DE MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN CO”	199
Anexo 6. Inventario de emisiones del proyecto de Málaga	200
Anexo 7. Inventario de emisiones del proyecto de Rionegro	201
Anexo 8. Inventario de emisiones del proyecto de San Vicente de Chucurí	202
Anexo 9. Protocolo de toma de datos	203
Anexo 10. Formatos de trabajo diligenciados.....	204

1. Problema de investigación

1.1 Planteamiento del Problema

Las dinámicas sociales y económicas de una nación requieren de mecanismos de conexión que faciliten la interacción entre las diferentes comunidades y asentamientos urbanos. Por esta razón, las carreteras son uno de los mecanismos de conexión más utilizados entre los asentamientos urbanos con las zonas rurales, y por medio de estas, los productos que se generan en cada uno de ellos llegan a las otras zonas en comunicación. Así, este mecanismo en un país como Colombia se destaca a nivel de, como estrategia de comunicación más usado y estas vías terrestres sirven para que las ciudades tengan una seguridad alimentaria, provista por el campo, y las comunidades rurales, tengan acceso a servicios que se ven comúnmente en las urbes, como la salud, la educación y la tecnología.

En Colombia, existen tres tipos de vías, las primarias que conducen grandes centros poblados, y son totalmente pavimentadas, con algunos tramos en mantenimiento y con un gran esfuerzo gubernamental por ser de tipología de doble calzada. Las secundarias que generalmente comunican centros poblados de importancia regional con las capitales de departamento y son pavimentadas, pero con una sola calzada de doble sentido. Y por último las vías terciarias, son aquellas que generalmente están sin pavimento, y comunican tanto diferentes centros poblados como las zonas rurales con las pequeñas urbes.

El régimen bimodal de lluvias, la orografía del país, y el tipo de materiales usados en el afirmado de las vías terciarias, elevan el nivel de mantenimiento que necesita esta red de comunicación, la cual está a cargo de los entes territoriales de orden municipal o departamental.

Estos entes, manejan presupuestos precarios, y que tienen que compartirse con rubros importantes dentro del manejo gubernamental, como lo son la educación y la salud, y por todo esto, los mantenimientos que se realizan en las vías a su cargo se refieren únicamente a la identificación de los puntos críticos y el posterior mejoramiento con el sistema constructivo de placa huella.

Las placas huellas son unos sistemas de pavimentación de vías de bajo tránsito, en el cual se pavimentan únicamente las huellas por donde transita un vehículo y la separación de estas franjas se realiza con concreto ciclópeo, que es la mezcla de concreto con rocas distribuidas adecuadamente. Adicionalmente, se le hacen algunas estructuras hidráulicas como cunetas, bordillas y alcantarillas, para asegurar la dinámica hidráulica bajo el escenario de las lluvias, y también estructuras de contención de taludes, por si se presentan eventos de remoción en masa que afecte la vía (Orobio & Orobio, 2016).

Ahora bien, al revisar estos procedimientos constructivos, en los cuales se debe, para su trazado y construcción, generar afectación al entorno, se puede intuir diferentes impactos en los ecosistemas, así como afectaciones en las actividades de mejoramiento de estas vías. Impactos que alteren el paisaje de manera agresiva, por ejemplo, como el retiro de cobertura vegetal, cortes en el suelo y subsuelo para la obtención de materiales, modificación de la dinámica natural de las aguas, entre otros impactos ambientales relacionados con la maquinaria, la obtención de recursos y los procesos constructivos.

Como se refiere, el uso de las maquinarias requiere de una fuente energética, que en su gran mayoría utilizan el combustible diésel para su funcionamiento, permitiendo así entrever, que al ser este combustible derivado de fuente fósil, en su combustión, generará gases

contaminantes, que como impacto asociado a la actividad de mejoramiento de vías terciarias, puede ser evaluado y cuantificado, asociando estas emisiones al detrimento de la calidad del aire.

En Colombia se han generado lineamientos para establecer el mejoramiento de la calidad del aire, como es el documento CONPES 3943 (Departamento Nacional de Planeación, 2018a), que es la política relacionada al tema y en la que se plantean objetivos, de los cuales se transcriben a continuación los siguientes:

- *“Proponer acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire a través de la renovación y modernización del parque automotor.*
- *Reducir del contenido de azufre en los combustibles.*
- *Implementar mejores técnicas y prácticas en la industria*
- *Optimizar de la gestión de la información.*
- *Fomentar el desarrollo de la investigación, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire”* (Departamento Nacional de Planeación, 2018a)

En cuanto a las emisiones, Colombia posee como instrumento regulatorio la Resolución 762 de 2022 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la cual se reglamentan los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, y en el cual se incluye una nueva tipología que se nombra como *fuentes móviles terrestres de uso fuera de carretera*, y que se define como *“máquina móvil, un equipo transportable o un vehículo con o sin carrocería o con o sin ruedas, que cuenta con un motor de combustión interna, que no ha sido diseñado para el transporte de pasajeros o de mercancías por carretera”* (Minambiente, 2022c).

La generación de emisiones de gases efecto invernadero, es referida en la política CONPES 3943 (Departamento Nacional de Planeación, 2018a), como impacto ambiental, y que pueden ser evaluadas a partir del establecimiento de parámetros para determinar la calidad del combustible diésel, describiéndolas como se refiere a continuación:

- *“El contenido de azufre que se asocia con la emisión de material particulado y óxidos de azufre.*
- *El nivel de cetano que determina la rapidez de encendido del motor, que entre más elevado sea el número, mejora la combustión y reduce las emisiones.*
- *Hidrocarburos aromáticos y benceno, que aumentan el índice de cetano, pero representan el mayor porcentaje de las emisiones tóxicas.*
- *La volatilidad que determina las emisiones por evaporación.*
- *La densidad del combustible diésel que representa mayor emisión de humo negro y material particulado”.* (Departamento Nacional de Planeación, 2018a)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE, recomienda que se debe conocer el estado actual del entorno natural y contar con medios consistentes y confiables para medir los cambios que en él se producen, por la combustión del diésel y la generación de gases contaminantes, refiriendo que en Colombia, los vehículos que utilizan el diésel son responsables del 78% de las emisiones, y de ellos, los vehículos pesados son responsables del 80% de las emisiones de material particulado, así como del 60% de las emisiones de NO_x, 65% de óxidos de azufre y 50% de emisiones de CO. (Departamento Nacional de Planeación, 2018a)

Adicionalmente, debe considerarse que Colombia incrementó durante la COP 26 realizada en octubre de 2021, sus metas de reducción de la Contribución Determinada a nivel

Nacional-CDN (NDC por su sigla en inglés), de un 20 al 51% para 2030, meta que bien puede ser apoyada desde el sector vial, específicamente en las vías terciarias (Minambiente, 2021).

En relación con las vías terciarias, Colombia cuenta con 142.284 kilómetros construidos, de los cuales el 75% de ellas están en mal estado, representando para el año 2019 una inversión de más de 43 mil millones de pesos del presupuesto nacional (Schwab & Zahidi, 2020), por lo que la generación de información específica sobre las emisiones generadas en estos procesos constructivos, que a la fecha, para las vías terciarias no está establecidas, permitiría evaluar desde los entes relacionados, acciones que deriven en la descarbonización de esta actividad, como se plantea en la estrategia 2050 (Gobierno de Colombia, 2021).

Las vías terciarias, soportan el desarrollo, facilitando que las comunidades establecidas en áreas rurales puedan llevar sus productos a los centros de acopio, y acceder a mejores servicios públicos como la salud y la educación. El fortalecimiento y mejoramiento de la red vial, así como las dinámicas económicas fueron referidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, y la sostenibilidad como eje dinamizador, plantean una intervención de más de 15.000 kilómetros de vías terciarias como mecanismo de integración del territorio, que acorde a las metas de la Estrategia 2050, podrían ser desarrolladas con menores impactos y menores emisiones de tenerse información que permita toma de decisiones por los entes de gobierno (Departamento Nacional de Planeación, 2018b).

En relación con los avances en inventario de emisiones asociadas de forma indirecta al sector de mejoramiento vial, el Ministerio de Ambiente realizó el inventario de emisiones de fuentes móviles de uso fuera de carretera en Colombia, en el cual se definió que las fuentes móviles fuera de ruta utilizan diésel en el 90,89% del total nacional de máquinas destinadas para la construcción, la agricultura y la industria en general; y además, que las fuentes móviles fuera

de ruta, utilizadas en la construcción aportaron en el 2018 más de dos mil toneladas de PM₁₀ y más de dos millones de toneladas de CO₂, en todo el país (Minambiente, 2022b). Cabe resaltar que desde el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, en el año 2020, generó su Política de Sostenibilidad para la Infraestructura del Transporte, donde se hace referencia a la necesidad de generación de conocimiento frente a impactos ambientales, emisiones, integración con la comunidad y otros que permitan solucionar distintas situaciones desde el enfoque de la sostenibilidad (INVIAS, 2020).

Frente a instancias de orden urbano, la Secretaría Distrital de Ambiente del Distrito Capital - SDA, generó el inventario de emisiones para el 2018, documentando emisores y volúmenes, incluyendo la maquinaria amarilla como fuentes móviles fuera de ruta, y determinó que esta categoría generó 450 toneladas de PM₁₀, 5457 toneladas de NO_x y 2858 toneladas de CO. (Secretaria de Ambiente, 2018).

Por otra parte, en la ciudad de Medellín, por medio del Área Metropolitana del Valle del Aburra, se generó el inventario de emisiones, también en 2018, en el cual incluye la maquinaria fuera de ruta, y propone una metodología de cálculo de emisiones contaminantes a partir de referentes europeos y norteamericanos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018).

Desde instancias como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible - CCCS, organización que lidera temáticas de sostenibilidad para el sector edificatorio, el cual utiliza maquinaria amarilla similar a la utilizada en el sector vial, se ha mencionado la necesidad de información más detallada sobre las características de la maquinaria, y la intensidad de uso (en este caso específico, por tipo de edificación), para poder analizar alternativas que generen una menor huella de carbono (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2022), principal gas de efecto invernadero, refiriendo así un desconocimiento que permita establecer medidas de

mitigación y una necesidad de generación de conocimiento para el sector. Puntualmente, esta institución no se refiere a la actividad constructiva que se realiza en las vías o en la infraestructura en general, y esto se asume a que la tendencia mundial es enfatizar la construcción a la generación de espacios habitados y no se realiza una tasación aparte para los impactos generados por la construcción de vías o infraestructura. Sin embargo, algunas agencias internacionales identifican únicamente como impacto ambiental, las emisiones atmosféricas generadas por la maquinaria *Off Road*, y como ejemplo, se observa lo cuantificado en Europa, que una cuarta parte de las emisiones de material particulada de los vehículos en el continente, es generada por esta maquinaria (Cassidy Shell, 2022). Adicionalmente, el documento CONPES 3919, que se refiere a la Política Nacional de Edificaciones Sostenibles, indica que la construcción en Colombia, aporta el 15% de las emisiones de gases efecto invernadero, y a nivel mundial, el aporte es del 30% (DNP, 2018). Cabe aclarar que esta política habla generalidades de la construcción, enfocado a las edificaciones, y como la mayoría de documentos a nivel mundial no refieren un concepto aparte a la construcción de vías e infraestructura para el transporte.

Adicional a los impactos ambientales, se suma el factor económico referido al rubro del consumo del diésel para la maquinaria utilizada, considerando la logística requerida para llevar este tipo de combustibles a las zonas más remotas de nuestro país, en donde se realizan estos mejoramientos viales, inversión que ha sido alrededor de 3,7 billones de pesos en el último cuatrienio, estando en este momento 10.670 kilómetros en intervención de un total de 142mil kilómetros lineales (Urrego, 2021).

Se resume, así como problema, un desconocimiento de los impactos asociados a la actividad de mejoramiento de vías terciarias, con un interés en la generación de emisiones de

gases efecto invernadero asociados al uso de maquinaria amarilla y otros equipos, que permita proveer un conocimiento útil para una posible toma de decisiones desde el sector gubernamental.

1.2 Justificación del Problema

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida – ACV, permite no solo la identificación, sino la cuantificación de impactos que facilitan evidenciar cómo es el comportamiento de los diversos fenómenos ambientales que afectan la habitabilidad en el planeta. Además de esto, es la herramienta más eficiente y usada para la determinación de impactos ambientales y los datos expuestos sirven de referencia para diferentes instancias investigativas, referidas también al sector vial, permitiendo identificar los impactos ambientales, emisiones y relación con riesgos, como lo exponen Zanetti y Farina en su estudio relacionado con las emisiones identificadas con la metodología ACV para procesos de construcción con pavimento asfáltico (Zanetti & Farina, 2022).

La aplicación de la metodología del ACV para la identificación y cuantificación de impactos ambientales y como refirió una estimación de los asociados al uso del diésel, es una necesidad, si se toma en cuenta la información suministrada por la Secretaria Distrital de Ambiente del Distrito Capital, la maquinaria amarilla aportó el 8% de las emisiones totales de PM2.5 entre 2014 y 2018, comparado con el 5% de los hornos ladrilleros y el 2% de las calderas de carbón (Secretaria de Ambiente, 2018).

Desde el sector vehicular, el país ha enfocado sus esfuerzos a identificar las emisiones de fuentes móviles, refiriendo para el sector transporte, emisiones de más de 30 mil toneladas de óxidos de nitrógeno (NOx), representando para el sector de carga 10 mil toneladas y para el vehicular de pasajeros 20 mil toneladas, todo esto en el año 2018 (Secretaria de Ambiente, 2018). En esta misma cuantificación, la SDA cataloga la maquinaria de construcción como

fuentes móviles fuera de la carretera, u *Off Road* según estándares internacionales (Secretaria de Ambiente, 2018), generando casi 5.500 toneladas de los mismos óxidos de nitrógeno antes mencionados. Sin embargo, no se encuentra una referencia de cuantificación o inventario para los demás equipos utilizados en los procesos constructivos de infraestructura, específicamente la infraestructura vial, tales como mezcladores de concreto, vibradores, plantas eléctricas, entre otras (Secretaria de Ambiente, 2018).

Desde las instituciones internacionales también se realizan esfuerzos por identificar los impactos ambientales de la construcción de vías y de forma específica la problemática del consumo de combustible y sus efectos en diferentes actividades económicas, como el transporte y la construcción.

Det Norske Veritas DNV, empresa certificadora con sede en Noruega, en el documento llamado *Pathway to Net Zero*, o en español, *El Camino Hacia Emisiones Cero*, presenta un informe de revisión de la transición energética para 2021, y en el muestra que para el año 2019 se emitieron 44 giga toneladas de CO₂, las cuales proyectan que se reduzcan a 23 giga toneladas en 2050, pero con el atenuante de que el sector de transporte deba hacer reducciones en más del 80% del que se genera en la actualidad, pasando de 8.9 a 1.7 giga toneladas de CO₂ emitidas (DNV, 2021).

Por otra parte, el Programa Ambiental de las Naciones Unidas en su reporte llamado *2021 Global Status Report For Buildings And Construction*, informa que en el año 2015 las emisiones generadas por la construcción y operación de edificios fue el responsable de 13,1 GT de CO₂, y que en 2019 aumentó a 13.4 GT de CO₂, representando más del 38% de las emisiones totales anuales de este gas de efecto invernadero. De una forma positiva, el mismo reporte refiere que en 2020 las emisiones de CO₂ se redujeron en casi un 10% por la reducción de demanda de

energía eléctrica y a los esfuerzos de descarbonización del sector eléctrico (Naciones Unidas, 2021).

Del Pero, en la Conferencia Internacional sobre Análisis de Estrés, AIAS 2018, refirió los resultados de su análisis de ciclo de vida de los vehículos de motor a gasolina comparado con los vehículos motorizados por baterías de litio, análisis enmarcado en los límites de la cuna a la tumba, encontrando que un solo vehículo de motor de combustión interna genera más de 30 toneladas de CO₂eq., comparados con las casi 19 toneladas de CO₂eq., que generaría un vehículo eléctrico, tomando en cuenta que en el uso del mismo, el vehículo eléctrico no generaría este compuesto aportante al cambio climático (Pero et al., 2018).

Martínez González refiere que la mayor preocupación en la combustión de los derivados del petróleo es el azufre presente en ellos, ya que durante el proceso de combustión el azufre se convierte en óxidos de azufre, impactando directamente en la atmósfera, generando la lluvia ácida, y por ende la acidificación de suelos y aguas, como también puede generar emisiones de ácido sulfúrico e impactando a la salud pública directamente (Martínez González et al., 2011). Adicionalmente, la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), referencia que el 2% del combustible diésel se convierte en emisiones directas de SO_x NO_x y MP, donde el más preocupante es el material particulado por su núcleo en carbono y una mezcla de SO_x y agua, aumentando los niveles cancerígenos en la población humana (Sydbom et al., 2001).

Por otra parte, se han estimado las muertes atribuidas a las emisiones excesivas de los óxidos nitrosos NO_x, las cuales para el año 2015, se tuvieron más de 100 mil muertes asociadas puntualmente a las emisiones de estos compuestos por la combustión de combustibles pétreos en vehículos, de los cuales el 26% fueron por emisiones de camiones y buses, y principalmente en

China, EEUU e India., pero en EEUU se calculó que la proporción de incidencia de los vehículos pesados es 10 veces mayor a la de los vehículos pequeños (Anenberg et al., 2017).

En el país, se han realizado estudios referidos al diésel, como en el uso de los combustibles en la ciudad de Ibagué, capital del Departamento del Tolima, en el cual se analizaron las ventas de combustibles fósiles en el año 2017, y se calcularon las emisiones de gases efecto invernadero, determinando que la capital musical de Colombia emitió en ese año 221 giga gramos ($1 \text{ Gg} = 10^9 \text{ g}$) de CO_2 , por el consumo de vehículos diésel (Andrade Castañeda et al., 2017).

En China, se realizó un estudio que buscaba encontrar la eficiencia de las medidas gubernamentales de construcción sostenible, y encontraron que en un consenso, los proyectos de construcción en vías tienen una relación más estrecha entre el medio ambiente y la propia actividad constructiva, y en el mismo queda demostrado por medio de entrevistas a un número determinado de contratistas de la construcción el desconocimiento de los impactos de la construcción de vías y las medidas de mitigación y/o remediación de los mismos (Shang et al., 2022).

A propósito de contaminantes en la construcción vial, Ghorbani Mooselu en 2022, analiza la vulnerabilidad de los cuerpos de agua en la construcción de carreteras, donde encontró que la construcción de vías contribuye con la emisión de diferentes contaminantes, incluidos el aporte de sólidos en las aguas, metales, hidrocarburos como el petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), todo esto por medio de la ubicación de 48 estaciones de medición de contaminantes en un río que estaba adjunto a la construcción de una vía en Noruega, y estas mostraron que el índice de calidad de agua de este río se vio seriamente afectado durante todo el periodo constructivo (Mooselu et al., 2022).

Para continuar con esta temática, en Italia unos investigadores por medio del ACV, demostraron la influencia de las emisiones atmosféricas producto de la aplicación de pavimentos flexibles en la rodadura de una vía, y su influencia en la salud humana, donde se demostró que estos tienen un aumento a la exposición de sustancias cancerígenas entre 2,9 y 3,5 más veces que otro trabajador de la construcción (Zanetti & Farina, 2022).

Y por último, bajo otro escenario de la determinación de impactos en la construcción de vías, se encontró por medio de investigadores que la pavimentación de vías, genera fenómenos aportantes al calentamiento global, debido a fenómenos como la pérdida de cobertura vegetal, y la generación de una *isla de calor*, a partir de la radiación solar refractada en estas cintas de pavimento ya sean flexibles o rígidas, y en el que proponen el diseño de pavimentos permeables, para minimizar otros fenómenos hidráulicos, que afectan el paisaje, aumentan la velocidad de escorrentía y por ende un más alto riesgo de erosión del suelo (Singh et al., 2022).

Por todo lo anterior, se hace necesaria la generación de conocimiento referente a impactos ambientales, como resultante de la aplicación de la metodología del análisis de ciclo de vida, que en referencia a la actividad de mejoramiento de vías y específicamente al combustible asociado a las maquinarias utilizadas permita evidenciar variaciones en los impactos y en las emisiones referidos a la geomorfología, tipo y calidad de suelos, y a la variación en la altura sobre el nivel del mar, como aporte a las metas planteadas por el país para la descarbonización.

La generación de conocimiento frente a los impactos y emisiones por el uso del diésel en los procesos de construcción y mejoramiento vial en Colombia permitiría un cambio del paradigma que refirió Víctor Muñoz, Alto Consejero Presidencial para la Innovación y la Transformación Digital, durante la inauguración del Centro de Cuarta Revolución Industrial del Foro Económico Mundial, en la ciudad de Medellín en 2019: “la metodología de construcción

vial en Colombia es tradicionalista en sus procesos y en la implementación de tecnologías para la optimización de estos”, ya que se aportaría al cambio de lo tradicional a un futuro escenario de la actividad de construcción vial, con menores impactos (Suárez, 2019), fortaleciendo el “Desarrollo rural resiliente al clima y bajo en carbono” como lo refiere la Política Nacional de Cambio Climático. (Minambiente, 2017a)

La generación de información base sobre gases contaminantes asociados a las actividades de construcción vial, ha sido incorporado por el Instituto Nacional de Vías - INVIAS, en su Política de Sostenibilidad para la Infraestructura del Transporte, política socializada en el año 2019, mencionando que se busca contribuir con el desarrollo sostenible a partir de cuatro ejes estratégicos: la reducción de gases efecto invernadero, el optimizar el uso de los recursos naturales, asegurar las estrategias de sostenibilidad a nivel institucional y generar prácticas constructivas y operativas dentro de toda la infraestructura del transporte (INVIAS, 2020).

El INVIAS, identificó como problemática dentro de una base identificada, los siguientes puntos esenciales (INVIAS,2020):

- *“Prácticas constructivas y operativas no amigables con los recursos naturales y el entorno, aplicadas en los proyectos de infraestructura de transporte.*
- *Desarrollo de infraestructura de transporte sin considerar la comunidad y su entorno.*
- *Debilidades en la capacidad institucional y en la coordinación interinstitucional para la adopción del enfoque de sostenibilidad.*
- *Desactualización tecnológica en la construcción y operación de infraestructura de transporte a cargo de INVIAS” (INVIAS, 2020).*

Como planteamiento de iniciativas investigativas, el instituto refiere:

OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDAD
Incorporar <i>critérios de sostenibilidad en el ciclo de vida</i> de los proyectos de infraestructura de transporte	Elaborar un estudio para el <i>análisis de ciclo de vida</i> para un proyecto piloto de infraestructura vial.
Fomentar el desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación aplicadas a proyectos de infraestructura de transporte	Elaborar propuesta para <i>cuantificar las emisiones de gases en la construcción de la infraestructura de transporte</i>

Tabla 1. Objetivos y actividades específicas justificantes de este estudio

Fuente: (INVIAS, 2020)

Como se evidencia, la política recomienda la metodología de ACV, para la incorporación de criterios de sostenibilidad, que, desde la identificación de los impactos ambientales, puede aportar conocimiento para esta necesidad, así como a través de la misma metodología, aportar con la cuantificación de las emisiones de gases, alineándose el presente proyecto con la necesidad de la institución.

1.3 Pregunta de Investigación

¿Existen diferencias en los impactos ambientales en el mejoramiento de un kilómetro de vía terciaria, con el método de placa huella, a diferentes alturas sobre el nivel del mar, condiciones de terreno y condiciones atmosféricas, destacando impactos producto del uso del diésel por la maquinaria y otros equipos utilizados, que provean conocimiento y permitan la futura evaluación y planteamiento de estrategias de mitigación por parte del sector constructor gubernamental?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales en el mejoramiento de vías terciarias con variaciones técnicas y con énfasis en impactos derivados del uso del combustible utilizado por los equipos de construcción requeridos para la actividad referida.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los impactos ambientales resultantes del ACV en cada uno de los proyectos de mejoramientos viales.
- Comparar los impactos ambientales resultantes del ACV, a partir de las variaciones técnicas en cada uno de los proyectos.
- Establecer la cuantificación de las emisiones de gases efecto invernadero para cada uno de los casos con las variaciones técnicas.
- Determinar un rango de emisiones para la actividad de mejoramiento vial para dos tipologías de suelos.
- Evidenciar alternativas de minimización de los impactos ambientales.

3. Marco Referencial

3.1. Político

En cuanto a las políticas que aplican para esta investigación y que se mencionan a lo largo de este escrito, se tienen las siguientes descritas:

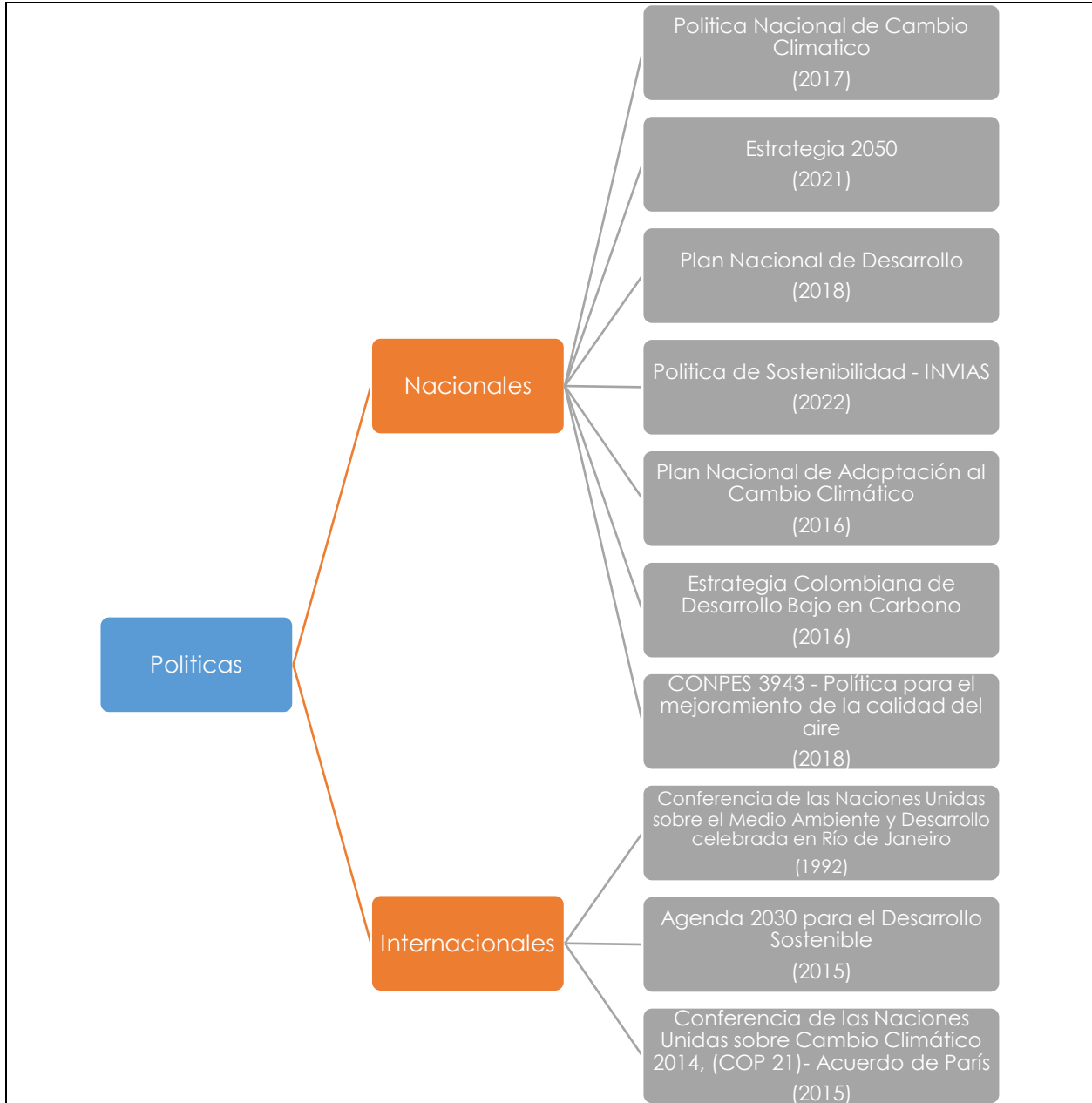


Ilustración 1. Relación de las políticas que aplican a la investigación

Fuente: Elaboración propia

3.2. Económico

En Colombia, los precios del combustible han sido un referente para todas las actividades productivas, sin distinción de tipo, clase, ubicación u otro factor, debido a que todas utilizan de algún modo los combustibles fósiles para sus procesos productivos, transporte de materias primas, transporte de sus productos, entre otras actividades. Por tal razón, se analizan primero los datos entregados por el Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano -SIPG, organismo adscrito a la Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, quien entrega un informe histórico de precios del diésel en la ciudad de Bogotá, y se observa que en el año 2004, el precio de un galón de combustible valía \$3.065, y que para el año 2021, este ya subió a \$8.403 el galón, lo que equivale a un aumento del 274% (Unidad de Planeación Minero Energética, 2021). Esta evolución del precio se muestra a continuación:

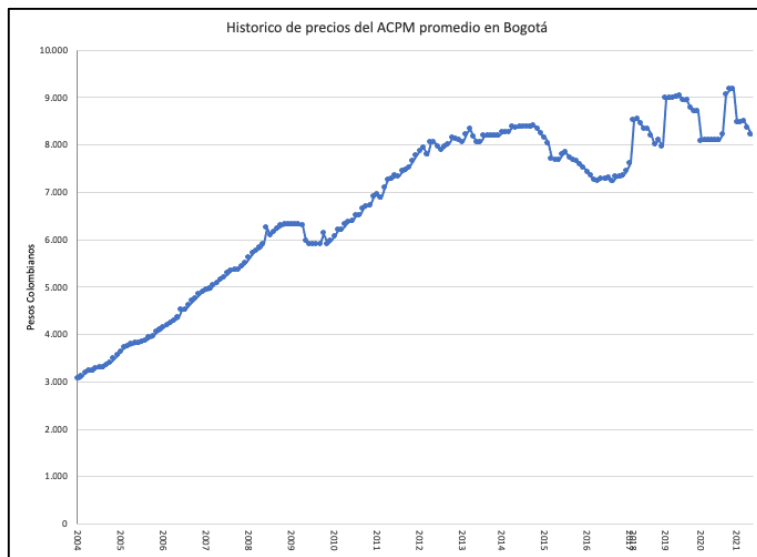


Ilustración 2. Evolución del precio del diésel en Bogotá
Fuente: (UPME, 2021)

Estos precios del diésel en Colombia generan una movilización indirecta de sus alzas a los demás productos de la economía nacional incluyendo la construcción, por esta razón, el Banco de la República en su revista “Borradores de Economía”, en la edición 581 del año 2009, indica, que el precio de los combustibles tiene un efecto directo en el 2,91% de los precios que pagan los consumidores finales de cualquier producto, que indirectamente afecta entre el 8,90% y el 6,80% de estos precios. Además, informa que el diésel está incluido en el 31.52% de las actividades industriales del país, y esto se suma a que los combustibles muestran efectos inflacionarios en el 10% de los precios que pagan los ciudadanos colombianos (Rincón, 2010).

Con estos datos, se hace imperante que se analice el cambio de combustibles fósiles como fuerza motriz de la construcción para conseguir una optimización de recursos, en lo que concierne a la construcción pública, y unos mejores réditos en el caso de la construcción privada.

3.3. Social – Cultural

En Colombia, las vías terciarias abarcan alrededor de 142 mil kilómetros lineales, siendo la red más grande de vías del país, y de ellas solo el 8% se encuentra en buen estado, siendo este, el principal sector de inversión por parte de las entidades gubernamentales. Esta inversión ha sido alrededor de 3,7 billones de pesos en el último cuatrienio, estando en este momento 10.670 kilómetros en intervención (Urrego, 2021).

Estas cifras suenan bien, para un sector de la infraestructura que se hace necesaria para un grupo social que se encuentra relegado en las prioridades del gobierno nacional. ¿Y este grupo a que se dedica?, pues es el grupo de personas que reside en las zonas rurales del país, y se encarga de proveer de alimentos a las grandes ciudades, además que estas vías sirven para que ellos puedan acceder a sus servicios básicos como salud y educación, en los cascos urbanos más cercanos a sus viviendas. Este olvido ubica a Colombia en el puesto 109 entre 137 países en

cuanto a su calidad de la infraestructura según el Índice Global de Competitividad, y que se siguen con esfuerzos en los entes legislativos para fortalecer este sector de la infraestructura nacional (Semana, 2019).

Adicionalmente, estas personas del sector rural serían las directas afectadas por la cantidad de emisiones que se generen a partir de las actividades constructivas que se proponen en todos estos planes y programas de intervención a las vías terciaria. Efectos, principalmente a la salud, que se explican en el marco ambiental de este documento.

3.4. Ecológico - Ambiental

3.4.1. ¿Qué es el diésel y cómo se muestra en el país?

Según la especificación técnica del catálogo de productos de Ecopetrol S.A., el ACPM o Aceite Combustible para Motores, referido actualmente como Diésel, como se describe su sigla, se describe como una combinación de hidrocarburos de entre 10 y 28 átomos de Carbono, formada por:

- Fracciones combustibles provenientes de diferentes procesos de refinación del petróleo, tales como destilación atmosférica, ruptura catalítica e hidrocraqueo de gasóleos y
- Biodiésel (Hasta 2 % vol.) obtenido por trans-esterificación del aceite de palma con metanol. (ECOPETROL, 2021)

Este combustible es tan utilizado que, en Colombia, para el año 2019 se consumieron 137.199 barriles diarios de diésel, representando un crecimiento del 2,5% con respecto al año anterior, pero cuando se establecieron las restricciones por la pandemia del COVID-19, descendió el consumo en 16,4%. Sin embargo, se plantea por parte de la Unidad de Planeación

Minero-Energética UPME, que el crecimiento hasta el año 2036 sea en promedio del 0,65%.
(UPME, 2020)

La misma entidad estatal afirma, que para el año 2009, los sectores productivos distintos al transporte, representaron el 30,1% del total del diésel consumido en ese año. Cabe resaltar que la actividad de la construcción implica una influencia importante en el transporte de carga, por lo que se debe mencionar también que este sector representa el 36,8% del parque automotor del país, y sin dejar de un lado, la maquinaria representa 0,2% de este gran total de vehículos a motor nacional. (UPME, 2012)

El consumo del diésel genera unos contaminantes por su uso, ya que la combustión de este emite gases de dióxido de azufre SO_2 y material particulado PM. La Universidad de Antioquia en la autoría de David Tobón, Andrés Felipe Sánchez y María Victoria Cárdenas (2006), del artículo “Regulación ambiental sobre la contaminación vehicular en Colombia: ¿hacia dónde vamos?”, mencionan:

- *“Dióxido de azufre (SO_2): Se produce por la combustión de carbón, especialmente en plantas térmicas. Al igual que los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre es uno de los principales causantes del smog y la lluvia ácida. Está estrechamente relacionado con el ácido sulfúrico, que puede causar daños en la vegetación y ocasionar problemas respiratorios.*
- *Material Particulado (PM): En esta categoría se incluye todo tipo de materia sólida en suspensión en forma de humo, polvo y vapores. Además, de reducir la visibilidad y la cubierta del suelo, la inhalación de estas partículas microscópicas, que se alojan en el tejido pulmonar, es causante de diversas enfermedades respiratorias.”* (Tobón et al., 2006)

En Colombia, se han efectuado diferentes políticas que buscan regularizar el uso del diésel y otros combustibles en las fuentes móviles, para minimizar el impacto ambiental de las emisiones generadas por estos. Algunas de estas medidas implementadas y referidas por Tobón, son:

- *“Políticas de desmonte de subsidios: La cual era una propuesta para que los precios de los de los combustibles se igualaran al estándar internacional y con esto desincentivar el uso de estos.*
- *Importación de diésel de alta calidad: Con esto se buscaba la inclusión de combustibles fabricados con nuevas tecnologías, que garantizaran la minimización de emisiones de alrededor de un 0,6%.*
- *Hidrogenación y desulfurización de combustibles en las refinerías nacionales: Esta medida también busca que se utilice combustibles con menos impacto en sus emisiones de compuestos sulfurados.*
- *Implementación de políticas de incentivos al GNV: El gas natural vehicular (GNV), se incentiva mediante la creación de subsidios en la conversión de motores y compra del combustible, y mostró una disminución del 10% en material particulado al año 2020.*
- *Implementación de transporte urbano masivo a nivel nacional: este programa es de implementación en las grandes capitales y la reducción se vería aplicada en estos sitios puntualmente.” (Tobón et al., 2006)*

3.4.2. ¿Qué efectos tiene el diésel en el planeta?

No fue sino a finales del siglo XX, que el planeta empezó a ver los efectos del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, producidos por el cúmulo de gases contaminantes en la atmósfera, y todo esto a causas antropogénicas. (Pabón, 2003)

Esta alteración genera que la temperatura del aire en un promedio global haya aumentado en 1°C durante el último siglo (Ruiz, 2021), pudiendo afectar sistemas socioeconómicos y ambientales en diversas áreas del planeta, incluso puede afectar la geografía de los países, pero este escenario puede cambiar, ya que si se continua con las mismas tasas de emisiones, entre los años 2030 a 2052 podremos ver incrementos de 1.5°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).

En Colombia, los efectos del cambio climático tendrán alta incidencia en la toma de decisiones, y más aun con los resultados obtenidos en un modelo presentado por Juan Carlos Alarcón Hincapié en 2017, en su tesis doctoral para la Universidad Nacional de Colombia, quien plantea los escenarios extremos A1 y B2 del IPCC y que para los periodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, concluye que el clima en el país se comportara de la siguiente manera:

“(…)

La temperatura media anual del aire tendría incrementos paulatinos del aire de 2-3° entre 2011-2014 y de 3 y 4°C hacia finales de siglo, aunque en los valles del Magdalena y del Cauca el calentamiento podría ser un poco mayor. La precipitación hacia finales del siglo XXI registraría reducciones hasta del 30% en la parte interandina, y en la región Caribe, y aumentos un poco más del 30% de los acumulados anuales en la región Pacífica, en los piedemontes orientales de la cordillera Oriental y en un sector sobre el sur de Bolívar y Sucre.

(…)” (Alarcón Hincapié, 2017)

3.4.3. ¿Qué se está haciendo?

En el momento, la preocupación del cambio climático ha generado diversas políticas sobre la información científica y las predicciones que allí se hacen. Pero esta multiplicidad de políticas, están generando que dichas doctrinas se encaminen bajo otros principios ocultos que sus creadores determinan.

Por ejemplo, aunque en Latinoamérica se destaca por la relativa ausencia de discusión, sobre estas temáticas como un eje central en los debates donde un análisis sistemático e incluyente se produce más sobre temas técnicos, sectoriales o de medidas concretas de política pública (Postigo et al., 2013), en el 2021 en la ciudad de Cartagena de Indias se realizó la primera “Cumbre del Clima Latinoamérica y el Caribe”, la cual conto con presencia adicional de países africanos, y se generó una declaración conjunta, previa a la cumbre de Glasgow, en la cual se declararon los siguientes compromisos:

- *“Crear una Coalición de Países y gobiernos subnacionales para la Equidad en los Mercados de Carbono.*
- *Promover los esquemas justos de precio al carbono como herramienta para reducir las emisiones de GEI.*
- *Promover las transacciones internacionales como mecanismo que ayude a reducir los costos de mitigación y adaptación y a escalar los beneficios de sostenibilidad en los países en vías de desarrollo.*
- *Fomentar que los beneficios de los mercados de carbono se repartan de forma equitativa entre los agentes sujetos de reducción de emisiones, las comunidades y los promotores de reducción de emisiones en los países en vía de desarrollo.*

- *Aprovechar las agendas de recuperación económica post-COVID para diseñar e implementar esquemas innovadores de financiamiento que fomenten el desarrollo económico, la innovación y generación de valor, la creación de empleos, el combate al cambio climático y el uso sostenible de la biodiversidad.*
- *Proteger la integridad ambiental y promover la ambición con el fin de garantizar la existencia de un mercado justo que aporte en la limitación del aumento de temperatura a 1.5°C para finales de este siglo.*
- *Colaborar para fortalecer los sistemas de medición, reporte y verificación (MRV) de las emisiones de gases de efecto invernadero y reducciones de emisiones, en línea con las provisiones internacionales de MRV nacionales y de la CMNUCC, como la base necesaria para la coordinación de los mercados de carbono.*
- *Fomentar el uso de reglas comunes de alta calidad para garantizar la integridad ambiental de los mecanismos internacionales de precio al carbono y una repartición justa de beneficios.*
- *Fortalecer la colaboración y cooperación internacional y regional en un esfuerzo por compartir lecciones y mejorar la capacidad técnica del sector público y privado en relación con los mercados de carbono.*
- *Fomentar que el desarrollo de los mercados de carbono sea un complemento a la cooperación y apoyo financiero internacional a los mecanismos de no mercados” (CCALC, 2021).*

Por otra parte, en los meses de octubre y noviembre de 2021, se celebró en Glasgow, la reunión número 26 de la Conferencia de las Partes de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, llamada también COP26, en la cual más de 190 líderes mundiales,

junto con miles de negociadores, representantes gubernamentales, empresas y ciudadanos, los cuales llegaron a acuerdos y negociaciones enmarcados en los siguientes objetivos de la cumbre:

- *“Asegurar la meta global de carbono cero para mediados de siglo y mantener en 1.5 °C el aumento del clima en el planeta.*
- *Adaptar los territorios para proteger a las comunidades y los hábitats naturales.*
- *Movilizar las finanzas gubernamentales en pro del desarrollo de infraestructura más verde y una economía resiliente al clima.*
- *Trabajar juntos para cumplir los anteriores tres objetivos” (UN, 2021).*

He aquí donde la construcción sostenible juega un papel en particular, ya que como informa el Consejo Mundial de Negocios para el Desarrollo Sostenible (WBCSD sigla en inglés de World Business Council for Sustainability Development), la construcción y sus ambientes, entendiéndose como el entorno de una construcción, o sea, la construcción con sus materias primas, transporte de las mismas, métodos constructivos, uso y desuso de estas construcciones, aportan el 40% de las emisiones resultantes de CO₂ en el mundo, implicando acciones necesarias desde la industria de la construcción para lograr cumplir con las metas impuestas de reducciones de emisiones contaminantes (WBCSD, 2020).

3.5. Legal - Normativo

En la República de Colombia, la Constitución Política es la norma que rige la estructura legal del país, y en esta se incluyen dos artículos referentes al medio ambiente, los cuales son los siguientes:

“(...)

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger

la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

(...)” (Constitución Política, 1991)

Claro está, que, basado en la constitución anterior, la de 1886, sirvió de base para la creación del Decreto Ley 2811 de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, y en su artículo 8, determina que la contaminación del aire es un factor que deteriora el medio ambiente, y esto hace parte de las definiciones general de esta política pública (Minambiente, 2010a).

Pero ya hablando de la actualidad, y con base a la Constitución Política de 1991, la Presidencia de la República emitió el Decreto 948 de 1995 en el cual se determinan acciones para la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire, como las siguientes:

- *“Reconocer los tipos de contaminantes del aire,*
- *Determinar las actividades especiales a controlar, como:*
 - *Las quemas de bosque natural,*
 - *Las quemas de combustibles fósiles,*
 - *Las quemas industriales,*
 - *Las quemas abiertas controladas en las zonas rurales,*
 - *La incineración de sustancias, residuos y desechos tóxicos, también,*

- *La clasificación de las emisiones contaminantes, y*
- *La prohibición del uso de crudos pesados” (Minambiente, 1995a).*

En el mismo año se modifica el Decreto 948, con la creación del Decreto 2107 de 1995, en el cual el Ministerio del Medio Ambiente, modifica los límites de uso de crudos pesados, redefine las quemas abiertas en zonas rurales y especifica mejor las emisiones de los vehículos diésel (Minambiente, 1995b).

Ya en el 2006, el mismo Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, modifica nuevamente el Decreto 9448 de 1995, y crea el Decreto 979 de 2006, en la cual, cabe resaltar que en esta norma, se modifica el articulado que habla sobre las clases de normas de calidad del aire, de los niveles de prevención, alerta y emergencia, las medidas de atención ante algún episodio en que se altere el equilibrio natural por los efectos de la contaminación del aire, entre otras (Minambiente, 2006).

En 2010, el Congreso de la República legisla en pro de ordenar el tránsito en las vías colombianas, y crea la Ley 1383 de 2010, por medio del cual se reforma el Código Nacional de Tránsito, y articula un capítulo para la revisión tecnomecánica y de emisiones contaminantes para todo el parque automotor en el territorio colombiano. (Congreso, 2010). En este mismo año, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, modifica la Resolución 601 de 2006, con la creación de la Resolución 610 de 2010, y modifica los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio y para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos (Minambiente, 2010b).

Pero, en el 2013, el mismo ministerio, modifica la Resolución 910 de 2008, con la creación de la Resolución 1111 de 2013, y exceptúa la maquinaria de construcción en su artículo primero, el cual reza de la siguiente manera:

“(…)

ARTÍCULO PRIMERO. Modificar las excepciones de que trata el artículo 2º de la Resolución 910 de 2008, de conformidad con la parte motiva del presente proyecto, el cual quedará así:

“Artículo 2. Excepciones. Se exceptúa del cumplimiento de las disposiciones de la presente resolución las locomotoras, equipos fuera de carretera para combate o defensa, equipos o maquinaria para obras civiles (vibradores, grúas) o viales (retroexcavadoras, mezcladoras, cortadoras, compactadores, vibrocompactadores, terminadoras o finishers), equipos internos para manejo de carga en la industria y terminales, equipos para minería (retroexcavadoras, cargadores, palas, camiones con capacidad superior a 50 toneladas), equipos agrícolas (trilladoras, cosechadoras, tractores, sembradoras, empacadoras, podadoras) ya sean movidas por llantas, rodillos, cadenas u orugas y en general los equipos establecidos como maquinaria o vehículos NONROAD, las declaradas por la autoridad de tránsito como vehículos antiguos o clásicos y los vehículos eléctricos.

(…)” (Minambiente, 2013)

Posteriormente, la Presidencia de la República generó el Decreto Único 1076 de 2015, el cual es la norma reglamentaria del sector ambiente y desarrollo sostenible y en la Sección 2 del Capítulo 1 Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, Título V Aire, da unas disposiciones generales sobre normas de calidad del aire, niveles de contaminación, emisiones contaminantes y de ruido, y de aquí en adelante se vuelve el referente en esta materia.

(Presidencia de la República, 2015). Con esta norma, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible generó la Resolución 2254 de 2017, en la cual adopta la norma de calidad del aire ambiente, y se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio, y se proyectan al año 2030 (Minambiente, 2017b).

En cuanto al cambio climático, se presenta una descripción de la normatividad colombiana en cuanto a este tema:

- La Ley 164 de 1994, en la cual el Congreso de la República adopta el texto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, la cual se realizó en New York en mayo de 1992, obliga al país a que se realicen las gestiones necesarias para el cumplimiento de los compromisos allí pactados (Congreso de la República, 1994).
- La Ley 629 del 2000, realiza lo mismo que la anterior, pero con el Protocolo de Kyoto.
- El IDEAM en el año 2001 crea la primera Comunicación Nacional de Cambio Climático y en él se incluye un inventario de la generación de gases de efecto invernadero en el territorio nacional, además de identificar los ecosistemas más susceptibles al cambio climático (IDEAM, 2001).
- El Departamento Nacional de Planeación crea el documento CONPES 3242 de 2003 con el fin de presentar una estrategia de venta de servicios ambientales para la mitigación del cambio climático, la cual consiste en una oferta de reducciones de emisiones verificadas a la comunidad internacional (DNP, 2003).
- Esta misma institución, en el año 2011, crea otro el documento CONPES 3700, en la cual se establece una estrategia nacional para que las instituciones del estado articulen la creación de políticas en materia del cambio climático (DNP, 2011).
- También, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, genera un documento llamado Comunicación Nacional de Colombia, la cual se encuentra en su tercera versión y son un reporte que deben realizar los miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio

Climático (CMNUCC), para mostrar sus avances en la gestión que se realice en la implementación de dicha convención (IDEAM, 2017).

- Y, por último, cabe resaltar que Colombia presenta a la comunidad internacional una actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia NDC, y esta última del año 2020, y en el que se encuentra un portafolio de medidas de mitigación de gases efecto invernadero y se muestra, por ejemplo, que se proyecta un potencial impacto del sector de transporte de carga de 1,48 Mt CO₂eq, a partir de la reducción de la actividad mediante procesos de optimización de la logística. Este programa es encabezado por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.(Comisión Intersectorial de Cambio Climático, 2020)

4. Marco Teórico

Desde la década de los 60 del siglo XX, la humanidad empieza a cuestionar su actuar con el planeta, y plantea el concepto de impacto ambiental, el cual significó en ese entonces como el efecto producido en el ambiente y los procesos naturales por la actividad humana en un espacio y un tiempo determinados (Wathern, 1988).

A partir de este concepto, se consideran los aspectos ambientales, quien son los “sectores” donde el impacto ataca en el planeta, como ecosistémico (atmósfera, hidrósfera, litósfera, biósfera), administrativo (aspectos organizativos, políticos, socioeconómicos) e investigación (básica y aplicada, monitoreo y educación ambiental) (Romano Velasco, 2000).

En 2019, la Asociación Internacional de Análisis de Impactos IAIA (por su sigla en inglés), que es la institución que lidera los procesos de mejores prácticas para el uso de las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), los define como un estudio que sirve para identificar, predecir e interpretar el impacto ambiental, así como para prevenir las consecuencias negativas y con esto diseñar mecanismos para la toma de decisiones (IAIA, 2009).

Dentro de las evaluaciones de impacto ambiental, se identifican muchas metodologías, como las matrices causas efecto, las listas de chequeo, las superposiciones de transparencias, los métodos basados en índices e indicadores, los análisis de sistemas y los análisis de ciclo de vida, (Cotan, 2007) este último que es el referente utilizado para esta investigación.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite medir los impactos ambientales de una cadena productiva de forma longitudinal, y con esto tener un panorama más amplia del impacto que puede generar cierta actividad antrópica en el planeta. Los análisis de ciclo de vida se pueden observar en cualquier fase de la cadena o de toda la cadena, esto lo

define quienes lo van a realizar (Valenzuela-Vergara, 2019). Los análisis de ciclo de vida permiten integrar en un solo valor la complejidad de los sistemas de producción y consumo de productos, además de que, dado este enfoque integral, se puede pasar entre diferentes áreas de producción como el diseño, la fabricación, la construcción, el mantenimiento y el desuso. (Cortes, 2013)

La norma internacional UNE-EN 15804 2012 con su actualización a 2020, realiza una evaluación de los impactos ambientales de ciertos productos y procedimientos utilizados en la construcción, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (Hillege, 2022), y determina quince categorías de impacto ambiental que se muestran a continuación:

Categoría de impacto	Unidad	Descripción
Cambio climático	kg CO ₂ -eq	Indicador de calentamiento global potencial debido a las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dividido en 3 subcategorías según la fuente de emisión: (1) recursos fósiles, (2) recursos de base biológica y (3) cambio de uso del suelo.
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11-eq	Indicador de emisiones al aire que causan la destrucción de la capa de ozono estratosférico.
Acidificación	Kg mol H ⁺	Indicador del potencial de acidificación de suelos y aguas por la liberación de gases como los óxidos de nitrógeno y azufre.
Eutroficación de aguas dulces	kg PO ₄ -eq	Indicador del enriquecimiento de los ecosistemas de agua dulce con nutrientes, debido a las emisiones de compuestos nitrogenados y fosforados.
Eutroficación de mares	Kg N-eq	Indicador del enriquecimiento de los ecosistemas marinos con nutrientes, debido a la emisión de compuestos nitrogenados.
Eutroficación de zonas terrestres	mol N-eq	Indicador del enriquecimiento de los ecosistemas terrestres con nutrientes, debido a la emisión de compuestos nitrogenados.
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC-eq	Indicador de emisión de gases que afectan la creación de ozono fotoquímico en la atmósfera, catalizado por la radiación solar, mas conocido como smog.
Agotamiento de los recursos bióticos como minerales y metales	kg Sb-eq	Indicador del agotamiento de recursos naturales no fósiles.
Agotamiento de los recursos bióticos como combustibles fósiles	MJ	Indicador del agotamiento de recursos naturales mas específicamente, referido a los combustibles fósiles.
Toxicidad humana	CTUh	Impacto en los humanos de las sustancias toxicas emitidas por el medio ambiente. Estas se dividen en no cancerígenos y cancerígenos.

Categoría de impacto	Unidad	Descripción
Ecotoxicidad en aguas dulces	CTUe	Impacto en los organismos de los ecosistemas de aguas dulces por las sustancias tóxicas emitidas al medio ambiente.
Uso del agua	m ³ mundiales eq.	Indicador del volumen relativo de agua usada, basada en factores de escasez de agua de orden regional
Uso del suelo	Dimensional	Medida de los cambios en la calidad del suelo, referente a la producción biótica, la resistencia a la erosión y la filtración mecánica de agua.
Radiaciones iónicas y salud humana	kBq U-235	Daños a la salud humana y los ecosistemas vinculados a la emisión de radionúclidos
Emisiones de material particulado	Incidencia en las enfermedades	Indicador del potencial de incidencia en las enfermedades causadas por las emisiones de material particulado.

Tabla 2. Categorías de impacto ambiental

Fuente: (Hillege, 2022)

Sin embargo, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático IPCC (Sigla en inglés), agrupó las categorías de impacto, y en cuanto a los gases efecto invernadero y aquellos que potencializan el cambio climático, determinó que el potencial de calentamiento global GWP (Sigla en inglés) sea la métrica utilizada para los análisis de ciclo de vida, definiendo el forzamiento radiativo integrado de un gas entre el momento de la emisión y un horizonte temporal elegido (TH), en relación con el del CO₂. Esta métrica será la utilizada dentro de esta investigación para el primer objetivo específico, ya que como lo explica el panel en su documento Guía Global de los Indicadores para los Análisis de Ciclo de Vida, debido a que se analiza en un tiempo de efectividad de los gases en la atmósfera de 100 años y adicionalmente, compila el análisis de las emisiones generadas por las actividades humanas, que emitan gases como óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), carbono negro (BC), carbono orgánico (OC) y óxidos de azufre (SO_x), los cuales algunos de ellos son los que emite el diésel en el proceso de combustión interna en los motores de la maquinaria empleada en la construcción (United Nations Environment Programme, 2016).

Estas herramientas a través de los últimos 40 años han sido esenciales para la toma de decisiones, tal como lo menciona Morgan en su artículo *Environmental impact assessment: the*

state of the art, en el cual realiza una revisión de los estudios de impacto ambiental y concluye, que es por estos análisis que los gobiernos, instituciones financiera y el público en general, han conocido los efectos del cambio climático en diversos sectores y sobre esto se debe planear el desarrollo de una comunidad (Morgan, 2012).

Sin embargo, los estudios de impacto ambiental deben cumplir con procesos de mejora, ya que estos documentos nos sirven de nada, si no se realiza una revisión continua de los procesos estudiados, una generación de mejores prácticas y con ello el compromiso de los profesionales de todas las áreas del conocimiento en el cumplimiento de estas innovaciones y de su actualización (Marshall et al., 2005). Zhang en su estudio llamado *Assessing the eco-efficiency of complex forestry enterprises using LCA/ time-series DEA methodology*, menciona que las empresas deben aplicar herramientas de gestión integradas con el desarrollo sostenible para poder analizar su propio desempeño y el correspondiente impacto ambiental (Zhang & Xu, 2022).

En cuanto al tema de investigación, se realiza una pesquisa sobre que autores o entidades han escrito sobre el mismo, encontrándose muy pocas referencias, y que no abordan la problemática de la construcción. Para iniciar se tiene a Arguelles (2021), quien realiza un análisis de ciclo de vida de la producción del diésel, comparándolo con otros combustibles de origen vegetal, en el que concluyen que el uso del biocombustible redujo las emisiones de contaminantes en un 110%.

Por otra parte, la consultora Five Winds International (2004), realiza un análisis de ciclo de vida de los combustibles llamados “Gas to Liquid” o GTL, que en sí son gases combustibles licuados, la cual es una nueva tecnología para la utilización en diferentes equipos motorizados, y comparan los combustibles GTL fabricados por Shell, Sasol Chevron y ConocoPhillips, en lo

cual encuentran los tres combustibles presentan considerables mejoras en las emisiones de gases efecto invernadero, entre otras reducciones de impactos.

Sin embargo, Hsu (2005) realiza un análisis del ciclo de vida de la gasolina y el diésel producido vía pirolisis rápida e hidroprocesamiento, los cuales son procesos químicos para la generación de combustibles con menor impacto ambiental. En efecto, en el análisis mostró que los combustibles tienen menores emisiones de gases invernadero comparado con un combustible convencional de 2005, pero tienen rendimiento menor que el etanol producido con las mismas materias primas.

Jacobs Consultancy (2012), realiza otro análisis de ciclo de vida de los combustibles que se fabrican en el Distrito de Alberta, Canadá, para poder comercializarlos en Europa con los estándares de calidad ambiental exigidos por los entes gubernamentales. En él encuentran que los combustibles producidos cumplen con los mínimos establecidos para que la comunidad europea reciba su gasolina y diésel.

En el tema de la construcción no se encontraron más referentes con la misma tipología de análisis, por lo que puede ser una buena iniciativa de estudio para que este sector aporte en la minimización de emisiones de gases efecto invernadero.

Ahora bien, esto en cuanto a algunas teorías que se han presentado, pero cabe resaltar las bases de esta investigación, y por esta razón a continuación, se describirán los procesos constructivos a estudiar y algunos tópicos de fundamento para el análisis de ciclo de vida.

bulldozer) donde se requiere modificar la topografía por donde se pretende tender la línea vial, y en ella se pueden hacer varias actividades como desmonte, excavaciones, remoción de derrumbes o demolición de estructuras existentes. (INVIAS, 2022)

Realizada la anterior actividad, se continua con el afirmado de bases y subbases, que según las necesidades de la estructura del pavimento diseñado para cada caso donde se realice el mejoramiento vial, se deberán tender capas de bases o sub-bases granulares (se realiza con motoniveladora), que técnicamente se refiere a agregados pétreos que cumplen con ciertas especificaciones de dureza, durabilidad, limpieza y resistencia, y que según los estudios de diseño, tendrán un espesor específico para el requerimiento del terreno. Este tendido de materiales debe ser compactados mecánicamente (se realiza con vibrocompactador) para lograr la consistencia de estas capas y cumplir con el objetivo de ser el sustento del pavimento.

Posteriormente al afirmado de las bases y sub-bases, se procede con la construcción del pavimento, que como se explicó anteriormente, se tendrán que realizar primero, dos cintas de concreto estructural reforzado con acero, y entre estas cintas se aplica un concreto ciclópeo, que es la mezcla de rocas distribuidas adecuadamente y concreto de una resistencia más baja (Orobio & Orobio, 2016).

En la siguiente fase del mejoramiento vial, está la construcción de las estructuras hidráulicas, que obligatoriamente tiene incluida son las cunetas, las cuales ayudarán a conducir el agua de escorrentía según la gravedad a los cauces cercanos. Ya con esto, y según el proyecto, se incluirán otras estructuras hidráulicas como las alcantarillas, que son estructuras que sirven para conducir el agua de un lado al otro de la calzada intervenida, por debajo del nivel de la misma, es decir, es la instalación de un tubo de concreto de gran diámetro, y que por ahí pasa el agua de escorrentía al otro lado de la vía, según la pendiente que esta maneje. Estas estructuras también

se realizan para cauces permanentes de menor caudal como las acequias o las quebradas (INVIAS, 2022).

Y, por último, queda la instalación de la señalización vial, la cual debe cumplir los requerimientos técnicos de INVIAS, y las obras adicionales, como instalación de cercas, adecuaciones de ingresos a predios, entre otras, que se necesiten y sean incluidos en el diseño. El proceso se encuentra diagramado a continuación.



Ilustración 4. Proceso de mejoramiento vial

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se hace importante mostrar un balance de recursos necesarios e impactos que se generan en esta actividad, teniendo en cuenta que, solo se va a estudiar como insumo el diésel, y las salidas serán los impactos ambientales que genera la

combustión del insumo en los motores de las máquinas y equipos necesarios dentro de la actividad de mejoramiento vial.

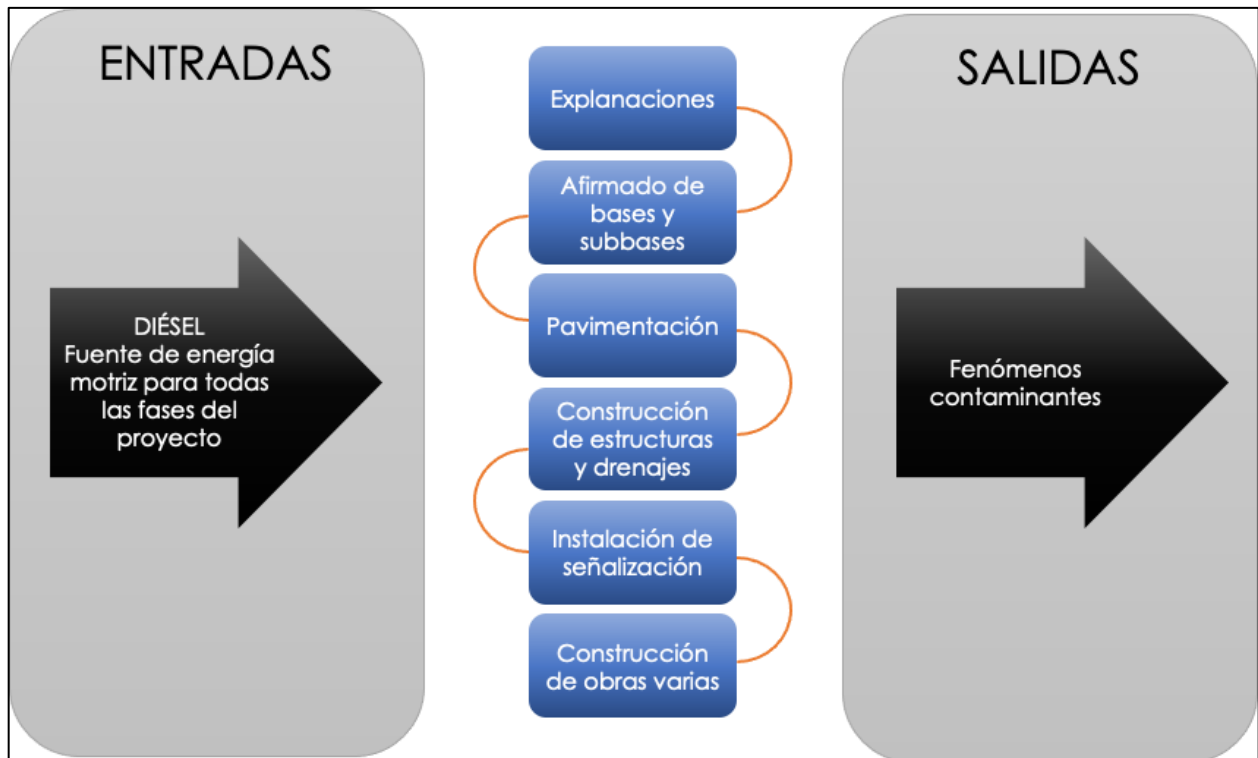


Ilustración 5. Balance de insumos e impactos ambientales en el proceso de construcción de una vía.
Fuente: Elaboración propia

5. Metodología

Para la realización de esta investigación, se toman como muestra del mismo, los tres proyectos de construcción de mejoramientos viales en carreteras de tercer orden, en los municipios de Málaga, Rionegro y San Vicente de Chucuri. Allí, se realiza la identificación de la maquinaria y equipos necesarios para la construcción de las placa huella en los tramos necesarios. Esta identificación se realiza con ayuda de un procedimiento de toma de datos que se elaboró anteriormente y que se anexa a este documento. En este formato se refieren de forma clara las condiciones físicas del equipo, como marca, modelo, potencia, estado mecánico, entre otros.



Ilustración 6. Proceso de toma de datos

Fuente: Elaboración propia

Con los equipos y maquinas identificadas, se procede a realizar una toma de datos, la cual consiste en el registro en planillas ya creadas para tal fin y consignando, las horas de trabajo de los equipos estacionarios, como las retroexcavadoras, los vibrocompactadores y las motoniveladoras. Adicionalmente, en otro formato, también se registran las distancias recorridas por los vehículos de apoyo a la construcción, específicamente de las volquetas, y se apuntan allí los recorridos efectuados a los sitios de disposición final de los Residuos de Construcción y Demolición RCD, y a los sitios de distribución de materiales pétreos necesarios para la actividad constructiva.

Con esta información, se utiliza el software *SimaPro*, el que realizan los cálculos necesarios para determinar la cuantificación de los impactos ambientales generados en la ejecución de los tres proyectos de mejoramiento. Sin embargo, este análisis está basado en algunos estándares que el software aplica para el diésel de manera global, así que, se requiere refieren e incluyen los estándares de producción del diésel en Colombia, para que así, la determinación de los impactos sea más exacta.

Por otra parte, se realiza una descripción completa de los tres proyectos de construcción en cuestión, en las cuales, se tiene especial atención en las variables técnicas como la altura sobre el nivel del mar, la topografía, la calidad del suelo, las cantidades de obra, la distancia a los puntos de acopio de materiales pétreos y disposición final de RCD, y esto para cada uno de los tramos a intervenir.

Con esta información y los datos entregados por el software, se realiza un análisis independiente para cada tramo y para cada proyecto, para con esto lograr una conclusiones transversales y lineales en cuanto a los impactos ambientales generados por los mejoramientos de vías terciarias en Colombia.

6. Los proyectos en estudio

Para esta investigación, la información base colectada se obtuvo en campo de tres proyectos reales de construcción de placas huellas, financiados por el Departamento de Prosperidad Social, y ejecutados por tres diferentes contratistas durante el periodo de marzo a octubre de 2022; estos proyectos de mejoramientos se realizaron en los municipios de Málaga, Rionegro y San Vicente de Chucurí, en el departamento de Santander, cumpliendo con las siguientes especificaciones:

- Vía(s) de tercer orden o vía terciaria.
- Vía(s) de bajo volúmenes de tránsito.
- Vía(s) con máximo 500.000 ejes equivalente de 8,2 toneladas en el periodo de diseño.
- Periodo de diseño mínimo 5 años.
- El índice según el estándar de *Californian Bearin Ratio* CBR de la subrasante mayor o igual al 3%.

Cumplidos los requerimientos gubernamentales, los proyectos fueron presentados por cada uno de las alcaldías municipales al Departamento Administrativo de la Prosperidad Social, entidad adscrita a la Presidencia de la República, que por medio de la Convocatoria No. 001 de 2020, la cual tiene por objeto financiar y ejecutar proyectos de infraestructura social, productiva y hábitat que conlleven a la superación de la pobreza, generando así mismo la reactivación de la economía y el desarrollo sostenible de los territorios y las comunidades más vulnerables del país, aprobó los proyectos a estudiar con los siguientes alcances.

6.1 Proyecto de mejoramiento vial del municipio de Málaga

Málaga es un municipio cuya economía se basa principalmente en la agricultura, sus veredas son un potencial agrícola y pecuario, en dichos sectores, diariamente se recolecta leche vacuna que es distribuida en el casco urbano del municipio o llevada al acopio de la zona, también se tienen unidades productivas de tomate, maíz, fríjol, cítricos, hortalizas, gallinas ponedoras y pollos de engorde que reactivan la dinámica comercial del sector (Alcaldía Municipal de Málaga, 2021).

El proyecto se realiza en dos veredas del municipio de Málaga, la Vereda San Luis que está ubicada en el occidente del municipio, aproximadamente a 12 kilómetros del casco urbano del mismo una altura aproximada de 3050 m.s.n.m., presenta un paisaje de montaña acompañado por zonas boscosas, con suelos arcillosos y con materiales granulares de diferentes diámetros. Adicionalmente, la vereda Tierra Blanca, la cual se encuentra ubicada en la zona sur oriental del municipio aproximadamente a 9 kilómetros del casco urbano, a una altura aproximada de 1600 m.s.n.m., y presenta un paisaje de pradera con relieves escarpados fuertes, su suelo es arenoso (Alcaldía Municipal de Málaga, 2021).

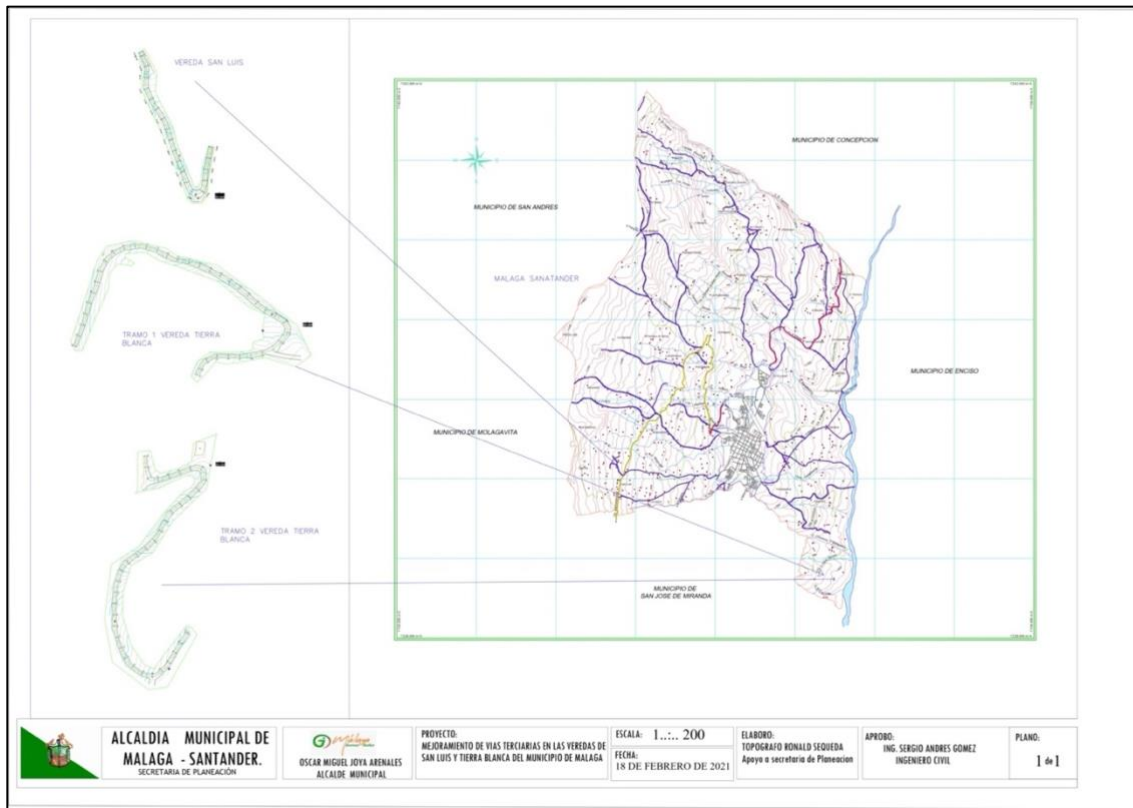


Ilustración 7. Ubicación de los tramos del proyecto de Málaga-Santander

Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

Este proyecto se realiza en tres tramos, uno en la Vereda San Luis, y los dos restantes en la Vereda Tierra Blanca, tienen las siguientes condiciones:

Tramo	Vereda	Longitud de la intervención (metros)
1	San Luis	182,14
2	Tierra Blanca	346,90
3	Tierra Blanca	364,26

Tabla 3. Tramos a intervenir en el municipio de Málaga-Santander

Fuente: (Báez Gutiérrez, 2021)

6.1.1. Suelos

En cada uno de los tramos a intervenir se realizó una excavación de exploración, para determinar la calidad de los suelos, y con el determinar las características físicas, geológicas y

geotécnicas de cada zona. El resultado de estos estudios, determinó que el perfil geotécnico entre las cotas de 0 a -1 metro, se encontró un suelo aluvial compuesto de arenas limpias y pocos finos, con otras arenas arcillosas y algunas mezclas de arenas y arcillas, y que estos suelos son competentes geotécnicamente hablando para la cimentación de estructuras. Adicionalmente se realizaron ensayos de proctor modificado y de relación de soporte donde se calificó el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS como SM, que significa que es una arena limosa, con más de 12% de limos pasantes de tamiz No. 200, la arena menor o igual al 50% de fracción gruesa que pasa por el tamiz No. 4, y con esta información, el otro sistema de clasificación conocido como AASHTO -American Association of State Highway and Transportation Officials, lo califica como un suelo excelente (Báez Gutiérrez, 2021).



Ilustración 8. Toma de muestras de suelos en los tramos del proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

Adicionalmente, se realizan los cálculos de la capacidad de soporte según el método de valor de soporte de California CBR-California Bearing Ratio, que es un ensayo que mide la

resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón en la muestra de suelo. Los datos resultantes de este ensayo fueron:

Tramo	Valor de Soporte (PSI)	Módulo de reacción de la subrasante K (Kg/cm ³)	Módulo de reacción de la subrasante K (Mpa/m ³)
1	32	7,2	72
2	37	8,9	89
3	35	8,5	86

Tabla 4. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de Málaga-Santander
Fuente: (Báez Gutiérrez, 2021)

Con todos los datos anteriores, los geotecnistas recomiendan remover el material existente a una profundidad mínima de 50 centímetros y rellenar con un material seleccionado en todos los tramos, dando como mínimo una base granular de 25 centímetros de espesor y una sub-base de 25 centímetros de espesor para tener un mejor desarrollo en la estructura de placa huella, teniendo en cuenta el diseño de las placas huella (Báez Gutiérrez, 2021).

6.1.2. Topografía

Tramo 1. San Luis

Este tramo correspondiente a 182,14 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 17,02%, y el dibujo de la vía en este tramo, incluye una curva cerrada tipo “U”, esto se puede ver mejor a continuación:

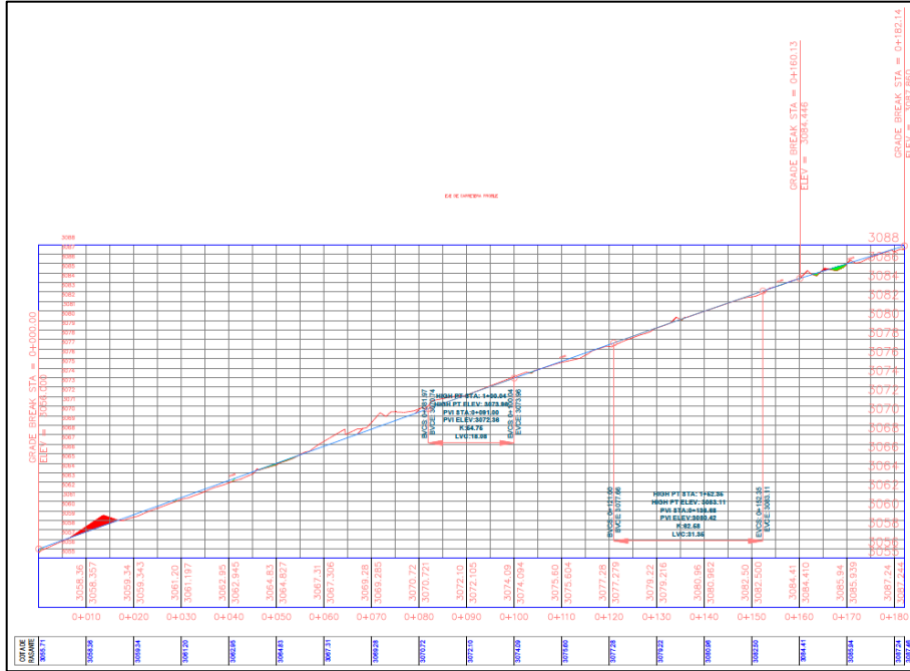


Ilustración 9. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de Málaga-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

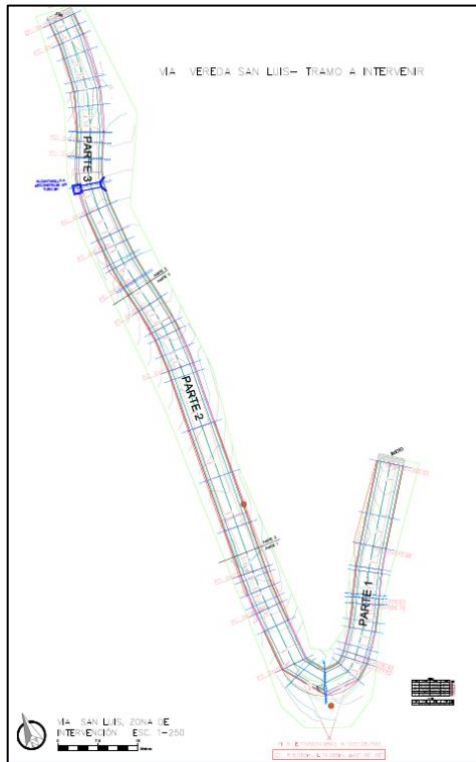


Ilustración 10. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de Málaga-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

Tramo 2. Tierra Blanca 1

Este tramo correspondiente a 346,90 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 8,77%, y el dibujo de la vía en este tramo, incluye cuatro curvas con un ángulo máximo de 90 grados en una de ellas, esto se puede ver mejor a continuación:

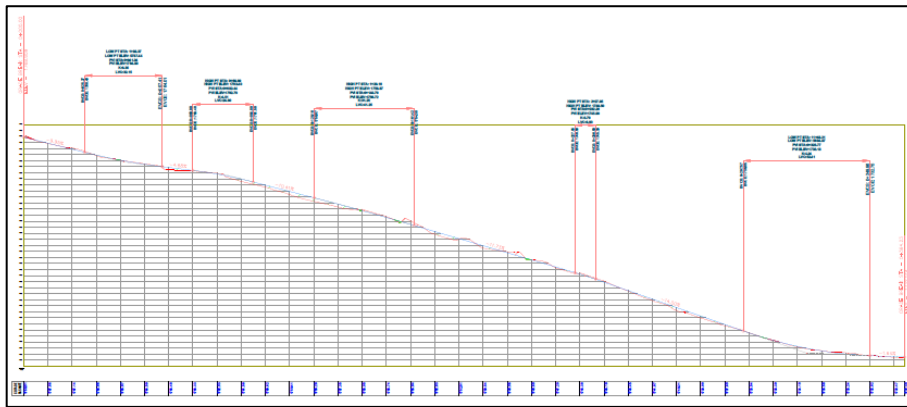


Ilustración 11. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

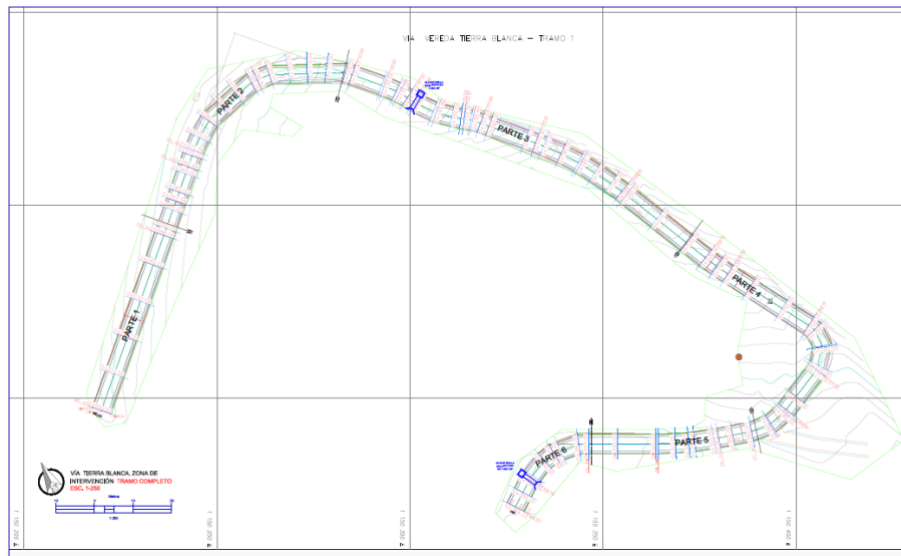


Ilustración 12. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

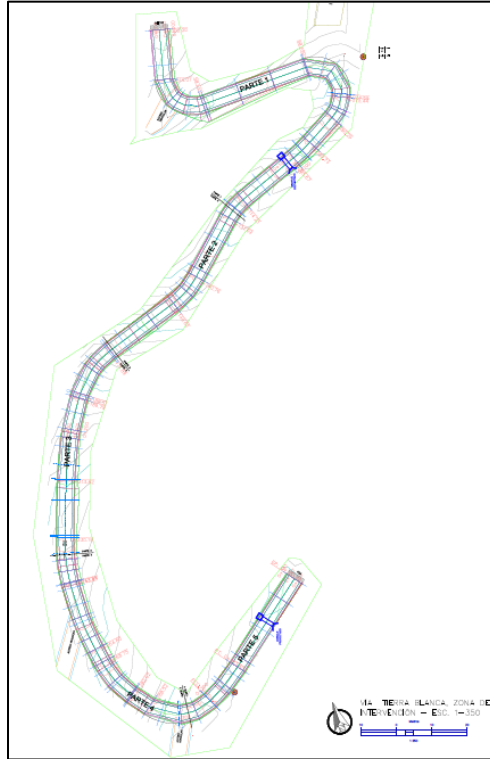


Ilustración 14. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

6.1.3. Diseño de pavimentos

Para el diseño de pavimentos, se tiene en cuenta toda la información anterior, y los diseñadores concluyen que las cintas de concreto deben ser de concreto reforzado de 15 centímetros de espesor, sobre un solado de limpieza de 5 centímetros en concreto simple y una superficie de apoyo de 15 centímetros con sub-base (Gómez, 2021). El corte de este diseño de pavimento es el siguiente:

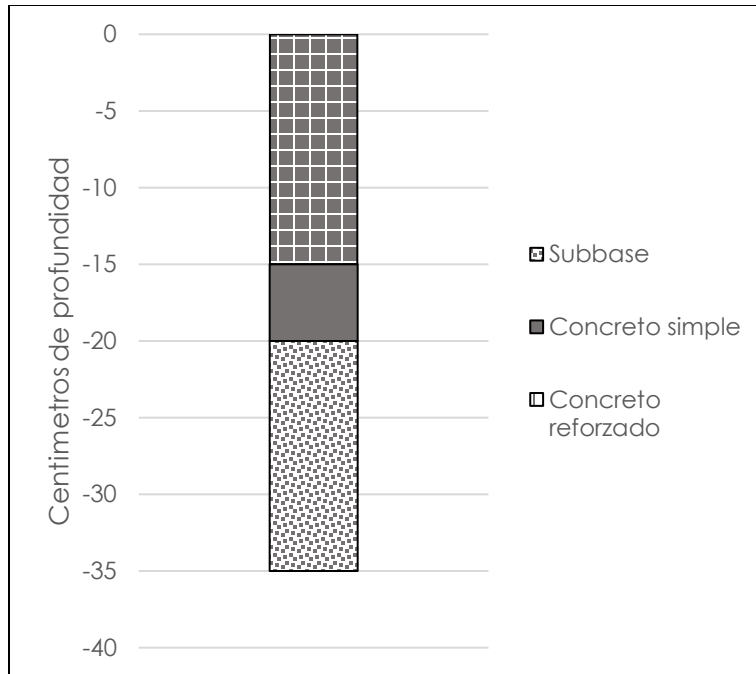


Ilustración 15. Corte de la estructura de pavimento para el proyecto de Málaga-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

6.1.4. Diseño de obras complementarias

El proyecto de mejoramiento vial del municipio de Málaga, en el departamento de Santander contempla la construcción de tres alcantarillas y la reconstrucción de una de ellas, ubicadas en los siguientes tramos:

Alcantarilla	Tramo	Vereda	Tipo de actividad	Abscisa
1	1	San Luis	Reconstrucción	0+150
2	2	Tierra Blanca	Construcción	0+137
3	3	Tierra Blanca	Construcción	0+100
4	3	Tierra Blanca	Construcción	0+330

Tabla 5. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de Málaga-Santander
 Fuente: (Báez Gutiérrez, 2021)

Estas intervenciones en las mencionadas estructuras hidráulicas llevan consigo actividades de maquinaria amarilla como las retroexcavadoras, para realizar la excavación para

la tubería y la instalación de las mismas en su punto final. Las dimensiones de estas estructuras se muestran a continuación:

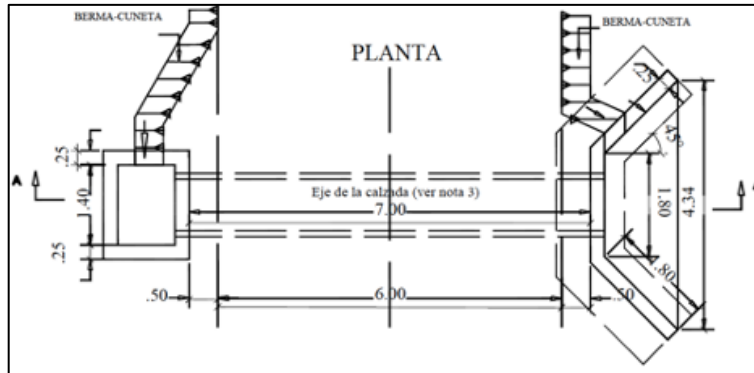


Ilustración 16. Planta de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

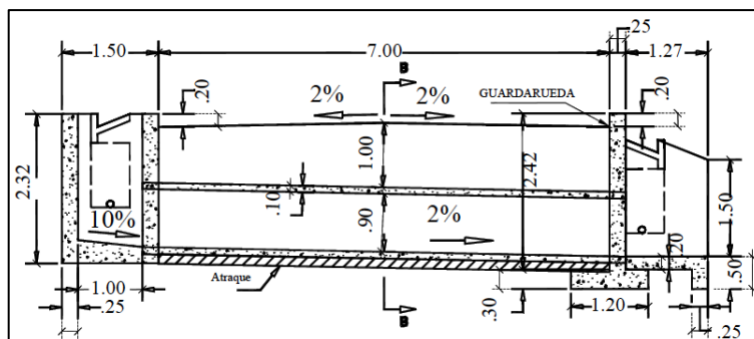


Ilustración 17. Corte A-A' de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Málaga-Santander

6.1.5. Cantidades de obra

El proyecto de mejoramiento vial del municipio de Málaga contempla las siguientes cantidades de obra para su ejecución:

No.	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Excavación mecánica en material común	m ³	591,6
2	Excavación manual en material común	m ³	97,46
3	Rellenos con material común seleccionado	m ³	31,30
4	Subbase granular	m ³	674,25
5	Concreto simple 21 Mpa	m ³	660,57

No.	Descripción	Unidad	Cantidad
6	Concreto ciclópeo 21 Mpa	m ³	230,50
7	Acero de refuerzo 420 Mpa	Kg	39.151,19
8	Excavación mecánica para estructuras	m ³	80
9	Concreto para cajas y descoles	m ³	72
10	Relleno compactado con material seleccionado de la excavación	m ³	24
11	Tubería en concreto Dint=90 cm	m	41,60

Tabla 6. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Málaga-Santander

Fuente: (Báez Gutiérrez, 2021)

6.2 Proyecto de mejoramiento vial del municipio de Rionegro

El proyecto se ejecuta en el municipio de Rionegro, ubicado al noroeste del departamento de Santander, a una altitud a 690 m.s.n.m., y los trabajos beneficiaran a los habitantes de las veredas de Alto de Pérez, Popas, San Jorge y Miraflores, correspondiendo a una población beneficiaria de 1.040 personas aproximadamente. Estas comunidades tienen como principal actividad económica la producción agropecuaria, resaltando el cultivo de cacao, cítricos y otras frutas. Las características socioeconómicas de los habitantes de los sectores objeto del proyecto, se caracterizan por ser bajos de conformidad con la estratificación establecida en el SISBÉN, la cual se encuentra clasificada en los niveles 0, 1 y 2 (García Rivera, 2021). Este proyecto se realizará en los siguientes tramos:

Tramo	Vereda	Longitud de la intervención (metros)
1	Alto de Pérez	64
2	Alto de Pérez	156
3	La Popa	68
4	San Jorge	196
5	San Jorge	73
6	Miraflores	133
7	Miraflores	117
8	Miraflores	117

Tabla 7. Tramos a intervenir en el municipio de Rionegro-Santander

Fuente: (García Rivera, 2021)

6.2.1. Suelos

Se realizaron labores de exploración en cada uno de los tramos, mediante apiques a cielo abierto que permitieran conocer las características y propiedades de los materiales presentes en el subsuelo. Estos apiques se realizaron a una profundidad de 1,5 metros por 1 metro cuadrado de área. A estos materiales se les aplica por igual los ensayos de CBR para determinar un diagnóstico más acertado.

Como conclusión de la realización de los respectivos análisis de las características geológicas y geotécnicas del sitio, permitió determinar que no existen limitaciones o amenazas geotécnicas importantes que afecten la estabilidad del proyecto, sin embargo, no se encontraron suelos sueltos hasta una profundidad 1,5 metros. Adicionalmente, en la visita de campo para la toma de muestra no se evidencia nivel freático en los apiques tomados, y se observa en los taludes encontrados que no presentan una amenaza hacia la vía a mejorar, debido que su corte está protegido por una buena capa vegetal y su composición no contiene rocas o material desprendible, claro está que, se aclara que el ancho de vía conformada se adapta los anchos dados en la guía de diseño para placa huellas de INVIAS, por lo cual no se intervendrán los mismos. Por último, recomienda el geotecnista que el espesor de losa y mejoramiento de base de 15 centímetros para cada una de ellas (Vera Viana, 2021).

Vereda	Alto de Pérez		La Popa		San Jorge		Miraflores	
	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)
CBR al 95% de Proctor M	1,29	14,88	1,69	32,46	1,56	20,06	1,56	8,56
CBR al 98% de Proctor M	1,41	19,20	1,84	42,90	1,70	36,56	1,70	26,16

Vereda	Alto de Pérez		La Popa		San Jorge		Miraflores	
Descripción del ensayo	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)	Densidad CBR (g/cm ³)	Densidad CBR (%)
CBR al 100% de Proctor M	1,43	20,61	1,88	45,57	1,73	41,31	1,73	30,52

Tabla 8. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de Rionegro-Santander
Fuente: (Vera Viana, 2021)

6.2.2. Topografía

Tramo 1. Alto de Pérez 1

Este tramo correspondiente a 64 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 22,45%, y el dibujo de la vía en este tramo, incluye dos curvas sencillas una en cada dirección, esto se puede ver mejor a continuación:

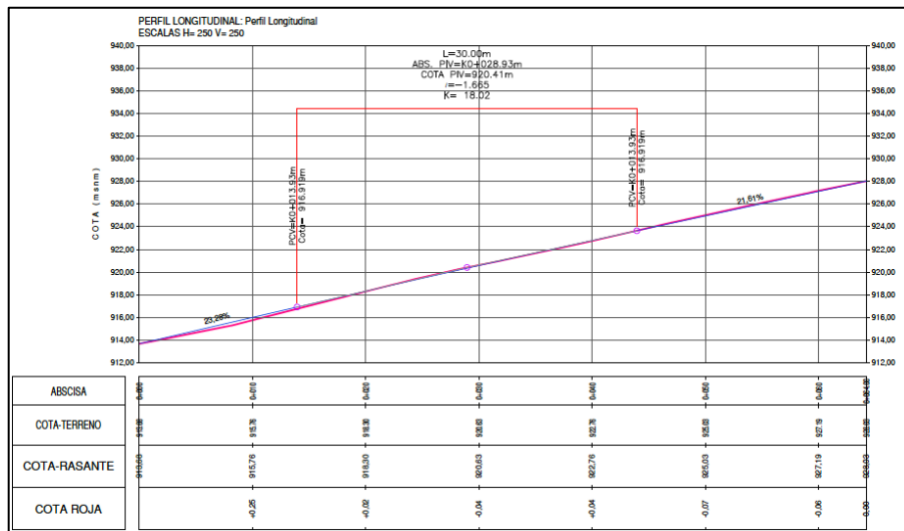


Ilustración 18. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

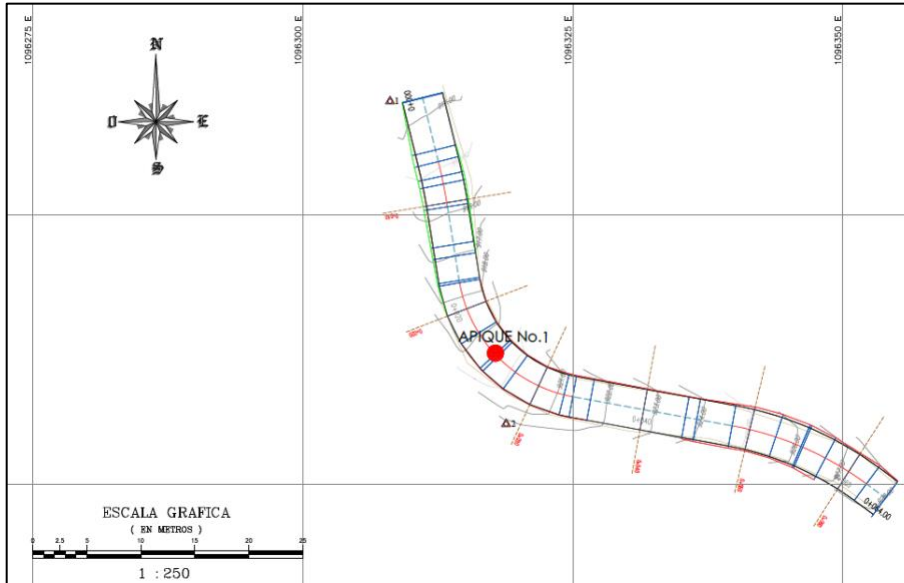


Ilustración 19. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 2. Alto de Pérez 2

Este tramo correspondiente a 154 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 19,53%, y el dibujo de la vía en este tramo es una semi recta en todo el recorrido, esto se puede ver mejor a continuación:

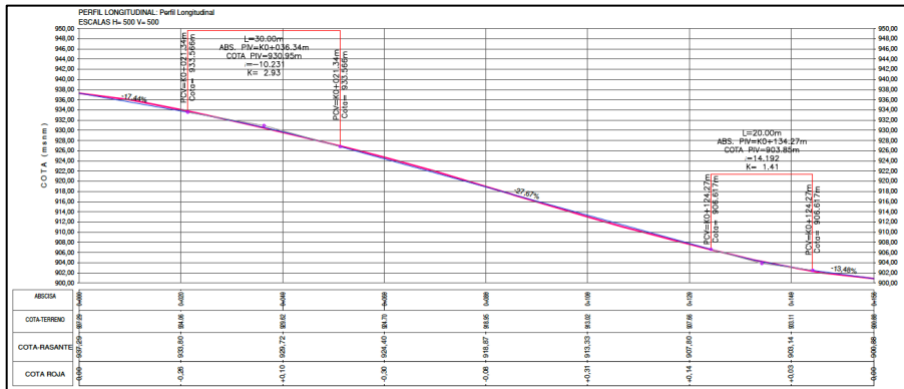


Ilustración 20. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

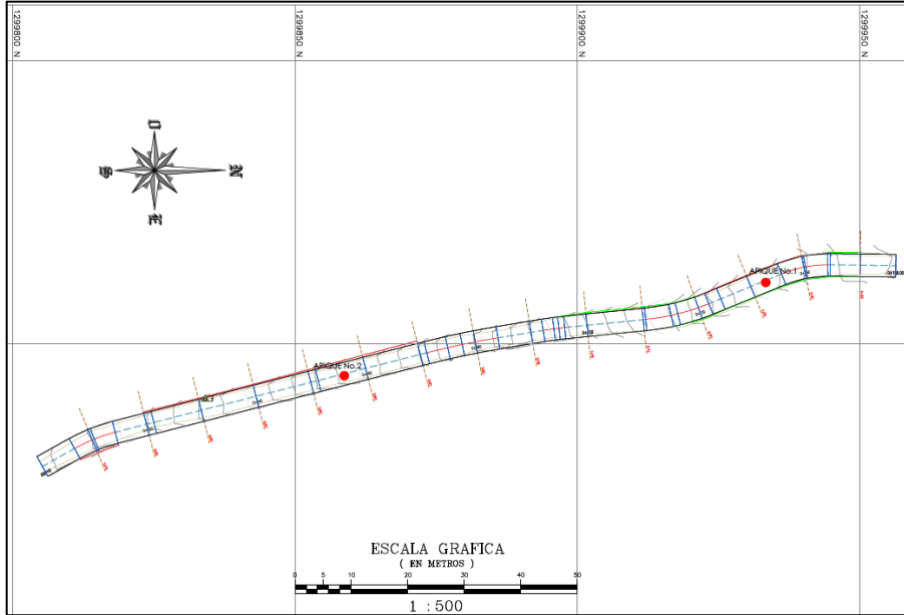


Ilustración 21. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 3. La Popa

Este tramo correspondiente a 68 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 16,84%, y el dibujo de la vía en este tramo es una sola curva lo que se intervendrá, esto se puede ver mejor a continuación:

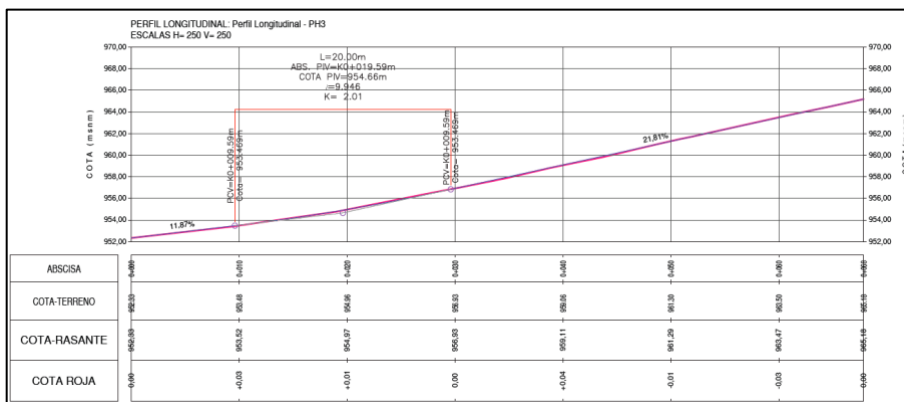


Ilustración 22. Perfil longitudinal del tramo 3 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

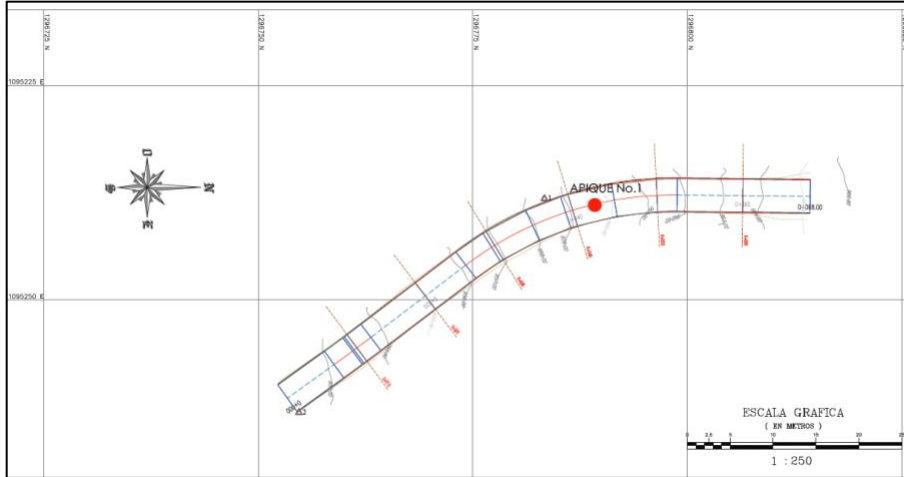


Ilustración 23. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de Rionegro-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 4. San Jorge 1

Este tramo correspondiente a 196 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 7,82%, y el dibujo de la vía en este tramo se presentan varias curvas sin alto grado de radio, esto se puede ver mejor a continuación:

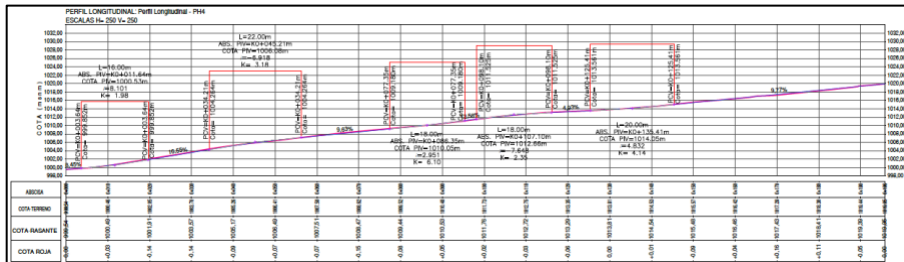


Ilustración 24. Perfil longitudinal del tramo 4 del proyecto de Rionegro-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

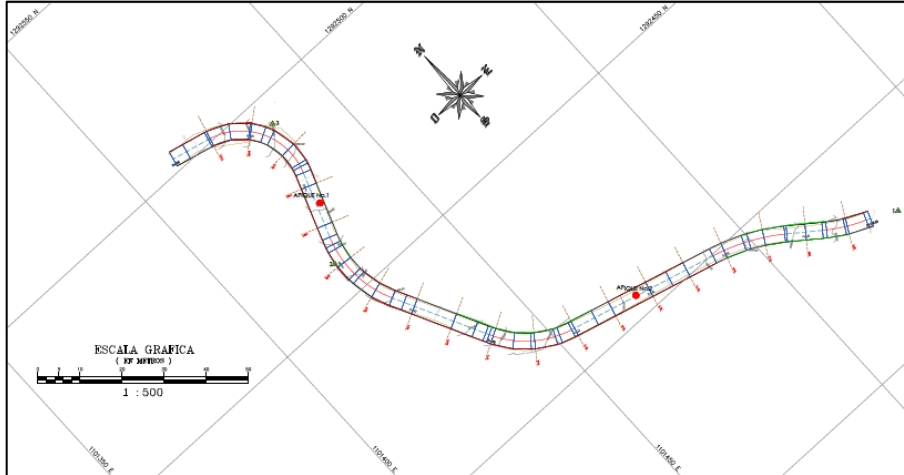


Ilustración 25. Imagen de planta del tramo 4 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 5. San Jorge 2

Este tramo correspondiente a 73 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 15,20%, y el dibujo de la vía en este tramo es una sola curva lo que se intervendrá, esto se puede ver mejor a continuación:

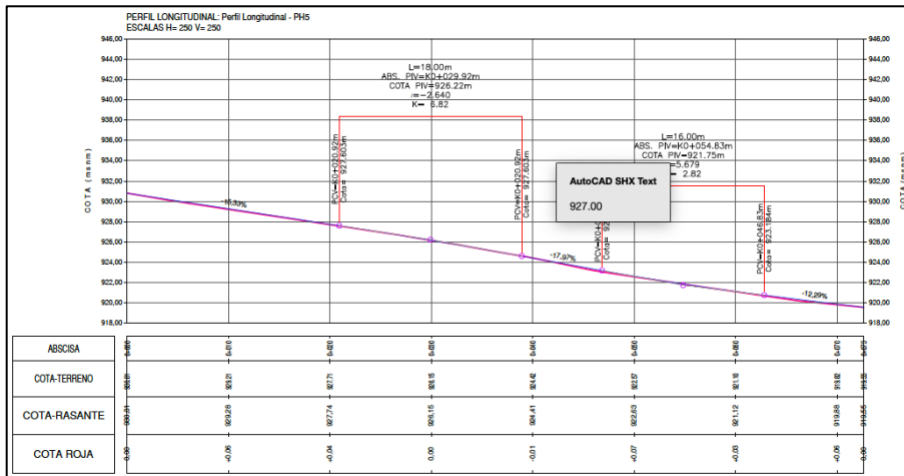


Ilustración 26. Perfil longitudinal del tramo 5 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

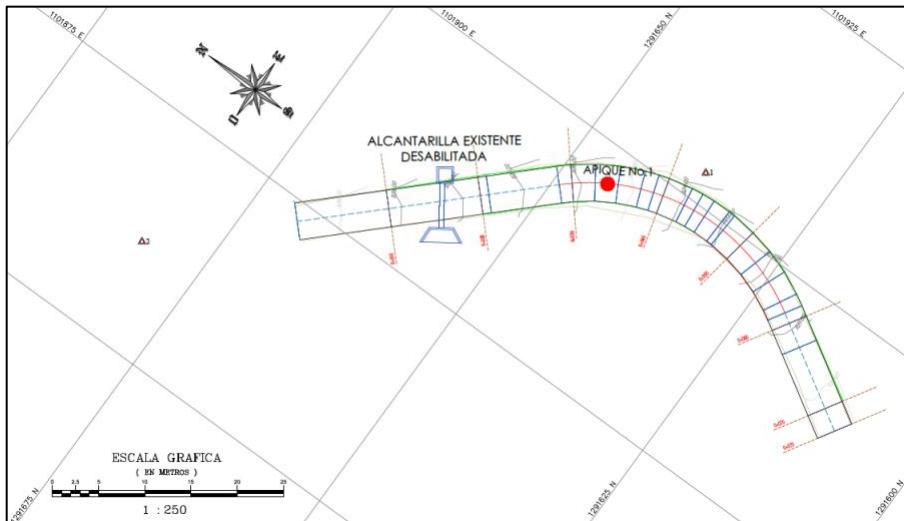


Ilustración 27. Imagen de planta del tramo 5 del proyecto de Rionegro-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 6. Miraflores 1

Este tramo correspondiente a 133 metros lineales de intervención, posee una pendiente promedio de 11,04%, y el dibujo de la vía en este tramo se tiene una recta con una curva sencilla, esto se puede ver mejor a continuación:

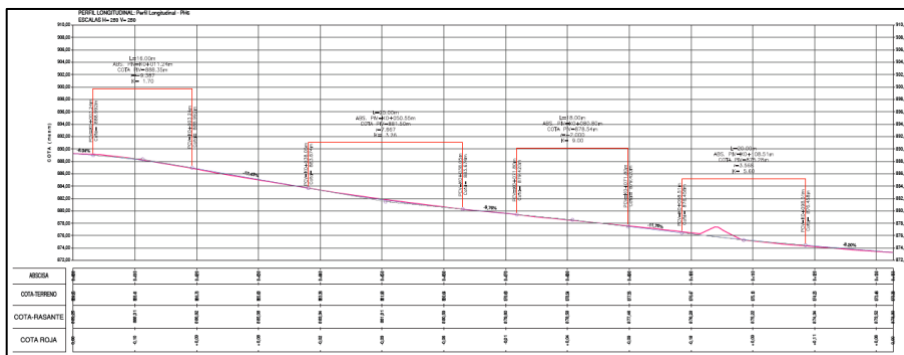


Ilustración 28. Perfil longitudinal del tramo 6 del proyecto de Rionegro-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

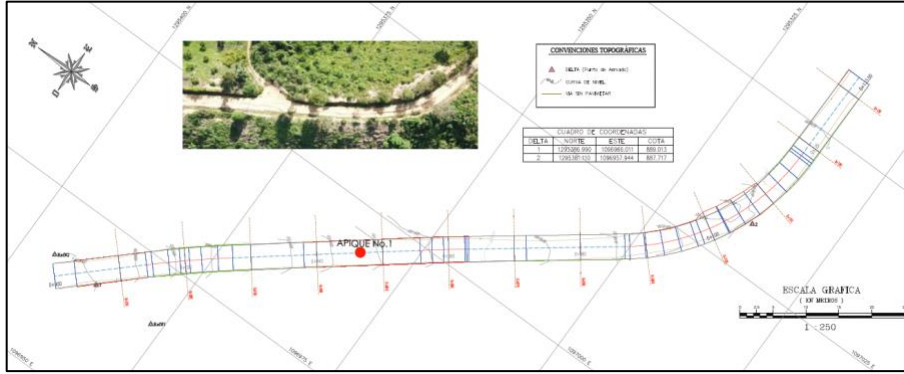


Ilustración 29. Imagen de planta del tramo 6 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 7. Miraflores 2

Este tramo correspondiente a 117 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 13,95%, y el dibujo de la vía en este tramo se presenta una sinuosidad leve en las curvas, esto se puede ver mejor a continuación:

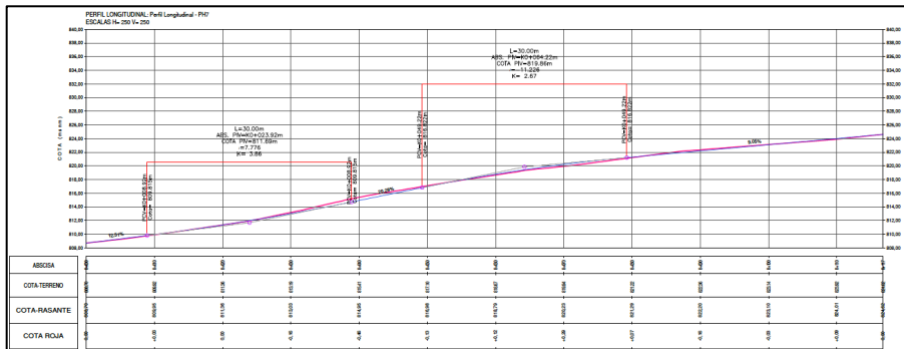


Ilustración 30. Perfil longitudinal del tramo 7 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

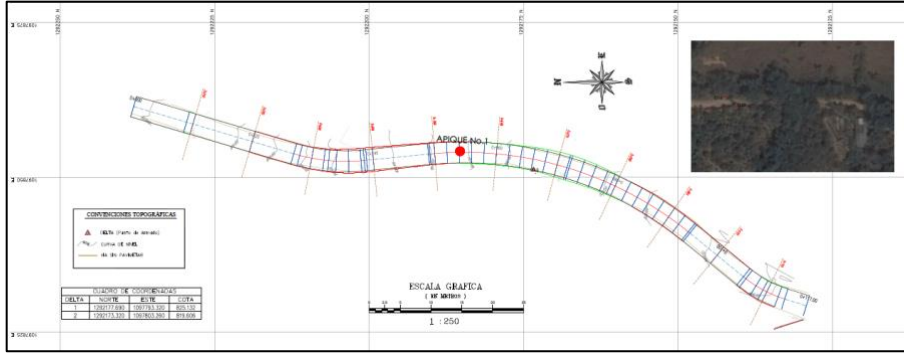


Ilustración 31. Imagen de planta del tramo 7 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

Tramo 8. Miraflores 3

Este tramo correspondiente a 117 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 11,75%, y el dibujo de la vía en este tramo se presenta una sinuosidad leve en las curvas, esto se puede ver mejor a continuación:

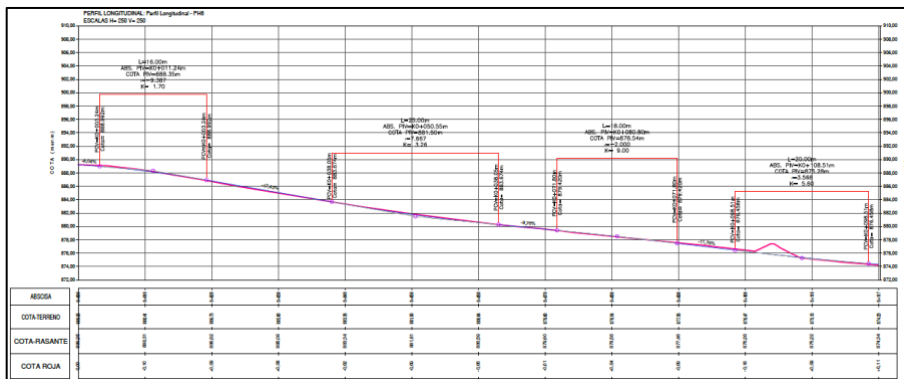


Ilustración 32. Perfil longitudinal del tramo 8 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

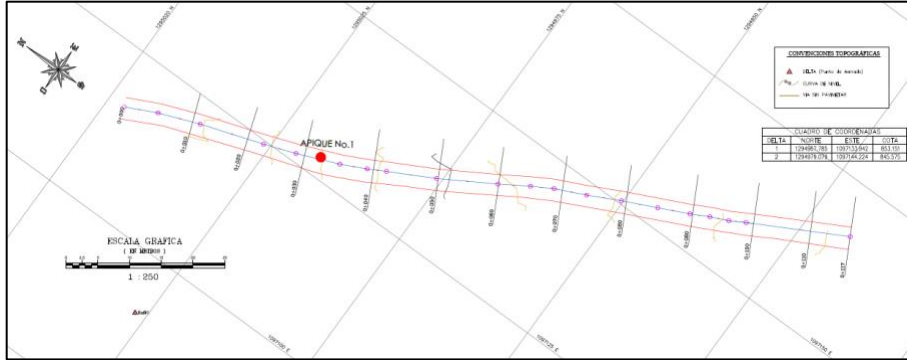


Ilustración 33. Imagen de planta del tramo 8 del proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

6.2.3. Diseño de pavimentos

Para el diseño de pavimentos, se tiene en cuenta toda la información anterior, y los diseñadores concluyen que las cintas de concreto deben ser de concreto reforzado de 15 centímetros de espesor, sobre una superficie de apoyo de 15 centímetros con sub-base (Vera Viana, 2021). El corte de este diseño de pavimento es el siguiente:

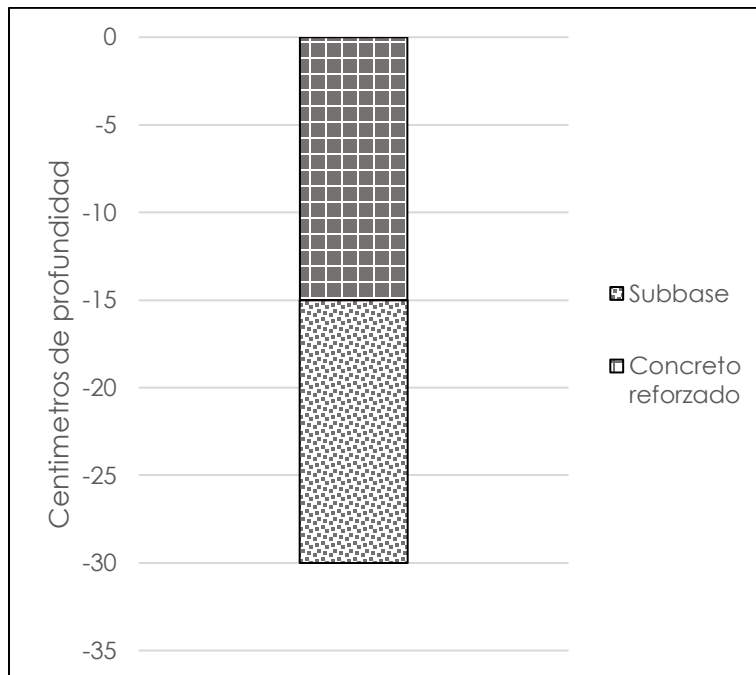


Ilustración 34. Corte de la estructura de pavimento para el proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

6.2.4. Diseño de obras complementarias

El proyecto de mejoramiento vial del municipio de Rionegro, en el departamento de Santander contempla la construcción de cinco alcantarillas en los siguientes tramos:

Alcantarilla	Tramo	Vereda	Tipo de actividad	Abscisa
1	2	Alto de Pérez	Construcción	0+148
2	4	San Jorge	Construcción	0+085
3	6	Miraflores	Construcción	0+025
4	7	Miraflores	Construcción	0+025
5	8	Miraflores	Construcción	0+065

Tabla 9. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de Rionegro-Santander

Fuente: (Salón Rangel, 2021)

Construir estas estructuras hidráulicas, requieren de ayuda de maquinaria con motores de combustión a diésel, por tal razón se muestran las dimensiones de estas estructuras para tenerlas en cuenta en la investigación:

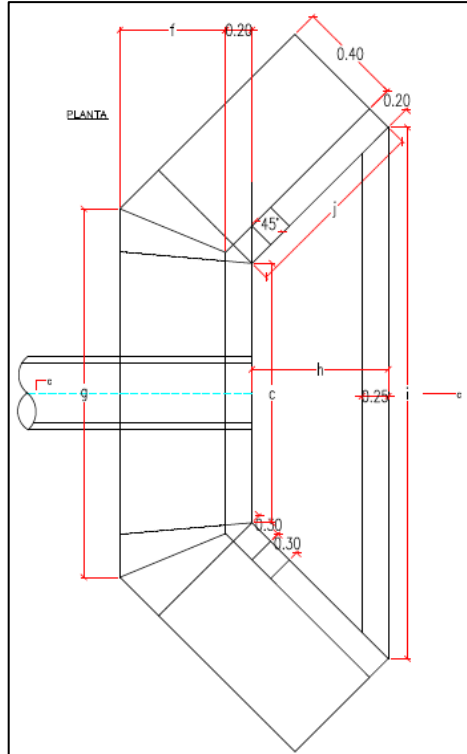


Ilustración 35. Planta de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Rionegro-Santander

Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

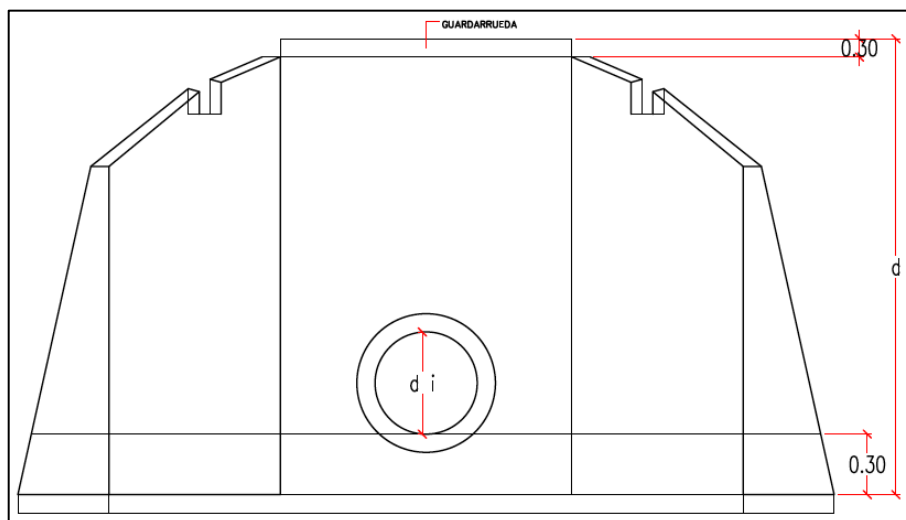


Ilustración 36. Corte de las estructuras hidráulicas a construir en el proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

6.2.5. Cantidades de obra

El proyecto de mejoramiento vial del municipio de Rionegro, contempla las siguientes cantidades de obra para su ejecución:

No.	Descripción	Unidad	Cantidad
1	Excavaciones varias en material común en seco	m ³	1662,35
2	Excavaciones varias en roca en seco	m ³	671,40
3	Conformación de la calzada existente	m ²	4615,00
4	Subbase granular clase B	m ³	692,25
5	Relleno para estructuras con suelo	m ³	78,00
6	Concreto resistencia 21 Mpa	m ³	631,56
7	Concreto resistencia 21 Mpa ciclópeo	m ³	249,21
8	Acero de refuerzo	Kg	35273,44
9	Tubería de concreto reforzado 21 Mpa de 900 mm diámetro	m	30
10	Concreto de limpieza	m ³	6

Tabla 10. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Rionegro-Santander
Fuente: (García Rivera, 2021)

6.3 Proyecto de mejoramiento vial del municipio de San Vicente de Chucuri

El municipio de San Vicente de Chucuri se encuentra ubicado en el departamento de Santander, en la zona central del departamento. Posee una producción importante de productos agrícolas como el cacao, el café, los cítricos, el aguacate y otros frutales, que se transportan por

la red terciaria de vías hacia el casco urbano del municipio. También es importante la producción de ganado vacuno y en menor grado, los porcinos, los equinos y la piscicultura (González Jaimes, 2021) . Este proyecto se realizará en los siguientes tramos:

Tramo	Sitio	Longitud de la intervención (metros)
1	Clavellinas 2	120
2	Clavellinas 1	60
3	Colorados	140
4	Tierra Buena	120
5	Tierra Buena 2	60
6	El Paraíso	120
7	San Cristóbal	100
8	Táguales	120
9	La Curva	140

Tabla 11. Tramos a intervenir en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: (González Jaimes, 2021)



Ilustración 37. Ubicación de los frentes en el proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de Rionegro-Santander

6.3.1. Suelos

Las zonas estudiadas en general corresponden a montañas con pendientes fuertes y escarpes, existe evidencia de deslizamientos rotacionales y flujos, posiblemente generados por la gran humedad presente en la zona. Localmente no se evidencian problemas de deslizamientos a pesar del alta pendiente, esto se debe a la gran cobertura vegetal y arbórea que existe. Los tramos estudiados, tienen geformas de origen antrópico precisamente por el corte realizado para construir las calzadas existentes tipo media ladera. Se realizan apiques en cada uno de los tramos a intervenir, de 1,5 metros de profundidad, y se aplican ensayos de laboratorio al material, que son de granulometría, límites de consistencia, y humedad natural (Pico, 2021). Con estos datos, también se realizan los análisis de CBR y se obtienen los siguientes datos:

Tramo	CBR Correlación granulares INVIAS (%)	
	D60	CBR %/fs
1	0,045	4,7
2	0,046	4,7
3	0,072	5,5
4	0,071	5,4
5	0,063	5,2
6	0,064	5,2
7	0,065	5,3
8	0,099	6,1
9	0,115	6,5

Tabla 12. Valores del ensayo CBR en los tramos a intervenir en el municipio de San Vicente de Chucuri-Santander

Fuente:(Pico, 2021)

El geotecnista concluye que la implementación de placa huellas, se podrá aplicar en todos los tramos un espesor de subbase de 15,0 centímetros excepto en los tramos 3 y 4 donde habrá que instalar la capa de 40 centímetros de sub-base sobre material de mejoramiento, adicionalmente, en ninguno de estos tramos se encontraron puntos críticos o movimiento de suelos activos, pero si recomienda por los altos niveles de humedad, la implementación de un

filtro de profundidad de 1 metro. Por otra parte, no se espera la realización de excavaciones importantes, además se recomienda mantener el alineamiento existente de la vía y evitar cortes en taludes para no generar inestabilidad de laderas (Pico, 2021).

6.3.2. Topografía

Tramo 1. Clavellinas 2

Este tramo correspondiente a 120 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 8,83%, y el dibujo de la vía en este tramo, incluye dos curvas sencillas una en cada dirección, esto se puede ver mejor a continuación:

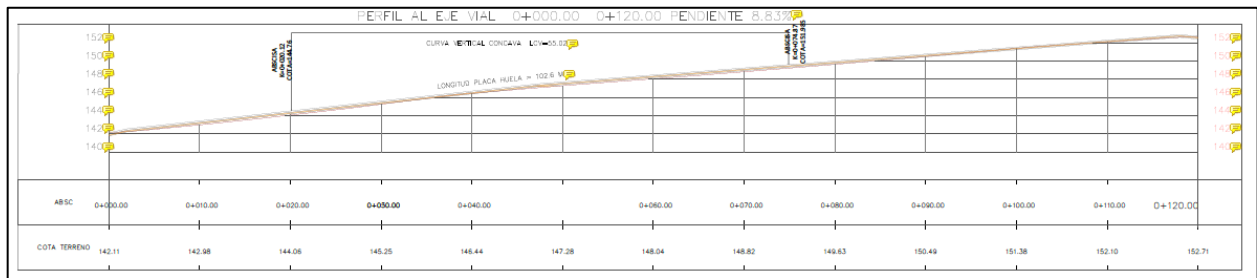


Ilustración 38. Perfil longitudinal del tramo 1 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

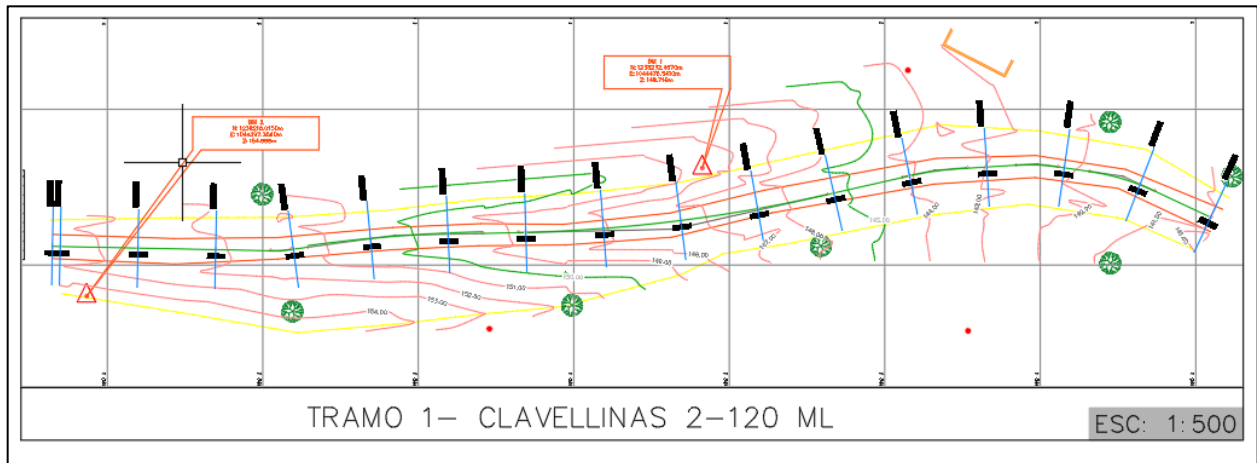


Ilustración 39. Imagen de planta del tramo 1 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 2. Clavellinas 1

Este tramo correspondiente a 60 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 10,37%, y el dibujo de la vía en este tramo es una curva completa, esto se puede ver mejor a continuación:

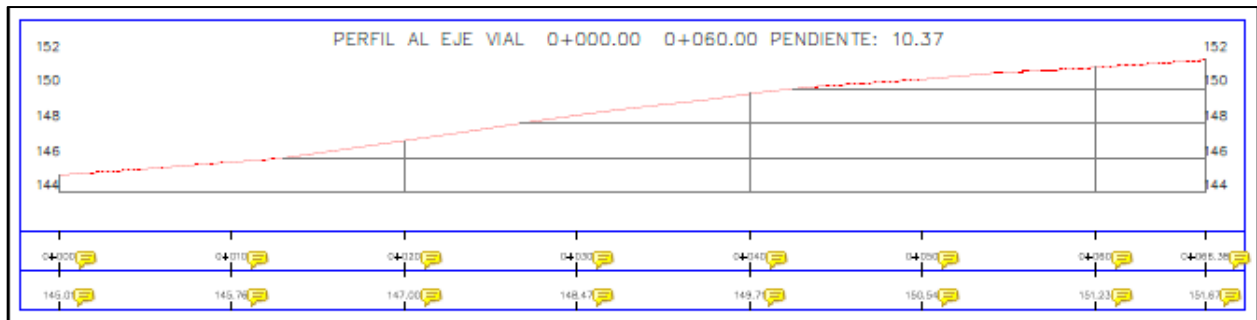


Ilustración 40. Perfil longitudinal del tramo 2 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

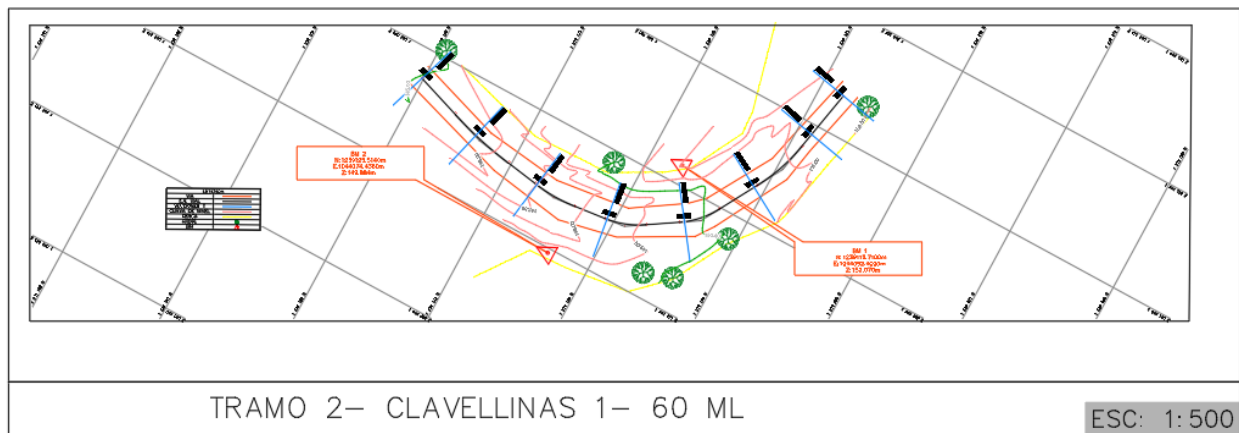


Ilustración 41. Imagen de planta del tramo 2 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 3. Colorados

Este tramo correspondiente a 140 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 10,61%, y el dibujo de la vía en este tramo es una sola curva lo que se intervendrá, esto se puede ver mejor a continuación:

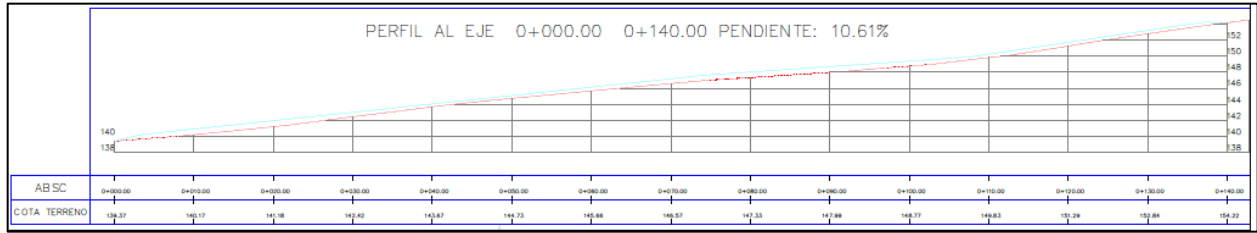


Ilustración 42. Perfil longitudinal del tramo 3 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

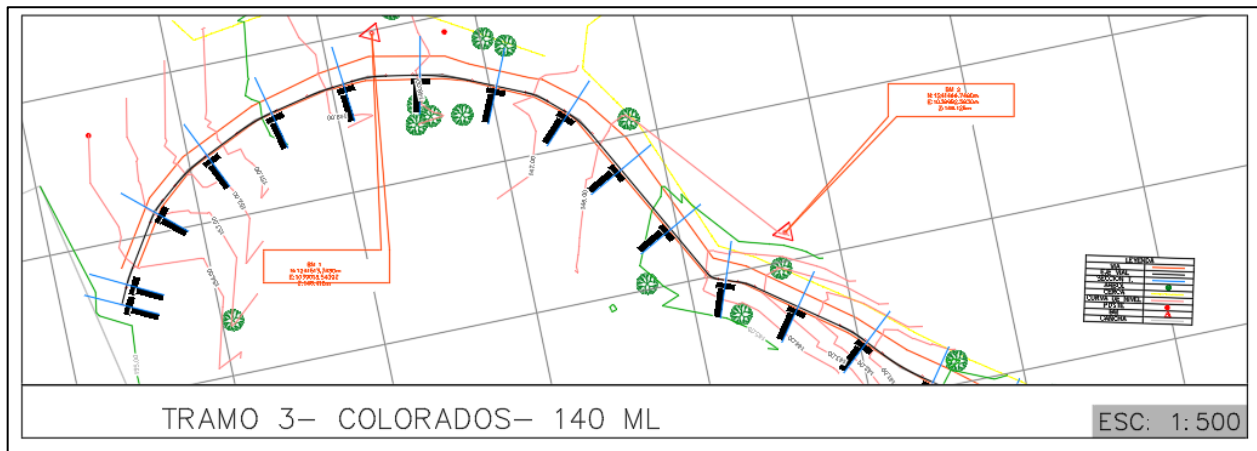


Ilustración 43. Imagen de planta del tramo 3 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 4. Tierra Buena 1

Este tramo correspondiente a 120 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 7,57%, y el dibujo de la vía en este tramo se presentan varias curvas sin alto grado de radio, esto se puede ver mejor a continuación:

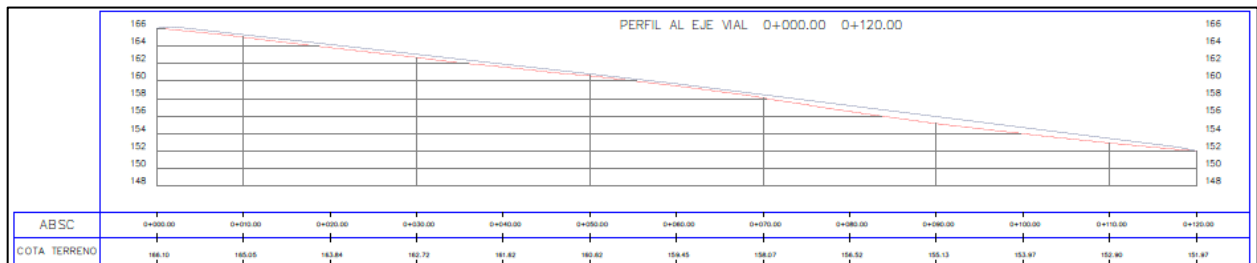


Ilustración 44. Perfil longitudinal del tramo 4 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

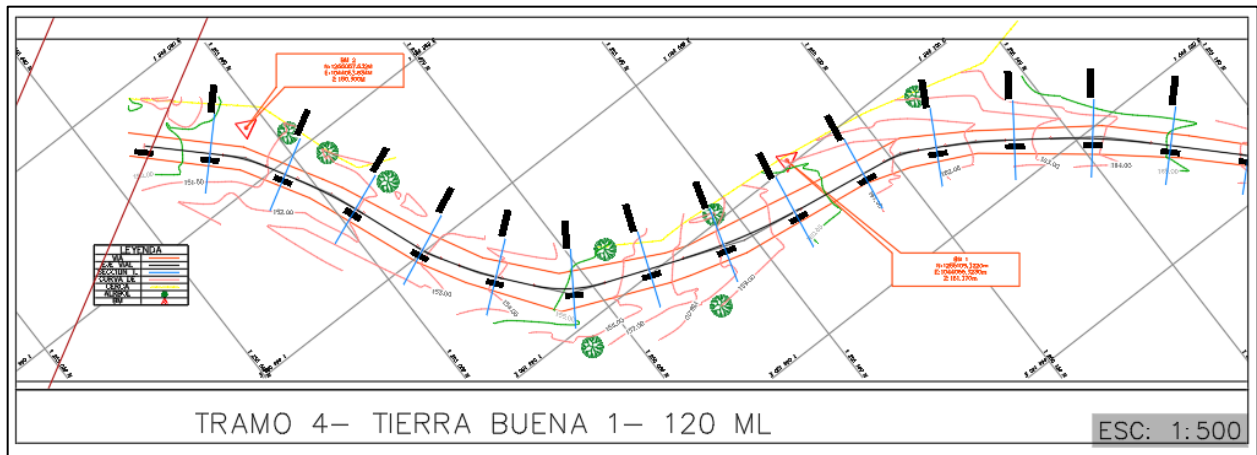


Ilustración 45. Imagen de planta del tramo 4 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 5. Tierra Buena 2

Este tramo correspondiente a 60 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 9%, y el dibujo de la vía en este tramo es una semirrecta lo que se intervendrá, esto se puede ver mejor a continuación:

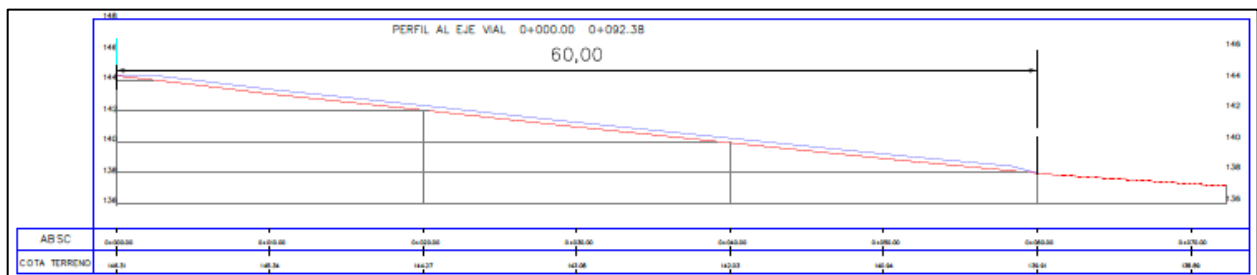


Ilustración 46. Perfil longitudinal del tramo 5 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

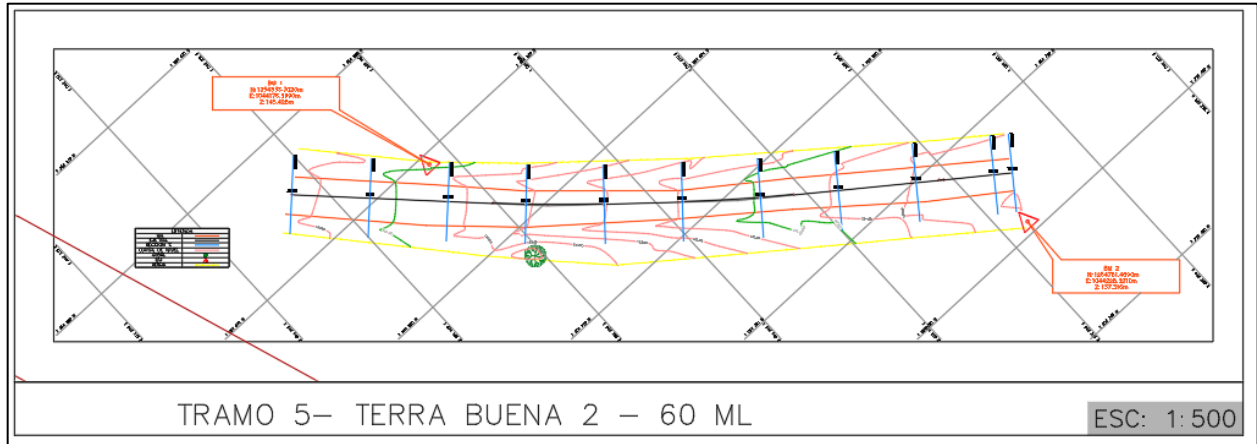


Ilustración 47. Imagen de planta del tramo 5 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 6. El Paraíso

Este tramo correspondiente a 120 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 7,96%, y el dibujo de la vía en este tramo es una recta con una curva sencilla, esto se puede ver mejor a continuación:

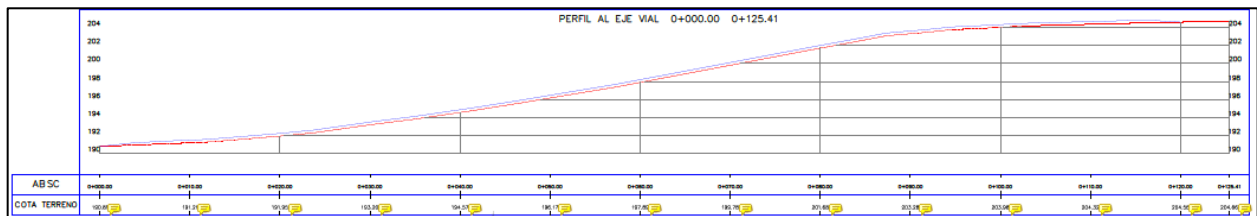


Ilustración 48. Perfil longitudinal del tramo 6 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

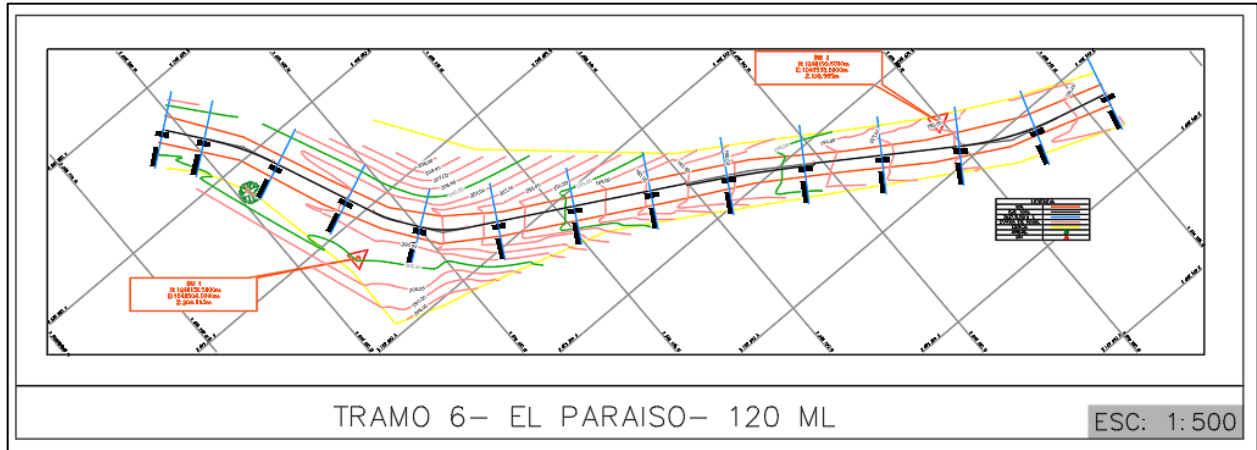


Ilustración 49. Imagen de planta del tramo 6 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 7. Miraflores 2

Este tramo correspondiente a 117 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 16,24%, y el dibujo de la vía en este tramo son dos curvas con ángulos mayores a 90 grados, esto se puede ver mejor a continuación:

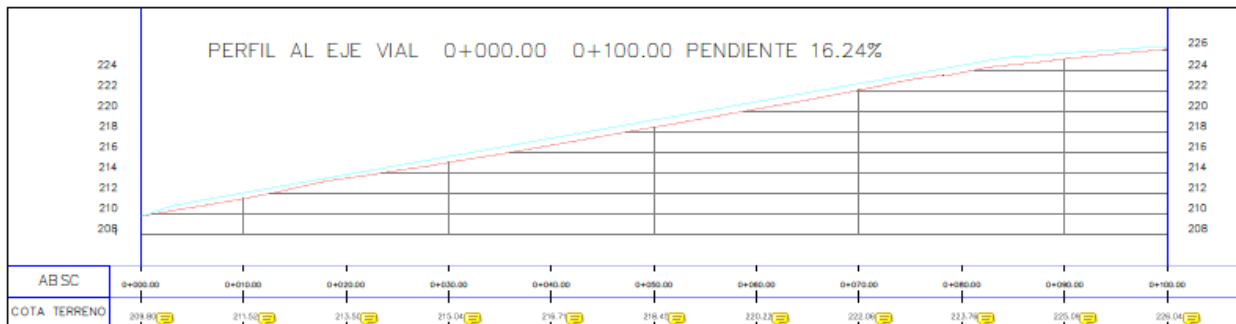


Ilustración 50. Perfil longitudinal del tramo 7 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

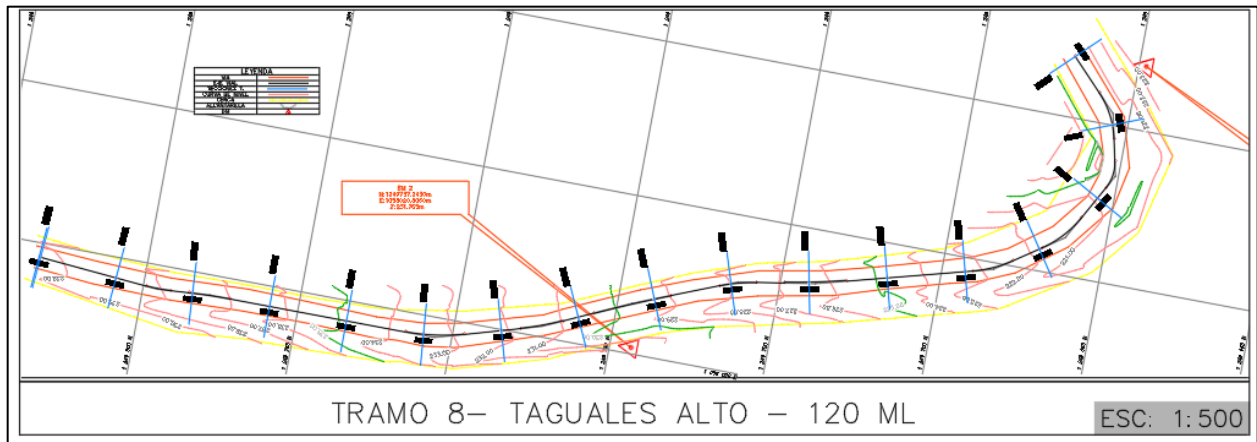


Ilustración 53. Imagen de planta del tramo 8 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Tramo 9. La Curva

Este tramo correspondiente a 140 metros lineales de intervención posee una pendiente promedio de 12,14%, y el dibujo de la vía en este tramo es una seguidilla de semicurvas, esto se puede ver mejor a continuación:

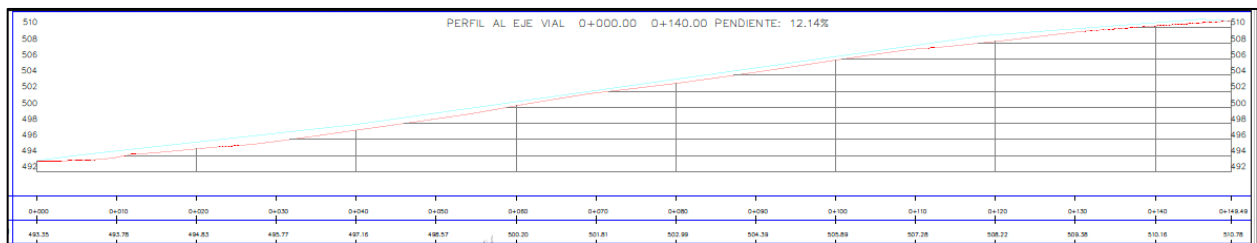


Ilustración 54. Perfil longitudinal del tramo 9 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

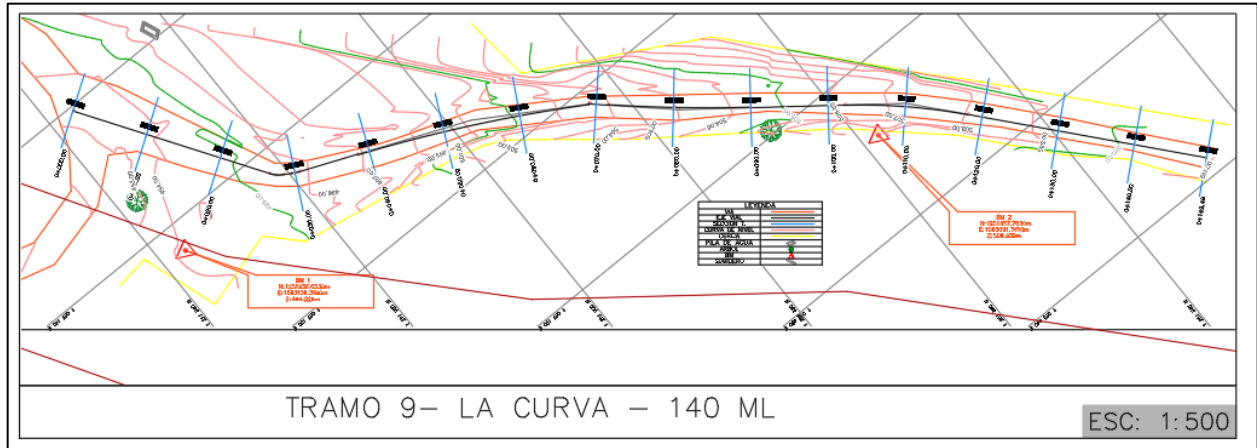


Ilustración 55. Imagen de planta del tramo 9 del proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

6.3.3. Diseño de pavimentos

Para el diseño de pavimentos, se tiene en cuenta toda la información anterior, y los diseñadores concluyen que se deben tener dos casos, uno para los tramos 1, 2, 5, 6, 7, 8 y 9 en el cual las cintas de concreto deben ser de concreto reforzado de 15 centímetros de espesor, sobre un solado de limpieza de 5 centímetros en concreto simple y una superficie de apoyo de 15 centímetros con sub-base (González Jaimes, 2021). El corte de este diseño de pavimento es el siguiente:

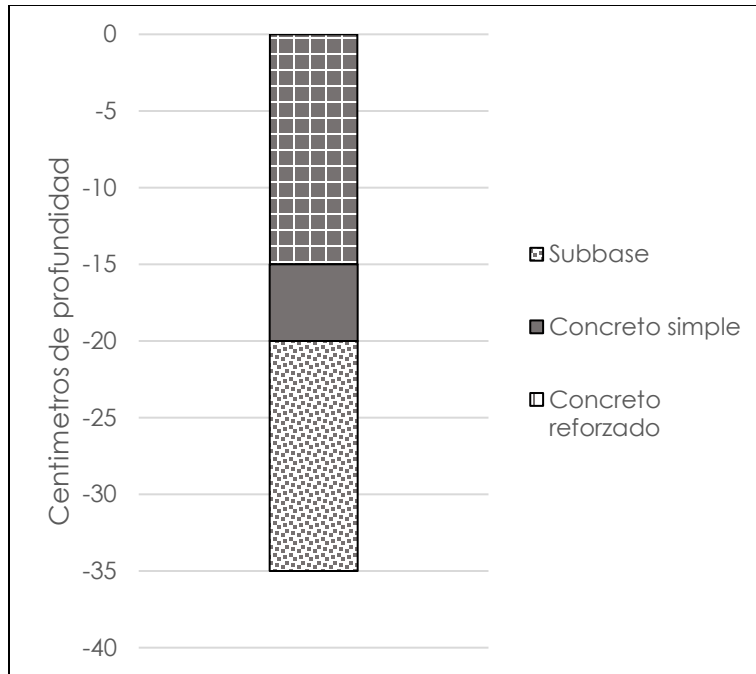


Ilustración 56. Corte de la estructura de pavimento para los tramos 1, 2, 5, 6, 7, 8 y 9 el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander
 Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

Pero, también se concluyó que para los tramos 3 y 4 se debe hacer un mejoramiento más amplio de la subrasante, por tanto, esta capa pasaría de 15 a 40 centímetros de espesor, como se muestra a continuación:

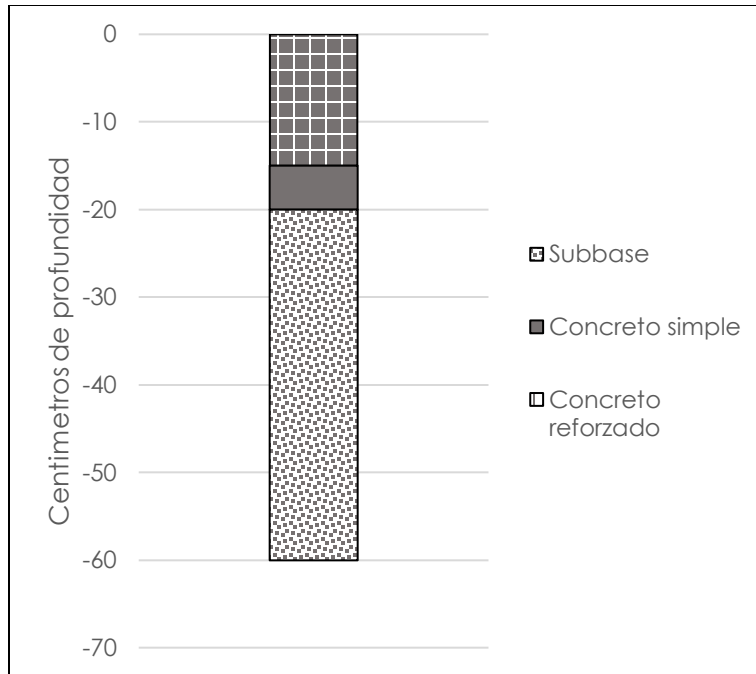


Ilustración 57. Corte de la estructura de pavimento para los tramos 3 y 4 el proyecto de San Vicente de Chucuri-Santander

Fuente: Alcaldía Municipal de San Vicente de Chucuri-Santander

6.3.4. *Diseño de obras complementarias*

El proyecto de mejoramiento vial del municipio de San Vicente de Chucuri, en el departamento de Santander contempla la construcción de dos alcantarillas en los siguientes tramos:

Alcantarilla	Tramo	Sector	Tipo de actividad
1	4	Tierra Buena	Construcción
2	9	La Curva	Construcción

Tabla 13. Ubicación de las alcantarillas que se intervendrán en el proyecto del municipio de San Vicente de Chucuri-Santander

Fuente:(Rincón Suarez, 2021)

Construir estas estructuras hidráulicas, requieren de ayuda de maquinaria con motores de combustión a diésel, por tal razón se muestran las dimensiones de estas estructuras para tenerlas en cuenta en la investigación:

No.	Descripción	Unidad	Cantidad
9	Rellenos para estructuras con recebo	m ³	56,18
11	Concreto resistencia 14 Mpa	m ³	1,98
12	Tubería de concreto reforzado de 900 mm de diámetro	m	12
13	Filtro francés en material drenante	m	1000,5

Tabla 14. Cantidades de obra para el proyecto del municipio de Rionegro-Santander

Fuente: (García Rivera, 2021)

7. Análisis de ciclo de vida del diésel

7.1 Definiciones del ACV

7.1.1 Alcance del ciclo de vida

El alcance del análisis de ciclo de vida del diésel, es referido al volumen de combustible necesario para la provisión de energía de las máquinas y equipos dotados de motores de combustión interna, y que se utilizan en la construcción de 3 proyectos de mejoramiento de vías terciarias, el cual tendrá las siguientes actividades constructivas:



Ilustración 60. Proceso de construcción de una vía

Fuente: (Departamento Nacional de Planeación, 2017)

7.1.2 Límites del análisis

El límite del ACV será un análisis “Door to Tank” o de la “Puerta al tanque”, que identifica, evalúa y compara los impactos ambientales que genere el consumo del diésel referido

a la intervención de 1 kilómetro (Km) de vía, y que este combustible que llegue al sitio de obra, sin tener en cuenta los impactos que se generen en la extracción de materias primas y producción del diésel al lugar donde se almacenará por los constructores.

7.1.3 Unidad funcional

Se plantea como la unidad funcional un (1) kilometro (Km) de mejoramiento de vía terciaria en Colombia.

$$UF = 1 \text{ km}$$

7.1.4 Elección del modelo de ACV

El modelo que se elige para este análisis de ciclo de vida es el de subgrupos debido a que se analiza el uso del diésel como combustible para la maquinaria necesaria dentro del mejoramiento de una vía terciaria, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se realizará una medición del uso del diésel y del impacto generado en el medio ambiente.
- Se evaluarán los impactos generados por la combustión del diésel.
- Se evaluará los impactos en los escenarios de tres proyectos reales en el territorio nacional

7.1.5 Definición de la base de datos.

Para este análisis se utilizará el software licenciado y adquirido por la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, llamado *SimaPro v8*, el cual contiene la base de datos *Ecoinvent*, la cual incluye dentro de su inventario de productos analizados, el diésel en diferentes tipologías, como en el transporte de personas, operación de maquinaria, transporte de carga, entre otros. (EcoInvent, 2021)

Adicionalmente, esta base de datos tiene dentro del inventario de zonas geográficas a Colombia, y a los elementos analizados, el cual incluye al diésel consumido en la maquinaria de construcción (EcoInvent, 2021).

7.2 Insumos para el ACV

7.2.1 *Datos de campo*

Para este análisis de ciclo de vida se tiene como insumo, en primera instancia los datos obtenidos en campo, los cuales comprenden el registro horario del trabajo de las maquinas usadas en los mejoramientos viales, que, para los tres proyectos evaluados, utilizaron una retroexcavadora, una motoniveladora, un minicargador y un vibro compactador. Adicionalmente, se toma en campo el número de viajes que realiza las volquetas que apoyan cada uno de los proyectos constructivos, para evacuar los residuos de excavación y demolición de los frentes de trabajo, y surtir de subbase granular a cada uno de ellos.

La toma de estos datos se realiza bajo el procedimiento de toma de datos, explicado en la metodología de esta investigación, y son colectados y consignados por personal en el sitio de trabajos que colabora con este estudio, iniciando con el registro visual inicial de cada maquina y posteriormente con el registro de número de horas de trabajo de la maquinaria y viajes realizados por las volquetas. Este trabajo inicia desde el mes de febrero de 2022 y termina en el mes de octubre del mismo año, hasta el cumplimiento de los alcances de cada uno de los tres proyectos de mejoramiento vial.

7.2.2 Modificaciones de la base de datos de EcoInvent

Por otra parte, y como se mencionó anteriormente, la base de datos de EcoInvent que sirve de proveedor de información para el software SimaPro, contiene dentro de su catálogo el diésel como material para realizarse el análisis de ciclo de vida, el cual tiene sus datos de entrada que corresponde a los valores de la composición de fabricación del diésel, y los datos de salida con la respectiva medición de compuestos contaminantes que genera la combustión del diésel en los motores de combustión interna para motores de la maquinaria de la construcción.

Sin embargo, esta información está basada en un estándar dado por la Oficina Federal del Medio Ambiente de la Confederación Suiza FOEN (Sigla en inglés de Federal Office for the Environment), la cual indica que el diésel tiene $2,98303 \times 10^{-7}$ kilogramos de azufre en cada megajulio de diésel producido; considerando la necesidad de que los datos reflejen valores utilizados en Colombia, se realiza un procedimiento de parametrización, a partir de la información suministrada por ECOPETROL, identificando en el software el material específico dentro del inventario de EcoInvent, localizando el parámetro de entrada específica y reemplazando el valor referido por ECOPETROL para la composición del diésel colombiano, permitiendo así ajustar los valores para el análisis, como se refiere en la figura a continuación:

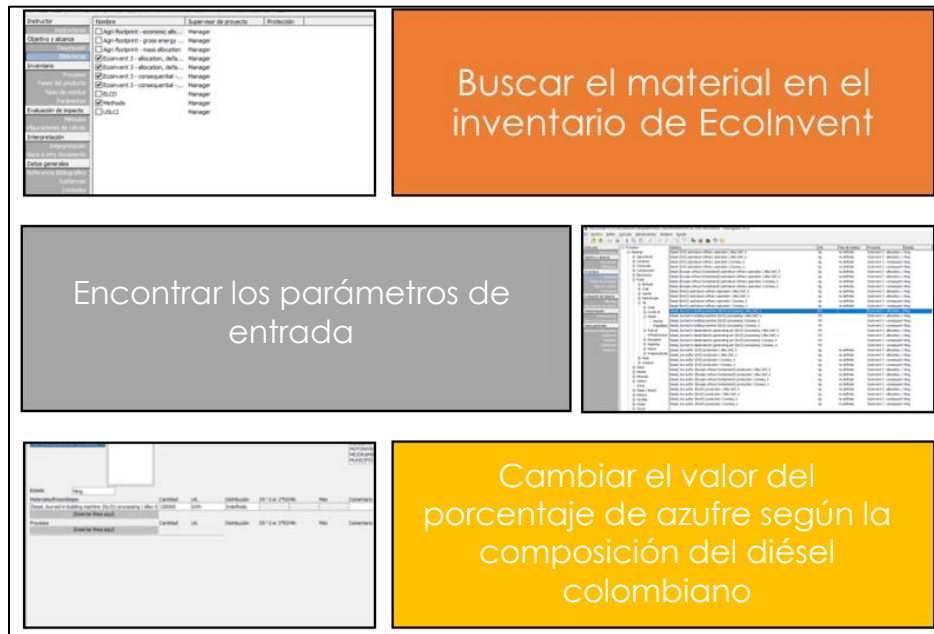


Ilustración 61. Proceso de modificación de un material en SimaPro
Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en la figura anterior, la información referida por ECOPETROL, en relación con que el diésel producido en las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena, contiene 0,0015% en masa de azufre (ECOPETROL, 2021), y con el dato del poder calorífico del diésel colombiano calculado por la Universidad Nacional de Colombia, que es de 43,829 MJ/Kg (Universidad Nacional de Colombia, 2014), se realizaron los siguientes cálculos:

Este es el valor del poder calorífico del diésel:

$$(1) \quad \text{Poder calorífico diésel} = 43,829 \frac{MJ}{Kg}$$

Esto quiere decir que en un kilogramo de diésel se produce 43,829 MJ de energía, pero se requiere conocer en 1 MJ cuantos kilogramos de diésel se necesitan, esto será el inverso de este dato dado en la ecuación 1, y quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{1^{(2)}}{\text{Poder calorífico del diésel}}$$

$$\frac{1^{(3)}}{43,829 \frac{MJ}{Kg}}$$

$$0,022 \frac{Kg}{MJ}^{(4)}$$

Ahora bien, como el documento del ECOPEPETROL refiere que el 0,0015% de la masa del diésel producido en Colombia corresponde a la masa del azufre que contiene el combustible, se traduciría a los siguiente en términos de un mega Julio de diésel colombiano, tomando como referencia el dato de la ecuación 4:

$$0,022 \frac{Kg}{MJ} \times 0,0015 = 3,422 \times 10^{-5} \frac{Kg}{MJ}^{(5)}$$

Entonces, dentro de 1 mega Julio de diésel colombiano tendría 3,422x10⁻⁵ kilogramos de azufre, y este dato es el que se modifica dentro de la base de datos de EcoInvent, para posteriormente simularlo en el software de SimaPro, con el fin de obtener una resultante más cercana al panorama nacional.

7.3 Proceso de ejecución del ACV

El software SimaPro, es la herramienta elegida para realizar la ejecución de la metodología de análisis de ciclo de vida del diésel, y en este, se deben diligenciar diversos módulos para encontrar una resultante que cumpla con el alcance y los objetivos de este estudio. Por tal razón, se realiza una descripción del modelo a analizar, se define el inventario de datos donde se describen los procesos y las fases del producto, y por último se tiene la determinación

de los impactos. A continuación, se describirá el proceso de generación del modelo dentro del software.

7.3.1 Descripción del modelo

En esta fase, el software da la posibilidad a su usuario, de definir cuál será la base de datos que utilizará para requerir de allí los materiales y procesos a analizar, así como la posibilidad de que estos materiales y procesos estén específicos para una zona geográfica del planeta. Por esto, y como se definió con anterioridad, la base de datos será la de EcoInvent, la cual contiene al diésel como materia prima, y con la especificación de su uso en maquinaria de la construcción.

También aquí se ingresa en el software lo que ya antes se había mencionado, el alcance, la unidad funcional, y los límites del sistema, los cuales ya están definidos con anterioridad, y con esto, el modelo ya tiene los datos iniciales o macro para realizar los respectivos análisis. A continuación, se muestra una captura de pantalla del software en el que se observa los datos incluidos en esta fase.

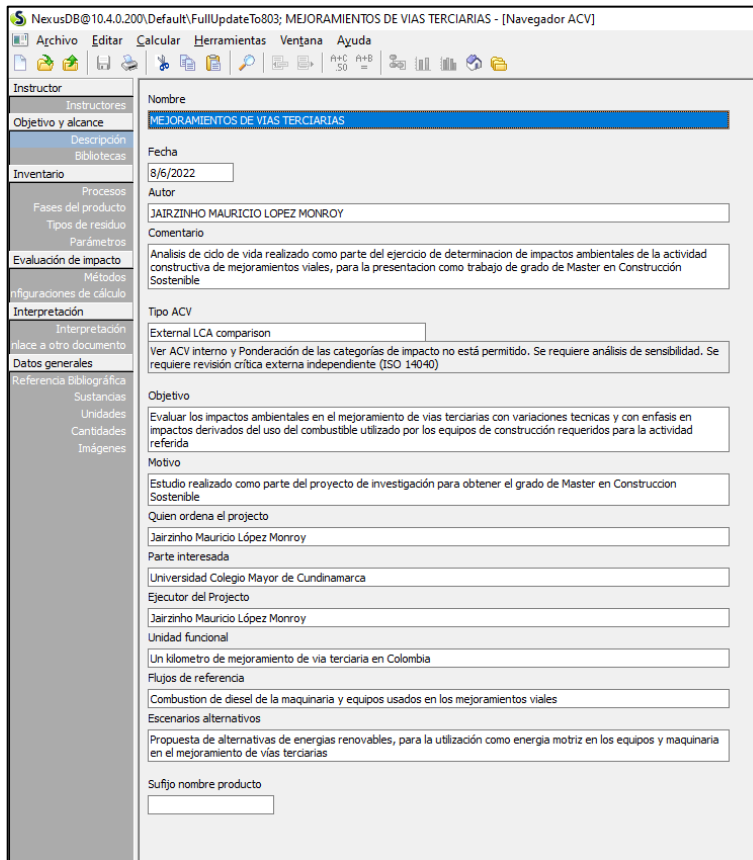


Ilustración 62. Captura de pantalla de la creación del proyecto en SimaPro
Fuente: Elaboración propia

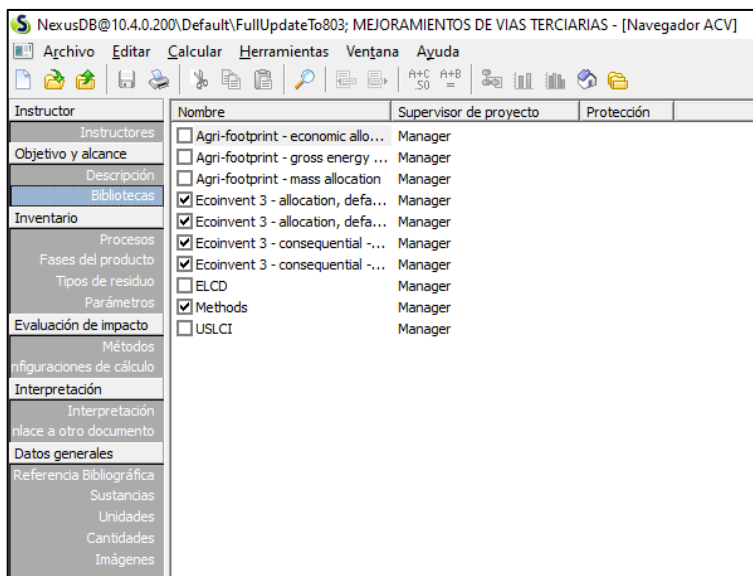


Ilustración 63. Captura de pantalla de la selección de la base de datos de EcoInvent
Fuente: Elaboración propia

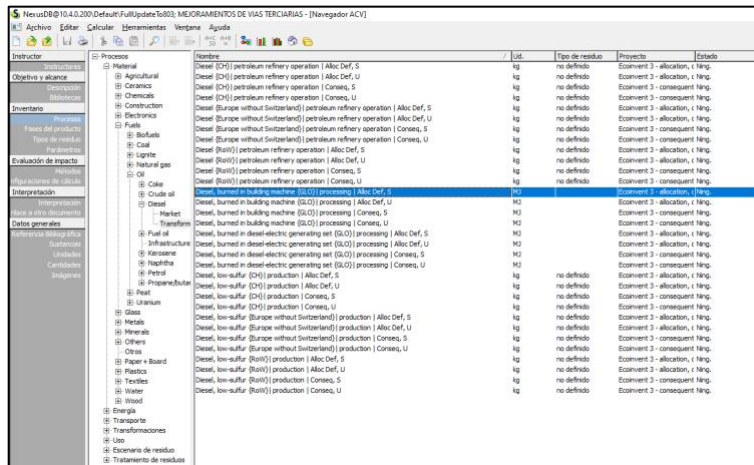


Ilustración 64. Captura de pantalla de la selección del proceso en SimaPro
Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Inventario de datos del modelo

En esta parte del manejo del software se debe tener claro cómo se va a desarrollar el modelo, por lo que se definen los materiales y procesos a analizar, y para esta investigación, se definió que se va a utilizar como materiales únicamente, el diésel como materia prima para el proceso de combustión de la maquinaria de construcción, y el proceso de transporte de este combustible a cada uno de los frentes de trabajo.

También se definió la estructura de cargue de datos, y para esto se cargaron los datos por cada uno de los frentes de trabajo por separado en cada uno de los proyectos, con eso, se tendrá un ingreso de datos independiente, pero un análisis por proyecto en conjunto con todos sus tramos intervenidos, tal como se muestra a continuación:

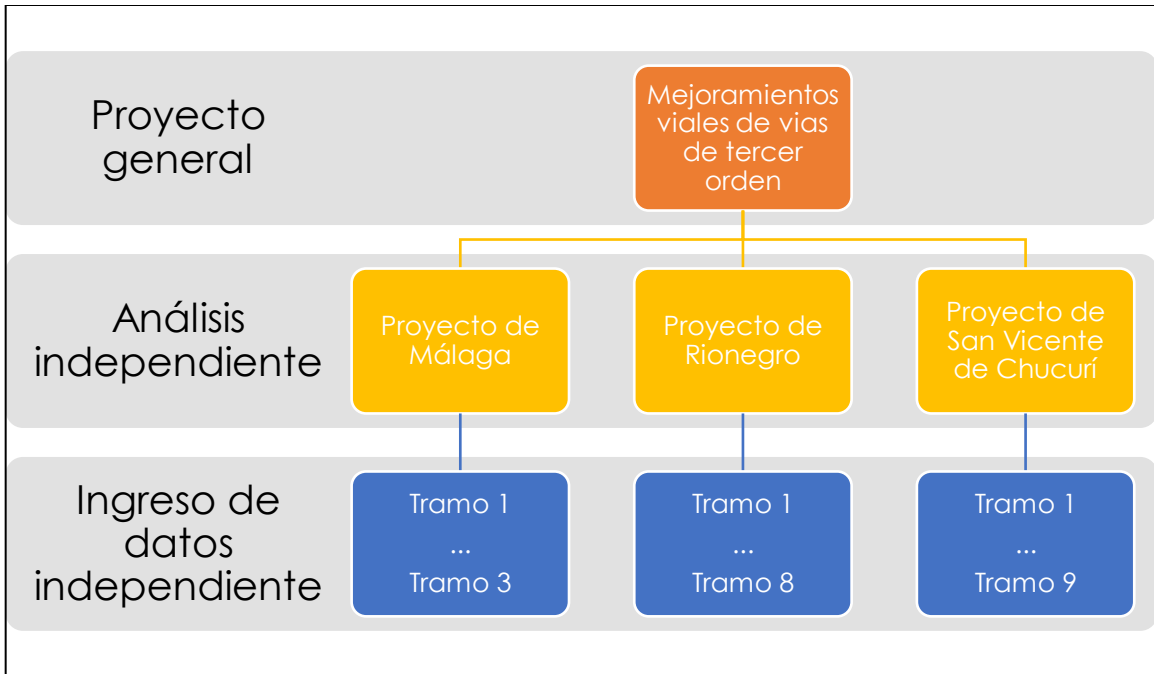


Ilustración 65. Estructura de manejo de la información en el programa de simulación
Fuente: Elaboración propia

En el software, la estructura de datos queda de la siguiente manera:

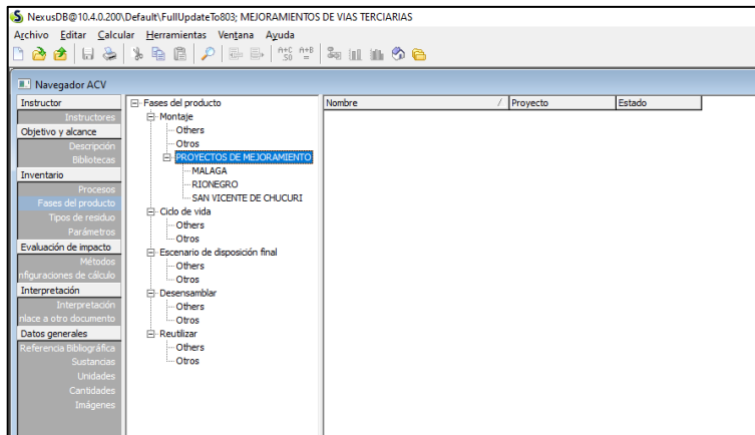


Ilustración 66. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos por proyecto
Fuente: Elaboración propia

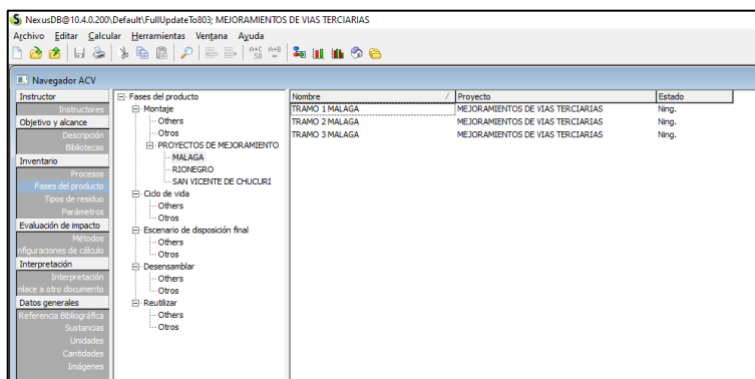


Ilustración 67. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos por tramo de cada proyecto

Fuente: Elaboración propia

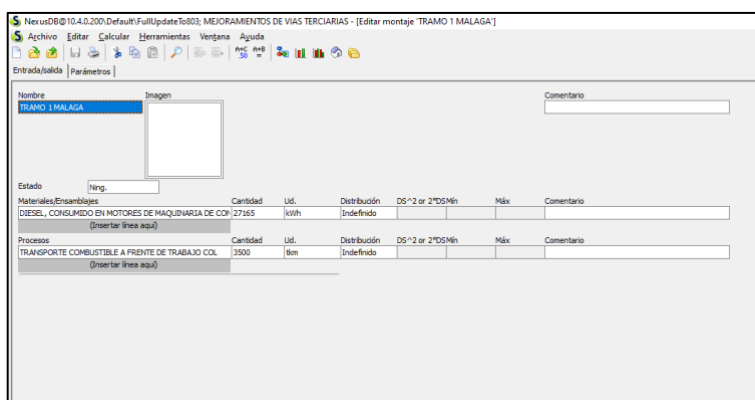


Ilustración 68. Captura de pantalla de la estructura del cargue de datos con las materias primas y procesos de cada uno.

Fuente: Elaboración propia

7.3.3 Determinación de los impactos

En la última fase de manejo del software, se deben crear los cálculos requeridos para obtener los resultados que se necesitan para el cumplimiento de los objetivos de la investigación. Por ende, el software SimaPro, da la posibilidad al usuario de generar los cálculos a su conveniencia, y en este caso, se generan los cálculos por tramo intervenido y por proyecto en conjunto don todos los tramos. Este es el módulo de creación de los cálculos, y aquí se observa que es para el tramo 1 del proyecto de Málaga, en el cual se elige el método de evaluación de impactos, el cual se escogió el método *ReCiPe endpoint*, debido a que este método incluye como

categoría de impacto al cambio climático, y se toma la medida en el *endpoint*, debido a que la medida entregada muestra los impactos en los daños a los ecosistemas, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos (National Institute for Public Health and the Environment, 2017).

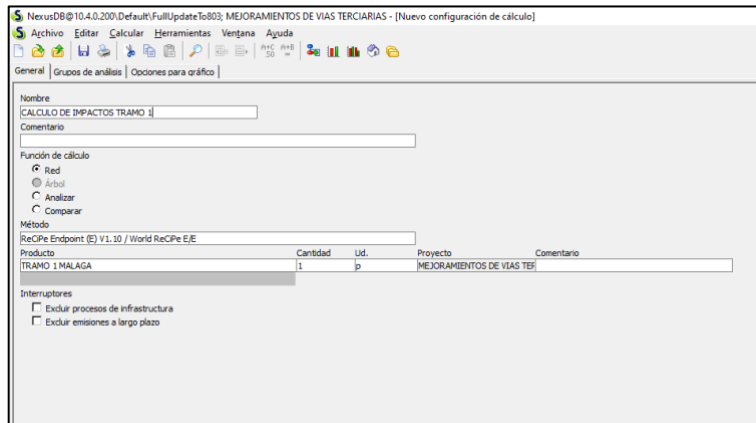


Ilustración 69. Captura de pantalla de la creación de un módulo de cálculo en el software SimaPro.
Fuente: Elaboración propia

Con la creación de los parámetros de cálculo, el software muestra una serie de gráficas que permiten una mejor visualización de la magnitud de los impactos en cada uno de los tramos y en el proyecto en sí, así como también muestra unas graficas tipo árbol, para mostrar la participación de cada uno de los materiales y procesos incluidos, para otros análisis que el investigador desee realizar.

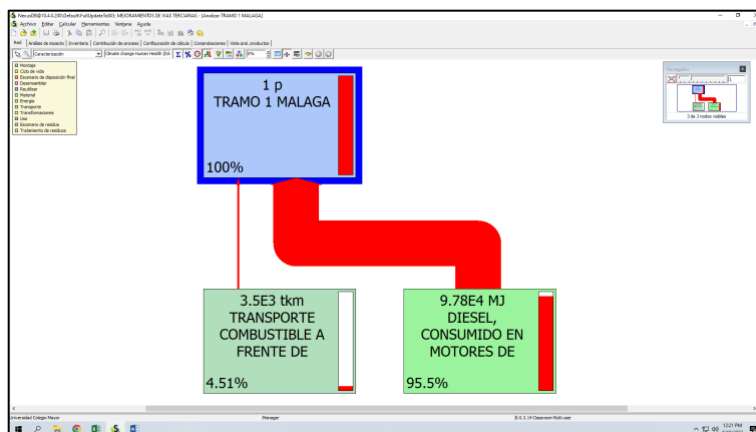


Ilustración 70. Captura de pantalla de un ejemplo de la gráfica de árbol
Fuente: Elaboración propia

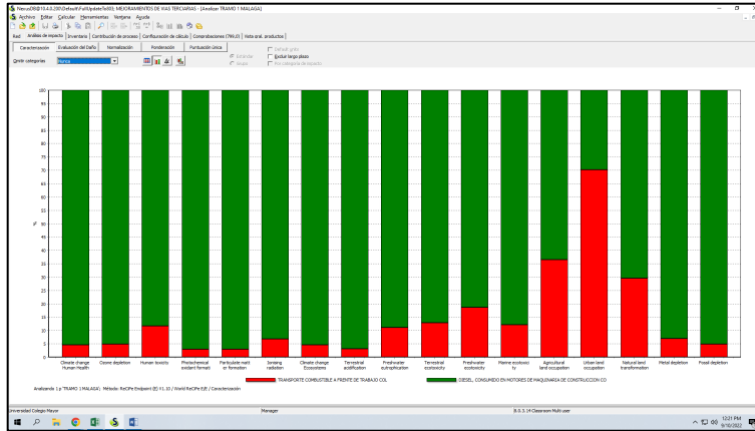


Ilustración 71. Captura de pantalla de un ejemplo de la gráfica de magnitud de impactos ambientales
Fuente: Elaboración propia

7.4 Inventario del ACV

El inventario de datos que se necesitan para el ACV, proviene de los datos tomados en campo, para lo cual se estableció un procedimiento de toma de datos, el cual contempla el diligenciamiento de una serie de formatos, con el que se quiere obtener información relevante para la determinación de impactos ambientales en la ejecución de los proyectos constructivos de mejoramientos de vías de tercer orden.

Para esto, se diseñó un formato que trae la información de las máquinas y equipos que se utilizan en la actividad constructiva, para cada uno de los proyectos en estudio, y que tiene por objeto, dar un diagnóstico de estado del equipo, además de conocer los datos de entrada al estudio, como marca, modelo, cilindraje o potencia, tipo de motor, etc. El formato empleado es el siguiente:

FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO		Código: F-10-01	
<small>FORMATO PARA LA INVESTIGACIÓN DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES VIA ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL CONSUMO DEL ACN/DISEL EN LOS PROYECTOS DE MEJORAMIENTO DE VÍAS TERRESTRES</small>			
REALIZADO POR:		FECHA DE ELABORAMIENTO:	
DATOS DEL EQUIPO A REVISAR			
TIPO DE EQUIPO:	PROYECTO:		
MARCA:	DEPARTAMENTO:		
MODELO:	MUNICIPIO:		
AÑO:	TRAMO:		
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO			
NUEVO USADO	ESTADO DEL EQUIPO BUENO MALO	FUGAS DE LÍQUIDOS VIBILES	EMISIONES ANORMALES
		SI NO	SI NO
CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO		FOTO DEL EQUIPO	
TIPO DE TRABAJO A REALIZAR POR EL EQUIPO			
HORARIO PROGRAMADO			
MANTENIMIENTOS			
ULTIMO			
PROGRAMADO			
CORRECTIVO			
CÓDIGO DEL EQUIPO			
ELABORÓ		REVISÓ	
FIRMA	FIRMA	FIRMA	FIRMA
NOMBRE	NOMBRE	NOMBRE	NOMBRE

Ilustración 72. Formato de ficha técnica del equipo
Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, con la información de los equipos, se tiene que tomar los datos referentes a las utilidades de los diferentes equipos, y para esto se diseñaron dos formatos de registro, el primero de horas de trabajo, para maquinaria estacionaria, como retroexcavadora, motoniveladora y vibrocompactadores, y otro formato para los equipos en movimiento, este exclusivamente para las volquetas, que traerán y llevarán materiales de cada uno de los tramos intervenidos. Los formatos son los siguientes:



Ilustración 75. Motoniveladora trabajando en el municipio de Málaga-Santander
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 76. Motoniveladora trabajando en el municipio de Rionegro-Santander
Fuente: Elaboración propia

7.5 Categorías de impacto que se analizarán en el ACV

El software realiza una serie de cálculos, para entregar las magnitudes de los impactos que están referenciados en la norma técnica UNE-EN 15804 2012, y su actualización del año 2020, en la cual incluye las siguientes categorías de impacto:

- Cambio climático en la salud humana

- Agotamiento de la capa de ozono
- Toxicidad humana
- Formación de oxidantes fotoquímicos
- Formación de material particulado
- Cambio climático en los ecosistemas
- Acidificación terrestre
- Eutroficación terrestre
- Eutroficación del agua dulce
- Ecotoxicidad en agua dulce
- Ecotoxicidad marina
- Ocupación de suelos agrícolas
- Ocupación de suelo urbano
- Transformación del suelo natural
- Agotamiento de materiales de tipo metálico
- Agotamiento de materiales de origen fósil

Sin embargo, se realiza una revisión especial a la categoría de impacto principal, que es la del potencial de cambio climático, o como se conoce en inglés, Global Warming Potential GWP100, en una escala de 100 años, debido a que la mayor afectación que tiene el diésel, es el asociado a las emisiones atmosféricas, y por eso el método de evaluación de impactos en el software SimaPro es de tipo *endpoint*, ya que se obtienen resultados al final del proceso donde se cuantifica el daño en ecosistemas, en la salud humana y en la disponibilidad de recursos, referidos a esta categoría.

7.6 Panorama de riesgos de los datos obtenidos para el ACV.

Dentro de la toma de datos cabe resaltar que se deben tener unas consideraciones, ya que estos pueden verse afectados o influenciados por eventos imprevistos como son: los cambios en el clima en los tramos estudiados, los errores humanos en la operación de la maquinaria y la metodología de la construcción utilizada en cada uno de ellos, factores estos que pueden generar que se aumenten las cantidades de obra, y por ende aumente la utilización de maquinaria, por tal razón, es importante considerar cierta incertidumbre ante estas eventualidades.

Para esto se realiza una evaluación de los riesgos que pueden afectar la toma de los datos (referidos previamente) y considerar la probabilidad de ocurrencia y el nivel de impacto, los cuales, en su sumatoria, permite la valoración del riesgo, como se observa en los siguientes cuadros:

PROBABILIDAD	CATEGORÍA		VALORACIÓN
	Raro (Puede ocurrir excepcionalmente).		1
	Improbable (Puede ocurrir ocasionalmente).		2
	Posible (Puede ocurrir en cualquier momento futuro).		3
	Probable (Probablemente va a ocurrir).		4
	Casi cierto (Ocurre en la mayoría de las circunstancias).		5

Tabla 15. Probabilidad del riesgo

Fuente: Elaboración Propia

IMPACTO					
Calificación Cualitativa.	No aumenta las horas de trabajo de la maquinaria	Aumenta de manera baja las horas de trabajo.	Aumenta de manera moderada las horas de trabajo.	Aumenta de manera notable las horas de trabajo de la maquinaria	Aumenta las horas de trabajo de tal manera que se hace inviable la toma de este dato
Calificación cuantitativa	1	2	3	4	5

Tabla 16. Impacto del riesgo

Fuente: Elaboración Propia

		IMPACTO				
		INSIGNIFICANTE	MENOR	MODERADO	MAYOR	CATASTRÓFICO
PROBABI	Valoración	1	2	3	4	5
	RARO	1	2	3	4	5
	IMPROBABLE	2	3	4	5	6
	POSIBLE	3	4	5	6	7
	PROBABLE	4	5	6	7	8
CASI CIERTO	5	6	7	8	9	
		6	7	8	9	10

Tabla 17. Valoración del riesgo

Fuente: Elaboración Propia

VALORACIÓN DEL RIESGO	CATEGORÍA
8, 9 y 10	Riesgo extremo
6 y 7	Riesgo alto
5	Riesgo medio
2, 3 y 4	Riesgo bajo

Tabla 18. Categorización del riesgo

Fuente: Elaboración Propia

Ahora bien, esta es la evaluación del riesgo según las condiciones mencionadas:

RIESGO	CONSECUENCIA	PROBABILIDAD	IMPACTO	VALORACIÓN DEL RIESGO	CATEGORÍA
Incidencia del clima. Aparición de lluvias inesperadas en la zona de ejecución de las actividades constructivas.	Saturación de los materiales tendidos y compactados por lo que se debe retirar el material y colocar uno nuevo, obviamente, se tendrá que efectuar de nuevo las actividades de tendido y compactado.	3	3	6	Riesgo Alto
Errores humanos en la operación de la maquinaria. Aquellos errores de los operadores que inciden en que los trabajos tengan cierto nivel de efectividad en las maquinas que maniobran.	Los errores humanos pueden aumentar o disminuir los tiempos de ejecución de las actividades constructivas	1	3	4	Riesgo bajo
Metodología de la construcción. Es el modo en como los profesionales planean la ejecución de las actividades constructivas	Los distintos modos de ejecución de los mejoramientos viales, y teniendo en cuenta los factores físicos presentes en cada tramo a intervenir, pueden incidir de manera positiva o negativa en el rendimiento de la maquinaria	1	4	5	Riesgo Medio

Tabla 19. Matriz de riesgos

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla 19, se cataloga un riesgo alto la incidencia del clima ya que, durante el periodo de la toma de los datos, se presentaron la finalización del primer periodo de lluvias del año y el inicio del segundo periodo de lluvias, condicionadas estas al efecto de incremento de las precipitaciones por ocurrencia del evento de variabilidad climática La Niña (OMM, 2014). La presencia de las lluvias en las diferentes zonas de trabajo, afectan la secuencia de los procesos en campo, ya que se retrasan, detienen y/o duplican jornadas de trabajo

por alta saturación del terreno. Adicionalmente, en el Plan Nacional de Respuesta a la Segunda Temporada de Lluvias, documento realizado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, en el año 2022, se informa que para los meses de septiembre y octubre las precipitaciones estarán por encima del promedio entre un 20% al 50% (Francisco et al., 2022).

Los errores humanos tienen un riesgo bajo, debido a que la tendencia de operación de las maquinarias por recurso humano con escaso conocimiento de la misma maquinaria, la habilidad de la operación específica en diferentes condiciones de terreno y a la afinidad que tienen los propietarios de la maquinaria de mantener a sus operadores, reducen el riesgo de reprocesos por la inexperiencia con la maquinaria.

Y por último, la metodología de la construcción (placa huella) es un riesgo medio, ya que al estar estandarizada, la probabilidad de afectación, dependerá del proceso de planificación con fallos, debido a desconocimiento de profesionales y que se genere un incremento en las horas de trabajo de la maquinaria, riesgo que puede reducirse con la transferencia de conocimiento de la experiencia de profesionales con trayectoria a profesionales con escasa o nula praxis en la metodología de placa huella.

7.7 Análisis de los datos obtenidos en campo

7.7.1 Cálculo de horas de trabajo de la maquinaria

En la última fase Como se ha venido mencionando, desde los tres proyectos en cuestión (Málaga, Rionegro y San Vicente de Chucurí), iniciaron en el presente año (2022) la ejecución de las actividades constructivas para los mejoramientos viales en carreteras de tercer orden, bajo el método de placa huella, en el Departamento de Santander. Estos proyectos manejaron igual número de maquinaria para atender sus necesidades, como fueron:

- Una motoniveladora,
- Un vibrocompactador,
- Una retroexcavadora, y
- Un minicargador.

A continuación, se muestra el número de horas de trabajo por cada máquina, que tuvieron en la ejecución de cada uno de los proyectos estudiados:

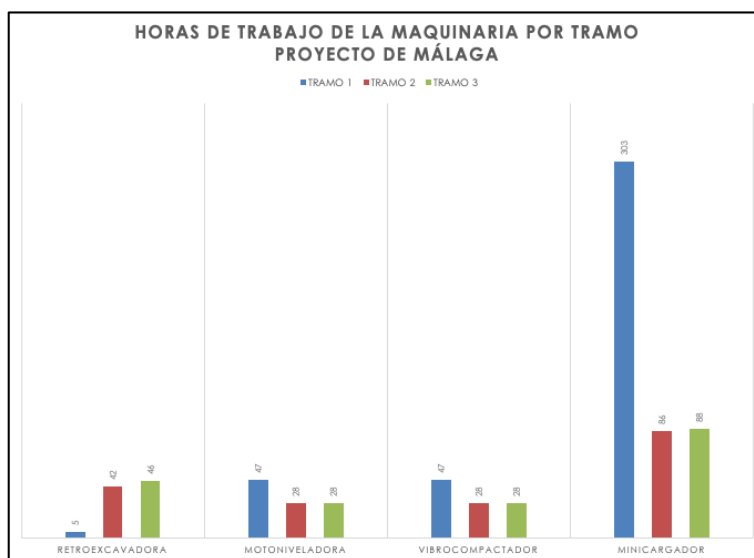


Ilustración 77. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de Málaga-Santander
Fuente: Elaboración propia

En el proyecto de Málaga, se genera un dato más alto de lo normal en el consumo del minicargador para el tramo 1, y esto se aduce a que, en este tramo, el minicargador se utilizó más tiempo para realizar trabajos de trasiego de materiales para la fundición de concretos, y en este tramo, la retroexcavadora fue sustituida en algunas actividades por el minicargador, esto explica el número tan bajo de horas de esta máquina en el tramo 1

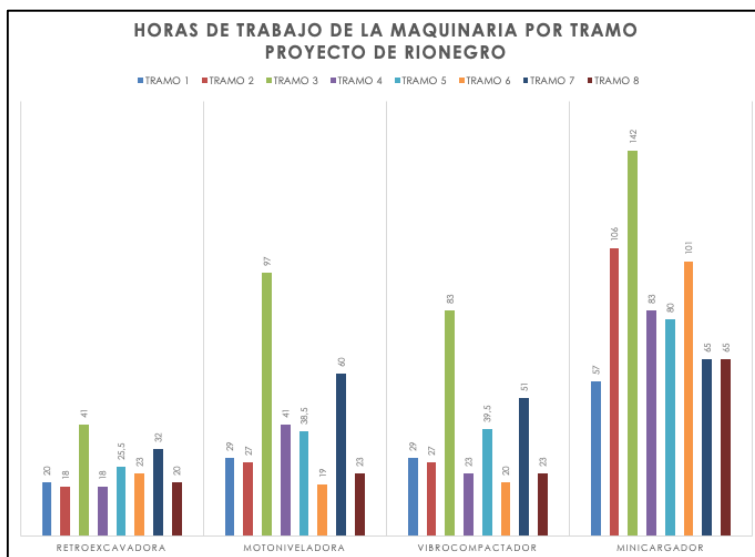


Ilustración 78. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de Rionegro-Santander
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en el proyecto de Rionegro, el tramo 3 tuvo una alta afectación de la ola invernal, y se tuvieron que hacer más reprocesos, o sea, se tuvo que retirar material instalado y compactado, y reconformar la calzada para el alistamiento de la pavimentación. Los tramos 2 y 6 sufrieron de más horas de minicargador, porque esta herramienta apoyó más las actividades de fundidas de concreto, ya que el ancho de calzada y la topografía de los mismos lo permitía.

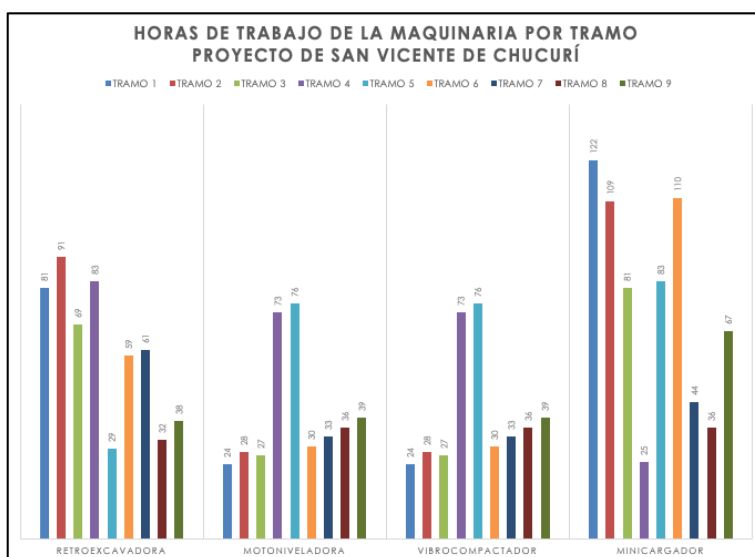


Ilustración 79. Horas de trabajo de la maquinaria en el proyecto de San Vicente de Chucurí-Santander
Fuente: Elaboración propia

En el proyecto de San Vicente de Chucurí, los tramos 4 y 5 sufrieron los embates de la ola invernal y también tuvieron que hacer reprocesos en el tendido de la subbase y su compactación, y por tal razón aumentaron las horas de trabajo en la motoniveladora y el vibrocompactador. En cuanto a la retroexcavadora y el minicargador, los picos altos de horas de trabajo, se refieren a actividades de estabilizaciones de talud, que se realizaron en los frentes de trabajo de los tramos 1, 2 y 3, y en el 5 y 6, el minicargador tuvo que apoyar la labor de trasiego de materiales para la fundición de concretos. Cabe resaltar que en la mayoría de los tramos el minicargador tenía como función principal la organización de los frentes de trabajo y el cargue de residuos de excavación en las volquetas, y también es preciso decir que, en los procesos de fundición de concreto, el trasiego del concreto casi siempre se realizaba en carretillas haladas por el personal de obra.

7.7.2 Cálculo de las distancias recorridas por las volquetas

Adicionalmente, los proyectos tuvieron diferente número de volquetas, pero todas estas fueron del mismo tipo de volumen de carga, motorización y configuración del número de ejes, que para el caso fueron volquetas de 14 m³ de volumen de carga, motor diésel y tipo doble troque. En el siguiente gráfico se presenta un panorama de las distancias que tenían que recorrer las volquetas.

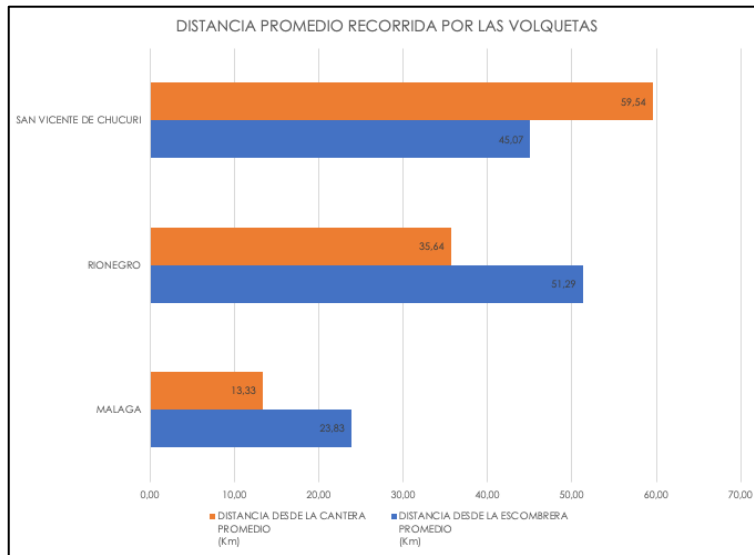


Ilustración 80. Comparación de las distancias recorridas por las volquetas en cada proyecto
Fuente: Elaboración propia

Las volquetas en el proyecto de San Vicente de Chucurí, tuvieron que realizar un mayor desplazamiento a la cantera, la cual, en promedio de los nueve tramos, tenían que recorrer casi 60 kilómetros de distancia, mientras que, en Rionegro, fue el municipio con un mayor desplazamiento hacia la escombrera, ya que las volquetas tenían que recorrer un poco más de 51 kilómetros por viaje a este sitio. Estos datos son relevantes, pero a la final dependen de la cantidad de veces que realicen estos viajes, y esto va ligado finalmente a las necesidades de cada uno de los proyectos constructivos, en cuanto a la subbase y los escombros generados. El panorama de la cantidad de viajes realizados por proyecto es el siguiente:

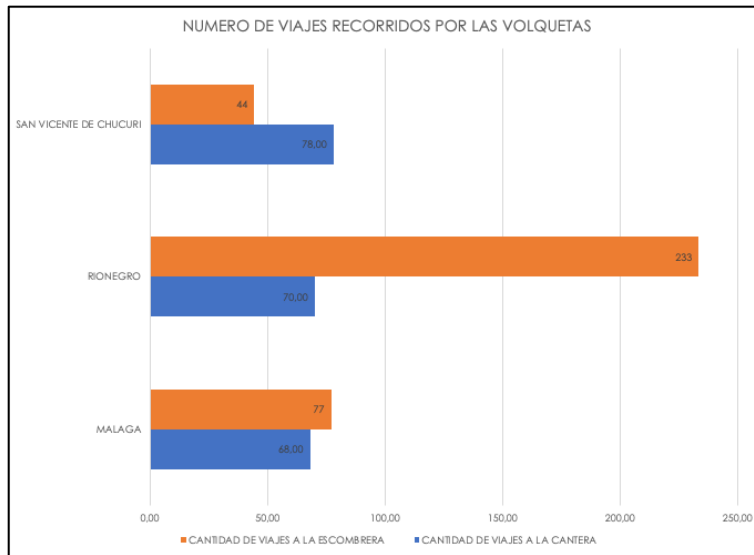


Ilustración 81. Comparación de la cantidad de viajes realizados por las volquetas en cada proyecto
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior, se observa de forma notoria que el proyecto de Rionegro tuvo una necesidad muy alta de materiales, debido a lo que se comentó en el numeral anterior, que este proyecto fue el que tuvo una mayor afectación de la ola invernal, y realizó varios reprocesos en cuanto al tendido y compactado de la subbase granular. Cabe notar que, en el proyecto de San Vicente de Chucurí, tuvieron que realizar más viajes a la escombrera, debido al aumento de las perfilaciones y conformaciones de talud que realizaron en los frentes de trabajo.

7.7.3 Cálculo de la cantidad de energía utilizada por la maquinaria

El cálculo de la cantidad de energía utilizada por las volquetas y maquinaria, es un dato que necesita el software SimaPro, para realizar las debidas simulaciones, y entregar los resultados de las magnitudes de las diferentes categorías de impacto. Para esto se inicia con el dato de los volúmenes de combustible necesarios por cada hora de trabajo en la maquinaria, y por cada kilómetro recorrido por las volquetas. Para esto, y con apoyo de la identificación inicial de la maquinaria, se recurrió a la bibliografía existente, como catálogos y fichas técnicas de los equipos y vehículos, que indicaron las tasas de consumo de combustible antes mencionadas.

En esta búsqueda solo se encontraron datos para algunas máquinas, por lo que se recurrió a sus propietarios quienes son los idóneos en su conocimiento de su herramienta, y ellos indicaron el consumo real de cada una de sus máquinas. El índice de consumo por cada una de ellas es el siguiente:

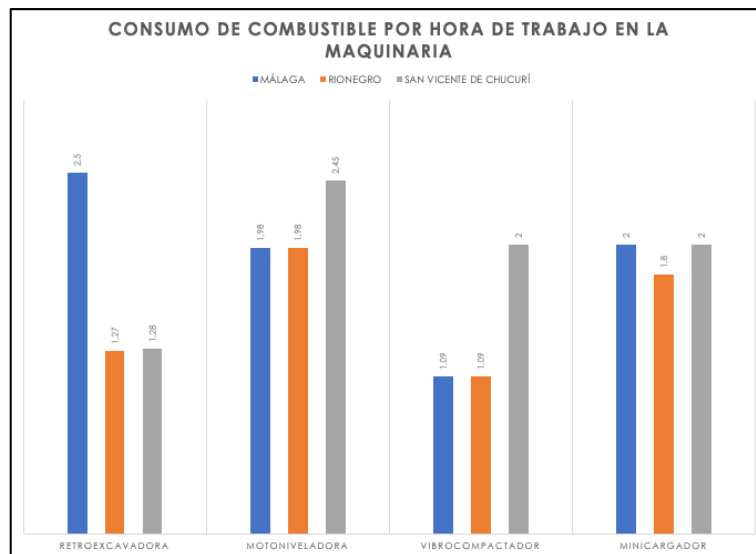


Ilustración 82. Comparación del consumo de combustible por hora de trabajo de la maquinaria en cada proyecto

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior, se observa claramente cómo es el consumo de combustible por hora en cada una de las máquinas, y observamos que la retroexcavadora del proyecto de Málaga es la que más consume al igual que la retroexcavadora del proyecto de San Vicente de Chucurí, y si se compara con el siguiente gráfico, el año de fabricación de esta motoniveladora es la más antigua de todas las maquinarias que se están evaluando, y se deduce que la motorización antigua consume más combustible que las modernas.

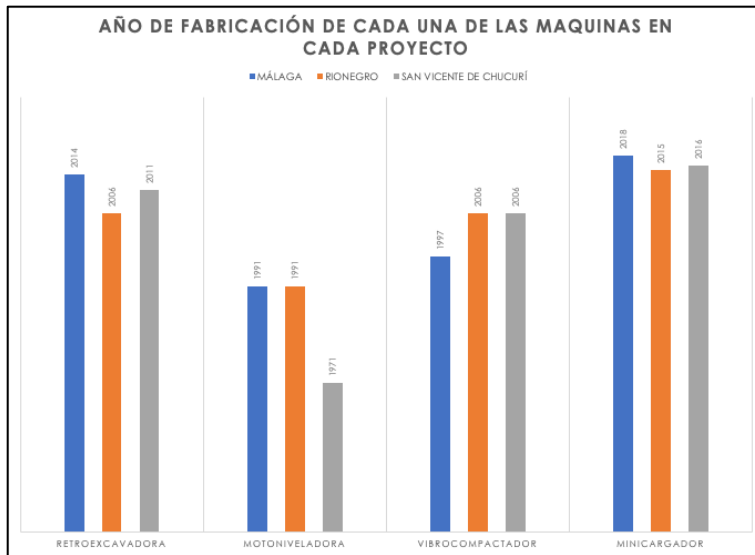


Ilustración 83. Año de fabricación de la maquinaria en cada proyecto
Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, con respecto a estos datos y con los mostrados en el apartado 7.2.1, se puede calcular el consumo total de combustible de cada una de las maquinarias durante la ejecución de cada proyecto, el cual se presenta a continuación y se analizará de manera separada

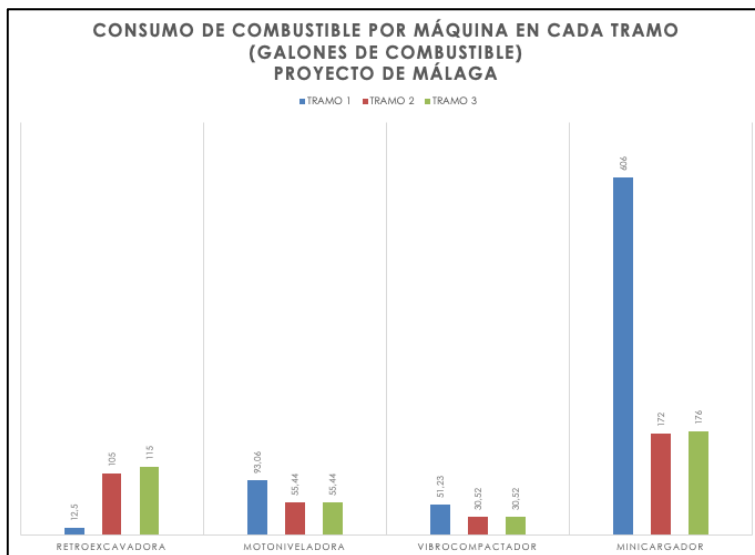


Ilustración 84. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de Málaga.
Fuente: Elaboración propia

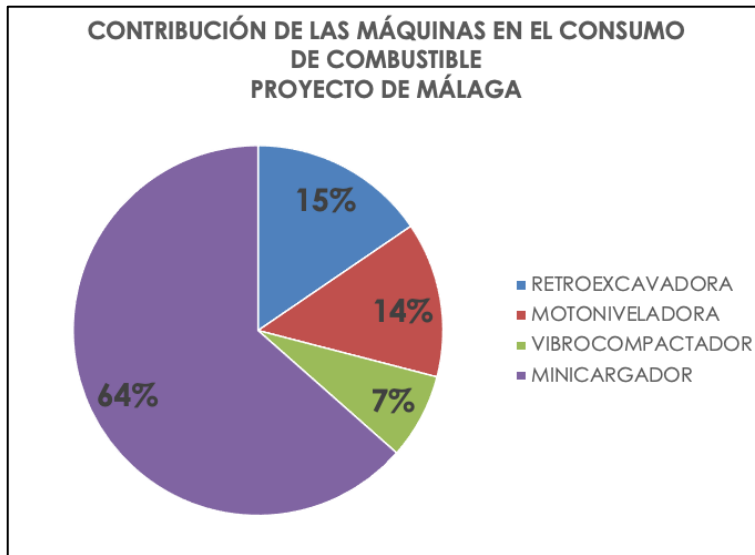


Ilustración 85. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de Málaga.
Fuente: Elaboración propia

En el proyecto de Málaga, el gran impacto en el consumo de combustible está en el minicargador que se utilizó en el tramo 1 y que a la final suma en el total del consumo de esta máquina, la cual fue la más utilizada en este proyecto con un 64% de participación en el consumo de combustible.

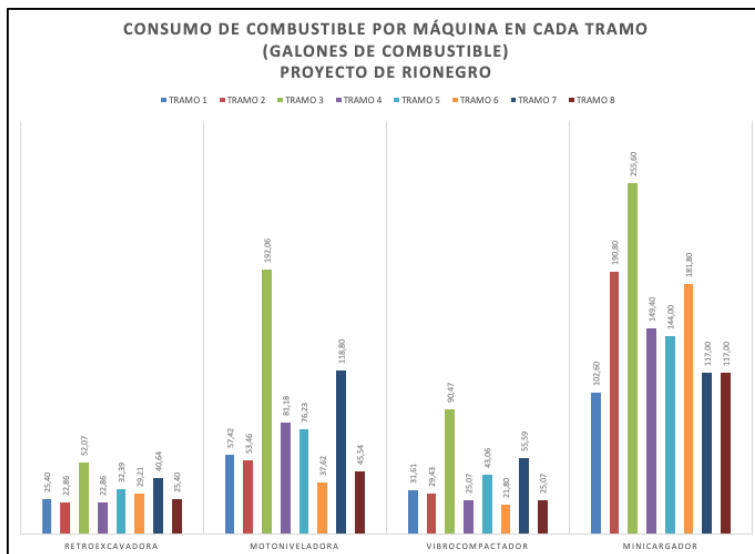


Ilustración 86. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de Rionegro.
Fuente: Elaboración propia

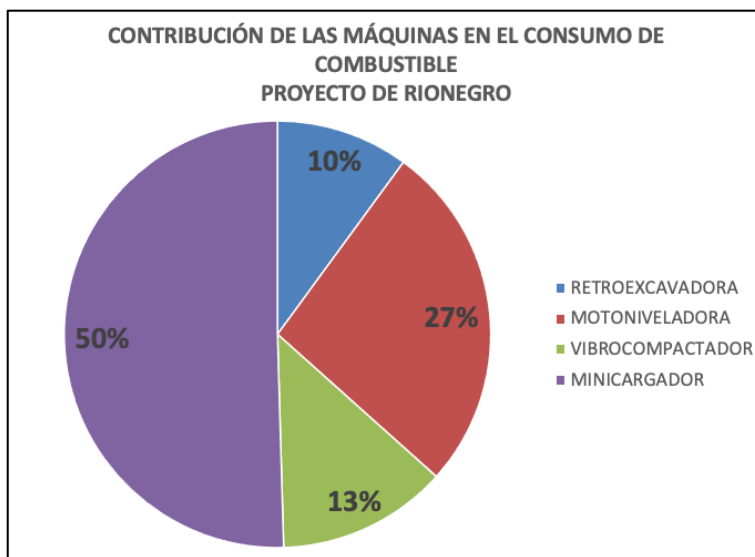


Ilustración 87. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de Rionegro.
Fuente: Elaboración propia

En el caso del proyecto de Rionegro, se presenta comportamiento similar al analizado anteriormente, debido a que los reprocesos presentados en el tramo 3 principalmente, elevaron notoriamente el consumo del combustible en la motoniveladora y en el vibrocompactador, mientras que el minicargador sigue siendo, al igual que en el proyecto de Málaga, la herramienta con mayor consumo, representando la mitad de todo el consumo del proyecto.

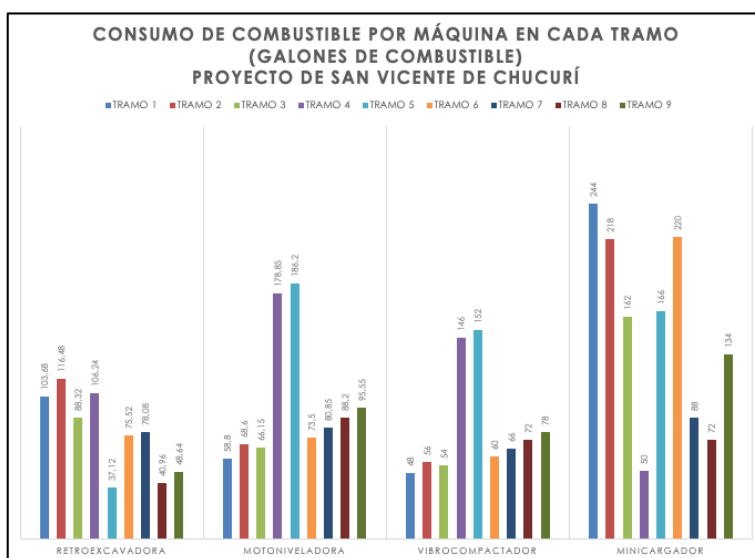


Ilustración 88. Consumo de combustible en cada maquina en el proyecto de San Vicente de Chucurí.
Fuente: Elaboración propia

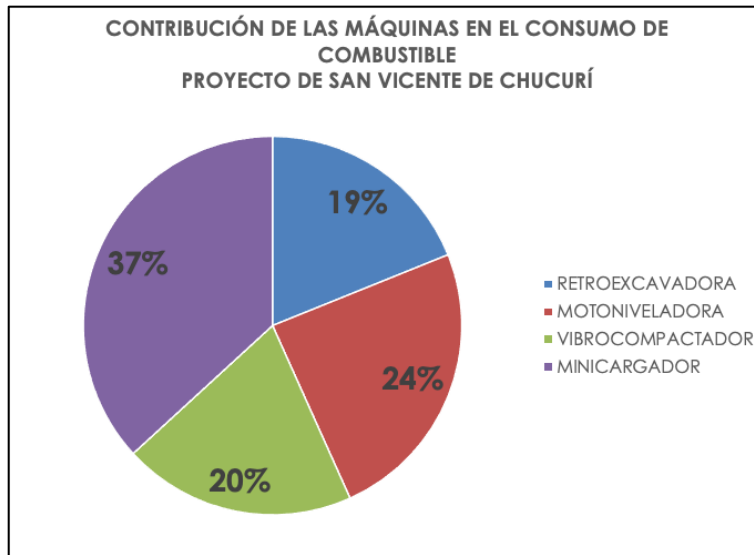


Ilustración 89. Contribución de las máquinas en el consumo de combustible en el proyecto de San Vicente de Chucurí

Fuente: Elaboración propia

El proyecto de San Vicente de Chucurí, tiene un comportamiento similar a los reprocesos marcados en el proyecto de Rionegro, pero en este, en los tramos 4 y 5, es donde se refleja el aumento del consumo de la motoniveladora y del vibrocompactador, pero al contrario de los otros dos proyectos, el minicargador minimiza su potencial de consumo y es un poco más equilibrado con las otras máquinas evaluadas.

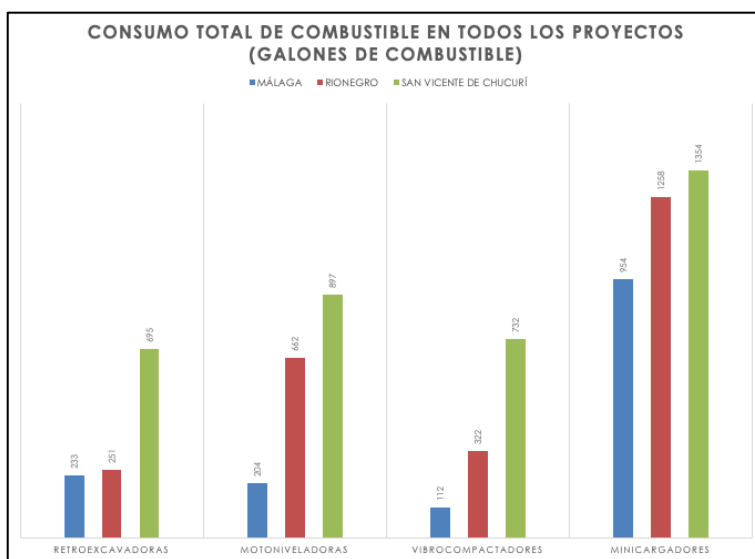


Ilustración 90. Comparación del consumo de combustible de las máquinas en cada proyecto.
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico anterior, el proyecto que más consumió combustible fue el de San Vicente de Chucurí, superando a los otros dos en cada una de las máquinas evaluadas, y aquí es donde se resume las eventualidades que no permitieron una normal ejecución de sus actividades programadas, entre ellas están, la cantidad de reprocesos por las lluvias y las actividades de estabilización de taludes. Ahora bien, con respecto a las variables técnicas de cada proyecto y el consumo de combustible de las máquinas, se puede observar una comparación a continuación:

PROYECTO	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GALONES)	PENDIENTE PROMEDIO (%)	ESPESOR DE LA EXCAVACIÓN (cm)	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (MSNM)
MÁLAGA	1503	13,48	35	3050
RIONEGRO	2494	14,82	30	2215
SAN VICENTE DE CHUCURÍ	3678	10,62	40,50	693

Tabla 20. Comparación de variables técnicas con el consumo de combustible en cada proyecto.
Fuente: Elaboración Propia

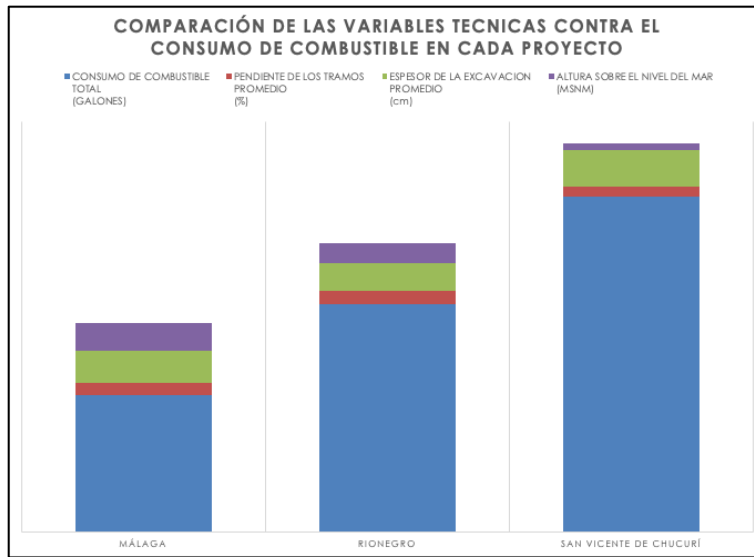


Ilustración 91. Comparación gráfica del consumo de combustible de las máquinas en cada proyecto.
Fuente: Elaboración propia

En la tabla y en el gráfico anterior, se puede observar que el único factor técnico que podría causar una elevación en el consumo es el espesor de la excavación, que, para el caso del proyecto de San Vicente de Chucurí, que fue el proyecto que más consumió combustible, fue el que mayor espesor de excavación realizó, y este espesor, se debió a los hallazgos realizados por los profesionales de diseño de la estructura de pavimento.

Ahora bien, con el dato de campo de los volúmenes de consumo de diésel, se tienen que arreglar estos datos, para que puedan ser ingresados en el aplicativo, el cual exige que se cargue en unidades de energía. Por lo tanto, se deben convertir los galones de diésel consumidos por la maquinaria, en mega julios producidos por este diésel, que es una unidad de energía. Para esto, se inicia con la conversión de galones en una unidad del sistema métrico (Oberg et al., 2004), el cual será de centímetro cúbico (cm^3), de la siguiente manera:

$$1 \text{ galon de diésel} = 3785,41 \text{ cm}^3 \text{ de diésel} \quad (6)$$

Utilizando la ecuación 6, el volumen de diésel consumido por cada tramo de cada proyecto quedaría de la siguiente forma en centímetros cúbicos:

PROYECTO	TRAMO	DIÉSEL (Galones)	DIÉSEL (cm ³)
MÁLAGA	TRAMO 1	762,79	2.887.472,89
	TRAMO 2	362,96	1.373.952,41
	TRAMO 3	376,96	1.426.948,15
TOTAL MÁLAGA		1.502,71	5.688.373,46
RIONEGRO	TRAMO 1	217,03	821.547,53
	TRAMO 2	296,55	1.122.563,34
	TRAMO 3	590,20	2.234.148,98
	TRAMO 4	278,51	1.054.274,54
	TRAMO 5	295,67	1.119.232,17
	TRAMO 6	270,43	1.023.688,43
	TRAMO 7	332,03	1.256.869,68
	TRAMO 8	213,01	806.330,18
TOTAL RIONEGRO		2.493,43	9.438.654,86
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	454,48	1.720.393,14
	TRAMO 2	459,08	1.737.806,02
	TRAMO 3	370,47	1.402.380,84
	TRAMO 4	481,09	1.821.122,90
	TRAMO 5	541,32	2.049.118,14
	TRAMO 6	429,02	1.624.016,60
	TRAMO 7	312,93	1.184.568,35
	TRAMO 8	273,16	1.034.022,60
	TRAMO 9	356,19	1.348.325,19
TOTAL SAN VICENTE		3.677,74	13.921.753,77

Tabla 21. Volumen de diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en centímetros cúbicos.

Fuente: Elaboración Propia

Con el volumen del diésel consumido en centímetros cúbicos, se debe utilizar el valor de la densidad del diésel, el cual es de 0,85 gramos por centímetro cúbico (g/cm³), para obtener con él, el valor en masa de la cantidad de diésel consumido en cada uno de los tramos (Oberg et al., 2004), por tal razón se realiza el siguiente cálculo:

$$Masa\ de\ diésel\ consumido = Volumen\ de\ diésel \times Densidad\ del\ diésel^{(7)}$$

(8)

$$\text{Masa de diésel consumido} = \text{Volumen de diésel} \times 0,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Utilizando la ecuación 8, y luego multiplicando por mil, se obtiene el valor de la masa del diésel utilizado en cada uno de los tramos intervenidos.

PROYECTO	TRAMO	DIESEL (cm ³)	DIESEL (g)	DIESEL (Kg)
MÁLAGA	TRAMO 1	2.887.472,89	245.435,20	245.435.195,98
	TRAMO 2	1.373.952,41	116.785,96	116.785.955,16
	TRAMO 3	1.426.948,15	121.290,59	121.290.593,06
TOTAL MÁLAGA		5.688.373,46	483.511,74	483.511.744,19
RIONEGRO	TRAMO 1	821.547,53	69.831,54	69.831.540,25
	TRAMO 2	1.122.563,34	95.417,88	95.417.883,52
	TRAMO 3	2.234.148,98	189.902,66	189.902.663,47
	TRAMO 4	1.054.274,54	89.613,34	89.613.335,82
	TRAMO 5	1.119.232,17	95.134,73	95.134.734,85
	TRAMO 6	1.023.688,43	87.013,52	87.013.516,24
	TRAMO 7	1.256.869,68	106.833,92	106.833.923,00
	TRAMO 8	806.330,18	68.538,07	68.538.065,65
TOTAL RIONEGRO		9.438.654,86	802.285,66	802.285.662,79
SAN VICENTE DE CHUCURÍ	TRAMO 1	1.720.393,14	146.233,42	146.233.416,63
	TRAMO 2	1.737.806,02	147.713,51	147.713.511,94
	TRAMO 3	1.402.380,84	119.202,37	119.202.371,63
	TRAMO 4	1.821.122,90	154.795,45	154.795.446,24
	TRAMO 5	2.049.118,14	174.175,04	174.175.042,00
	TRAMO 6	1.624.016,60	138.041,41	138.041.410,85
	TRAMO 7	1.184.568,35	100.688,31	100.688.309,86
	TRAMO 8	1.034.022,60	87.891,92	87.891.920,63
	TRAMO 9	1.348.325,19	114.607,64	114.607.640,97
TOTAL SAN VICENTE		13.921.753,77	1.183.349,07	1.183.349.070,74

Tabla 22. Diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en términos de masa.

Fuente: Elaboración Propia

Ahora bien, conocida la masa del diésel consumido, se tiene que el poder calorífico del diésel según la Comisión Europea, es de 43,1 mega Julio por kilogramo (MJ/Kg), entonces se debe realizar el siguiente cálculo:

(9)

$$\text{Energía de diésel consumido} = \text{Masa de diésel} \times \text{Poder Calorífico del diésel}$$

(10)

$$\text{Energía de diésel consumido} = \text{Masa de diésel} \times 43,1 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}}$$

Utilizando la ecuación 10, los datos obtenidos del diésel en términos de energía son los siguientes:

PROYECTO	TRAMO	DIESEL (Kg)	DIESEL (MJ)
MÁLAGA	TRAMO 1	245.435.195,98	10.578.256.946,80
	TRAMO 2	116.785.955,16	5.033.474.667,22
	TRAMO 3	121.290.593,06	5.227.624.560,71
TOTAL MÁLAGA		483.511.744,19	20.839.356.174,74
RIONEGRO	TRAMO 1	69.831.540,25	3.009.739.384,58
	TRAMO 2	95.417.883,52	4.112.510.779,60
	TRAMO 3	189.902.663,47	8.184.804.795,56
	TRAMO 4	89.613.335,82	3.862.334.773,99
	TRAMO 5	95.134.734,85	4.100.307.072,01
	TRAMO 6	87.013.516,24	3.750.282.549,75
	TRAMO 7	106.833.923,00	4.604.542.081,11
	TRAMO 8	68.538.065,65	2.953.990.629,45
TOTAL RIONEGRO		802.285.662,79	34.578.512.066,06
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	146.233.416,63	6.302.660.256,67
	TRAMO 2	147.713.511,94	6.366.452.364,53
	TRAMO 3	119.202.371,63	5.137.622.217,23
	TRAMO 4	154.795.446,24	6.671.683.732,79
	TRAMO 5	174.175.042,00	7.506.944.310,29
	TRAMO 6	138.041.410,85	5.949.584.807,51
	TRAMO 7	100.688.309,86	4.339.666.154,99
	TRAMO 8	87.891.920,63	3.788.141.778,98
	TRAMO 9	114.607.640,97	4.939.589.325,87
TOTAL SAN VICENTE		1.183.349.070,74	51.002.344.948,85

Tabla 23. Diésel consumido en cada tramo de cada proyecto en términos de energía.

Fuente: Elaboración Propia

7.7.4 Cálculo de la cantidad de energía utilizada por las volquetas

Para obtener los datos de la cantidad de energía que necesitan las volquetas, se debe iniciar con recordar lo datos mostrados en el apartado 7.7.2, en el que se mostraban las distancias y el número de viajes que realizaron las volquetas por cada uno de los proyectos, que en resumen se ven así:

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	DISTANCIA DESDE LA ESCOMBRERA (Km)	DISTANCIA DESDE LA CANTERA (Km)	CANTIDAD DE VIAJES A LA CANTERA	CANTIDAD DE VIAJES A LA ESCOMBRERA
MÁLAGA	TRAMO 1	23,5	13	14	16
	TRAMO 2	24	13,5	26	30
	TRAMO 3	24	13,5	28	31
TOTAL MÁLAGA				68	77
RIONEGRO	TRAMO 1	76	36,3	5	16
	TRAMO 2	76	36,3	12	39
	TRAMO 3	46,6	42,8	5	17
	TRAMO 4	41,2	31,9	15	50
	TRAMO 5	41,2	31,9	6	18
	TRAMO 6	43,1	35,3	10	34
	TRAMO 7	43,1	35,3	9	30
	TRAMO 8	43,1	35,3	9	30
TOTAL RIONEGRO				70	233
SAN VICENTE DE CHUCURÍ	TRAMO 1	52,5	57,7	10	5
	TRAMO 2	52,5	57,7	5	3
	TRAMO 3	57,8	57,6	11	6
	TRAMO 4	53,9	61,3	10	5
	TRAMO 5	53,9	61,3	5	3
	TRAMO 6	52,2	57,4	10	5
	TRAMO 7	33,8	63,3	8	5
	TRAMO 8	33,8	61,9	10	5
	TRAMO 9	15,2	57,7	11	6
TOTAL SAN VICENTE DE CHUCURÍ				78	44

Tabla 24. Total de recorridos efectuados por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.
Fuente: Elaboración Propia

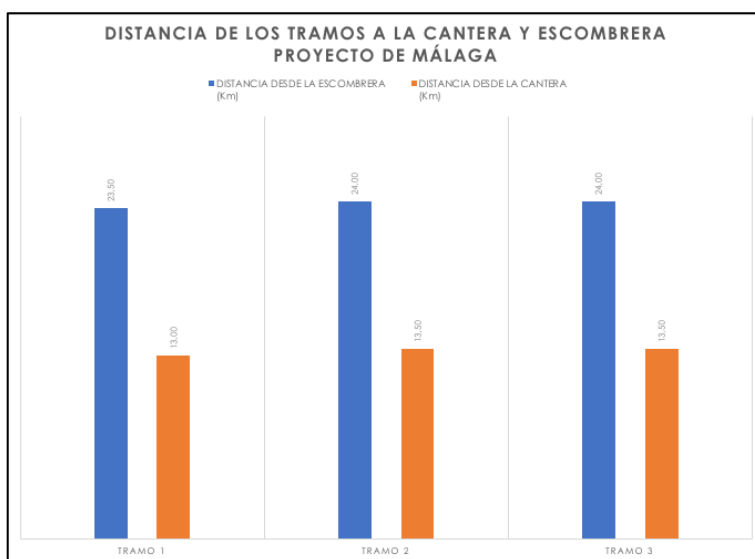


Ilustración 92. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de Málaga.
Fuente: Elaboración propia

En el proyecto de Málaga, se observa que las distancias son muy constantes para cada uno de los tramos, en cuanto a sus recorridos a la escombrera y a la cantera, tal como se ve en la gráfica anterior.

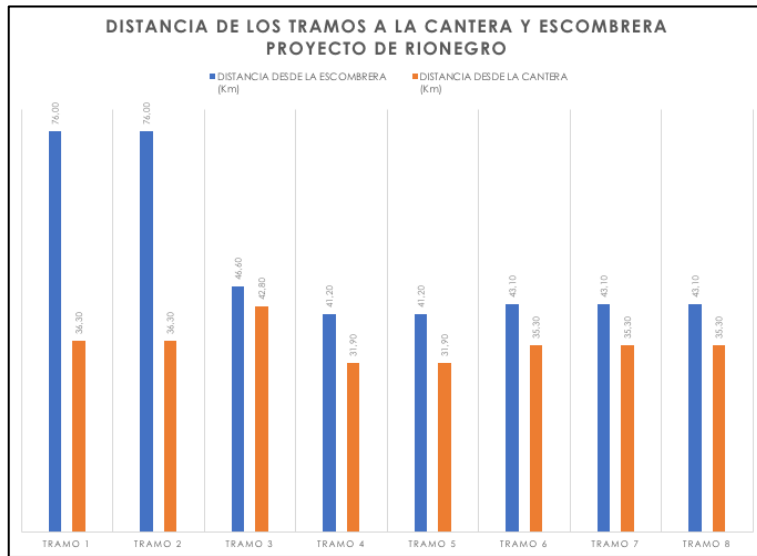


Ilustración 93. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

En la imagen anterior, se observan los recorridos que efectúan las volquetas en los tramos intervenidos en el municipio de Rionegro, la escombrera es mucho más lejana para los tramos 1 y 2, mientras que la cantera es algo equidistante en todos los tramos con una variación en el tramo 3 que es casi 6 kilómetros más distante que el resto de tramos.

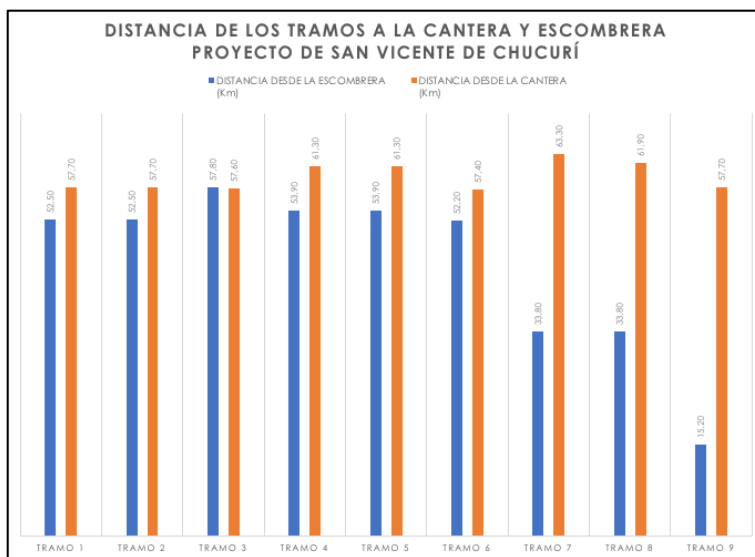


Ilustración 94. Distancias recorridas por las volquetas en el proyecto de San Vicente de Chucurí.
Fuente: Elaboración propia

Y por último en el proyecto de San Vicente de Chucurí, los tramos 7, 8 y 9 son los más lejanos a la cantera, mientras que los tramos 1 al 5 son los más lejanos a la escombrera. Cabe resaltar que los tramos de este proyecto son los más lejanos a sus destinos, comparados con los de los otros proyectos, incluso es más del doble de la distancia de los tramos de Málaga.

Con estos datos, hay que determinar la cantidad de kilómetros recorridos en cada uno de los tramos y por ende en cada proyecto, esta es una multiplicación entre los datos existentes que son la cantidad de viajes realizados con la distancia de cada frente al destino programado. La ecuación sería:

$$(11) \quad \text{Total de kilómetros recorridos} = \text{Distancia del destino} \times \text{Número de viajes}$$

Utilizando la ecuación 11, los resultados son los siguientes:

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	DISTANCIA TOTAL RECORRIDA A LA CANTERA (Km)	DISTANCIA TOTAL RECORRIDA A LA ESCOMBRERA (Km)
MÁLAGA	TRAMO 1	180,24	368,50

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	DISTANCIA TOTAL RECORRIDA A LA CANTERA (Km)	DISTANCIA TOTAL RECORRIDA A LA ESCOMBRERA (Km)
	TRAMO 2	356,49	716,77
	TRAMO 3	374,33	752,64
TOTAL MÁLAGA		911,07	1.837,90
RIONEGRO	TRAMO 1	176,00	1.228,50
	TRAMO 2	429,00	2.994,47
	TRAMO 3	220,48	800,34
	TRAMO 4	473,67	2.039,56
	TRAMO 5	176,42	759,63
	TRAMO 6	355,67	1.447,81
	TRAMO 7	312,89	1.273,64
	TRAMO 8	312,89	1.273,64
TOTAL RIONEGRO		2.457,02	11.817,59
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	551,09	284,65
	TRAMO 2	275,55	142,33
	TRAMO 3	641,83	365,62
	TRAMO 4	585,48	292,24
	TRAMO 5	292,74	146,12
	TRAMO 6	548,23	283,02
	TRAMO 7	503,82	152,72
	TRAMO 8	591,21	183,26
	TRAMO 9	642,94	96,15
TOTAL SAN VICENTE DE CHUCURÍ		4.632,88	1.946,11

Tabla 25. Distancia total recorrida por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.

Fuente: Elaboración Propia

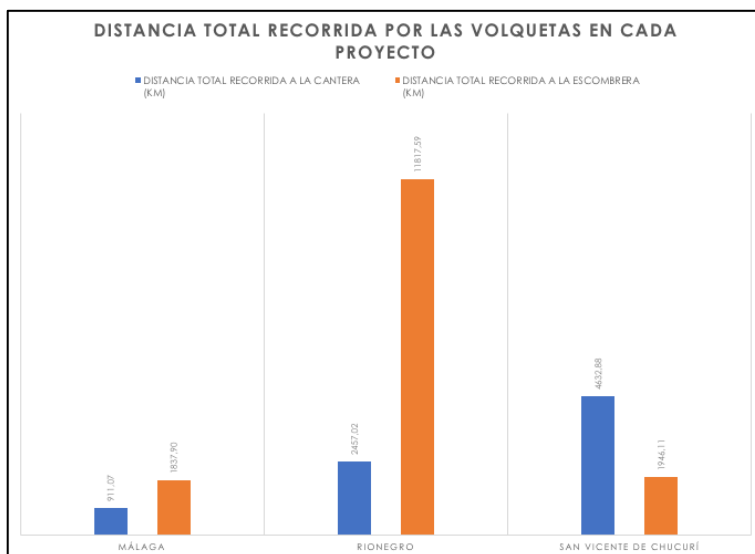


Ilustración 95. Distancias totales recorridas por las volquetas en todos los proyectos.

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior, se puede observar que las volquetas recorrieron más kilómetros en los trayectos a la cantera del proyecto de Rionegro, toda vez que se utilizaron más materiales por

causas que se explicaron en el apartado anterior. Cabe mostrar que, aunque la distancia fue más alta en el proyecto de San Vicente de Chucurí, la cantidad de viajes no convirtió este factor multiplicativo en un alto número de kilómetros recorridos por los vehículos de carga.

Ahora bien, los propietarios de las volquetas refieren todos ellos que el consumo de combustible tiene una constante, y es que el consumo de este vehículo esta siempre entre los 5 a 7 galones de diésel por kilómetro recorrido, dependiendo del esfuerzo que realice, es decir si el vehículo cargado va subiendo, su consumo será mayor, es decir de 7 gal/Km, en cambio si el terreno va en descenso, el consumo del motor es el mínimo o sea de 5 gal/Km. En los proyectos de estudio, se encontró que todos los sitios de obra estaban más elevados que las canteras y que las escombreras que sirven a cada uno de los tramos, por eso se tomó como constante que los trayectos a las canteras, el consumo es de 7 gal/Km, y el envío de residuos a la escombrera es de 5 gal/Km. En esta conclusión se declinó a incluir los gastos de combustible en el que las volquetas están vacías, ya que no están al servicio del proyecto constructivo.

Con estos datos se procede a realizar los siguientes cálculos:

(12)

$$\text{Consumo total de diésel escombrera} = \text{Distancia total a escombrera} \times 5 \frac{\text{gal}}{\text{Km}}$$

(13)

$$\text{Consumo total de diésel cantera} = \text{Distancia total a cantera} \times 7 \frac{\text{gal}}{\text{Km}}$$

Con las ecuaciones 12 y 13, las resultantes son las siguientes:

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	CONSUMO DE DIÉSEL CANTERAS (GALONES)	CONSUMO DE DIÉSEL ESCOMBRERAS (GALONES)
MÁLAGA	TRAMO 1	1.262	1.842
	TRAMO 2	2.495	3.584

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	CONSUMO DE DIÉSEL CANTERAS (GALONES)	CONSUMO DE DIÉSEL ESCOMBRERAS (GALONES)
	TRAMO 3	2.620	3.763
TOTAL MÁLAGA		6.377	9.190
RIONEGRO	TRAMO 1	1.232	6.143
	TRAMO 2	3.003	14.972
	TRAMO 3	1.543	4.002
	TRAMO 4	3.316	10.198
	TRAMO 5	1.235	3.798
	TRAMO 6	2.490	7.239
	TRAMO 7	2.190	6.368
	TRAMO 8	2.190	6.368
TOTAL RIONEGRO		17.199	59.088
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	3.858	1.423
	TRAMO 2	1.929	712
	TRAMO 3	4.493	1.828
	TRAMO 4	4.098	1.461
	TRAMO 5	2.049	731
	TRAMO 6	3.838	1.415
	TRAMO 7	3.527	764
	TRAMO 8	4.138	916
	TRAMO 9	4.501	481
TOTAL SAN VICENTE DE CHUCURÍ		32.430	9.731

Tabla 26. Diésel consumido en términos de volumen por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.
Fuente: Elaboración Propia

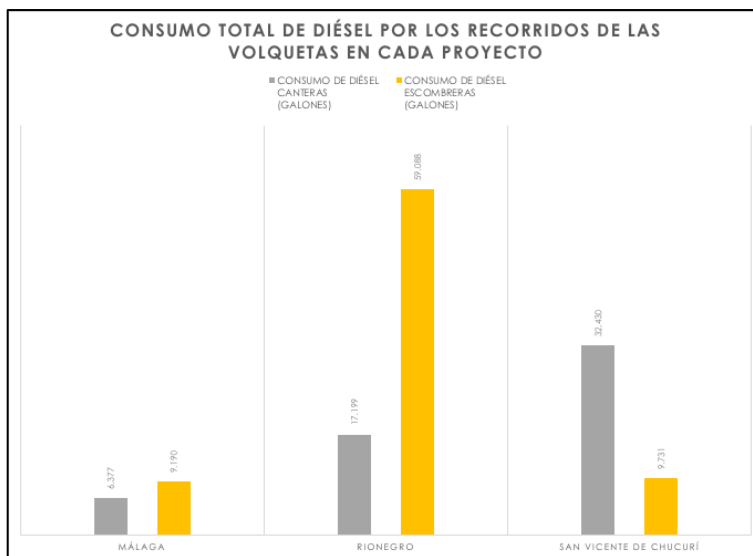


Ilustración 96. Consumo total de diésel por los recorridos de las volquetas en cada proyecto.
Fuente: Elaboración propia

El comportamiento del consumo del diésel por los recorridos de las volquetas es directamente proporcional a los kilómetros que recorrieron dichas volquetas, en este caso, el

proyecto de Rionegro es el que lidera en el consumo por su distancia a la escombrera y gran número de metros cúbicos de residuos transportados. Ahora bien, ya conociendo los volúmenes de diésel consumidos, se deben hacer los cálculos expuestos en las ecuaciones 6, 8 y 10, los cuales sirven para determinar la cantidad de energía producida por este volumen de combustible, que para el caso de las volquetas es como sigue:

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	GALONES TOTALES	KG DIESEL	MJ DIESEL
MÁLAGA	TRAMO 1	3.104,20	9.988.070.609,74	430.485.843.279,75
	TRAMO 2	6.079,28	19.560.687.770,45	843.065.642.906,41
	TRAMO 3	6.383,51	20.539.567.965,59	885.255.379.317,06
TOTAL MÁLAGA		15.566,99	50.088.326.345,78	2.158.806.865.503,21
RIONEGRO	TRAMO 1	7.374,51	23.728.214.960,74	1.022.686.064.808,09
	TRAMO 2	17.975,37	57.837.523.966,81	2.492.797.282.969,72
	TRAMO 3	5.545,12	17.841.964.988,82	768.988.691.017,96
	TRAMO 4	13.513,45	43.480.846.699,53	1.874.024.492.749,59
	TRAMO 5	5.033,07	16.194.396.985,03	697.978.510.054,70
	TRAMO 6	9.728,76	31.303.258.634,88	1.349.170.447.163,47
	TRAMO 7	8.558,39	27.537.453.084,82	1.186.864.227.955,83
	TRAMO 8	8.558,39	27.537.453.084,82	1.186.864.227.955,83
TOTAL RIONEGRO		76.287,05	245.461.112.405,46	10.579.373.944.675,20
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	5.280,91	16.991.850.392,92	732.348.751.934,84
	TRAMO 2	2.640,46	8.495.925.196,46	366.174.375.967,42
	TRAMO 3	6.320,89	20.338.086.642,32	876.571.534.284,08
	TRAMO 4	5.559,55	17.888.399.281,02	770.990.009.011,88
	TRAMO 5	2.779,77	8.944.199.640,51	385.495.004.505,94
	TRAMO 6	5.252,72	16.901.146.225,54	728.439.402.320,75
	TRAMO 7	4.290,30	13.804.466.456,14	594.972.504.259,64
	TRAMO 8	5.054,76	16.264.192.527,77	700.986.697.946,81
	TRAMO 9	4.981,34	16.027.963.143,76	690.805.211.495,90
TOTAL SAN VICENTE DE CHUCURÍ		42.160,71	135.656.229.506,43	5.846.783.491.727,24

Tabla 27. Diésel consumido en términos de energía por las volquetas en cada tramo de cada proyecto.

Fuente: Elaboración Propia

7.7.5 Cálculo de la cantidad de toneladas de diésel por kilómetro dispuestas para su uso

Este dato hace parte de lo que requiere el software SimaPro para realizar el ACV, y se refiere a cuantificar cuanto es el impacto ambiental de transportar todo el diésel necesario para la ejecución de los tres proyectos en cuestión. Para ello se debe determinar inicialmente, la

distancia de cada uno de los frentes de obra con la refinería de ECOPETROL en el municipio de Barrancabermeja, departamento de Santander. Las distancias mencionadas son las siguientes:

PROYECTO	FRENTE DE OBRA	DISTANCIA A LA REFINERÍA (KM)
MÁLAGA	TRAMO 1	278,4
	TRAMO 2	279,1
	TRAMO 3	279,1
RIONEGRO	TRAMO 1	122,4
	TRAMO 2	122,4
	TRAMO 3	158,6
	TRAMO 4	147,2
	TRAMO 5	147,2
	TRAMO 6	154,5
	TRAMO 7	154,5
	TRAMO 8	154,5
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	56,5
	TRAMO 2	56,5
	TRAMO 3	62,1
	TRAMO 4	60,5
	TRAMO 5	60,5
	TRAMO 6	56,2
	TRAMO 7	68,9
	TRAMO 8	70,2
	TRAMO 9	65,8

Tabla 28. Distancia de la refinería de Barrancabermeja a cada frente de trabajo de cada proyecto.
Fuente: Google Earth

Obtenida la distancia, se tendrá al dividir esto con la cantidad de diésel que se necesita en cada uno de los frentes para alimentar la maquinaria y las volquetas, la cual ya se obtuvo en los apartados anteriores, y este producto sería el dato necesario por el software en la unidad de toneladas de diésel por kilómetro recorrido (Tn/Km). Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ carga\ \frac{Tn}{Km} = \frac{^{(14)}\ Peso\ de\ diésel\ (Tn)}{Distancia\ a\ la\ refineria\ (Km)}$$

Según la ecuación 14, el resultado de la tasa de carga del diésel, sería de la siguiente manera:

PROYECTO	TRAMO	DIESEL CONSUMIDO POR VOLQUETAS Y MAQUINARIA (Kg)	DISTANCIA A REFINERÍA (Km)	TON/KM
MÁLAGA	1	12.442.422.570	278,4	44.692,61
MÁLAGA	2	20.728.547.322	279,1	74.269,25
MÁLAGA	3	21.752.473.896	279,1	77.937,92
RIONEGRO	1	24.426.530.363	122,4	199.563,16
RIONEGRO	2	58.791.702.802	122,4	480.324,37
RIONEGRO	3	19.740.991.624	158,6	124.470,31
RIONEGRO	4	44.376.980.058	147,2	301.474,05
RIONEGRO	5	17.145.744.334	147,2	116.479,24
RIONEGRO	6	32.173.393.797	154,5	208.242,03
RIONEGRO	7	28.605.792.315	154,5	185.150,76
RIONEGRO	8	28.222.833.741	154,5	182.672,06
SAN VICENTE	1	18.454.184.559	56,5	326.622,74
SAN VICENTE	2	9.973.060.316	56,5	176.514,34
SAN VICENTE	3	21.530.110.359	62,1	346.700,65
SAN VICENTE	4	19.436.353.743	60,5	321.262,05
SAN VICENTE	5	10.685.950.061	60,5	176.627,27
SAN VICENTE	6	18.281.560.334	56,2	325.294,67
SAN VICENTE	7	14.811.349.555	68,9	214.968,79
SAN VICENTE	8	17.143.111.734	70,2	244.203,87
SAN VICENTE	9	17.174.039.553	65,8	261.003,64

Tabla 29. Cálculo de la tasa de carga de combustible por cada tramo de cada proyecto.

Fuente: Elaboración propia

7.8 Impactos ambientales obtenidos bajo la metodología del ACV

7.8.1 *Impactos generados por el proyecto de Málaga*

A continuación, se muestran las redes de aporte de contaminantes que se tuvieron en cada uno de los tramos intervenidos, donde se tuvieron diferencias en las cantidades de horas de trabajo realizadas por la maquinaria, diferencias en las distancias recorridas por las volquetas, y diferencia en la distancia entre la refinería de Barrancabermeja y el frente de trabajo:

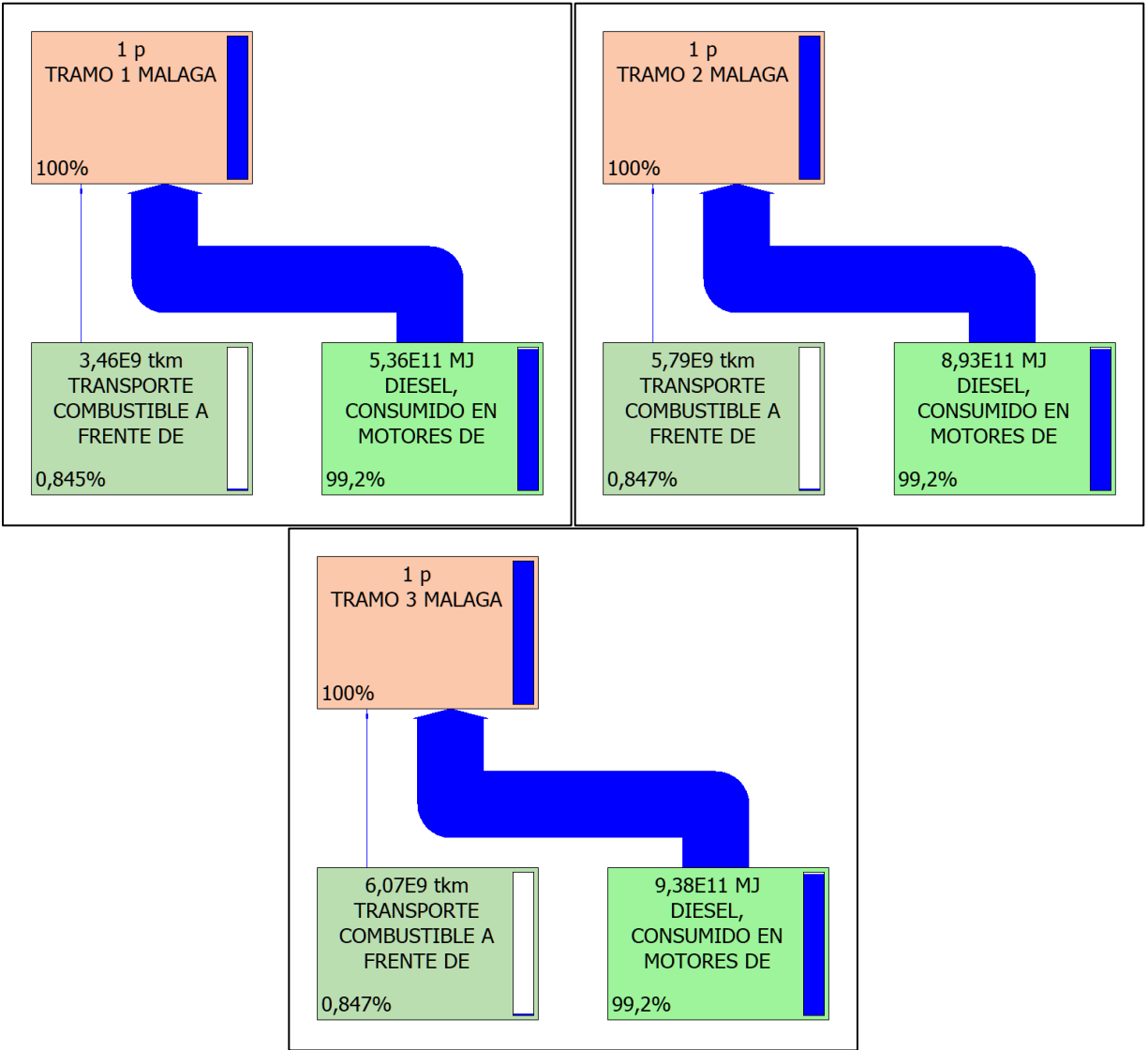


Ilustración 97. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de Málaga.

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 97, se puede observar claramente que el consumo del diésel en el proceso de combustión interna, que realizan los motores de la maquinaria y de las volquetas, es el proceso que más aporta, acorde con los porcentajes estimados y que se reflejarán en la estimación de las resultantes de los impactos ambientales generados por el proyecto de mejoramiento vial en el municipio de Málaga, ya que sus porcentajes de aporte, siempre estuvieron por encima del 99%.

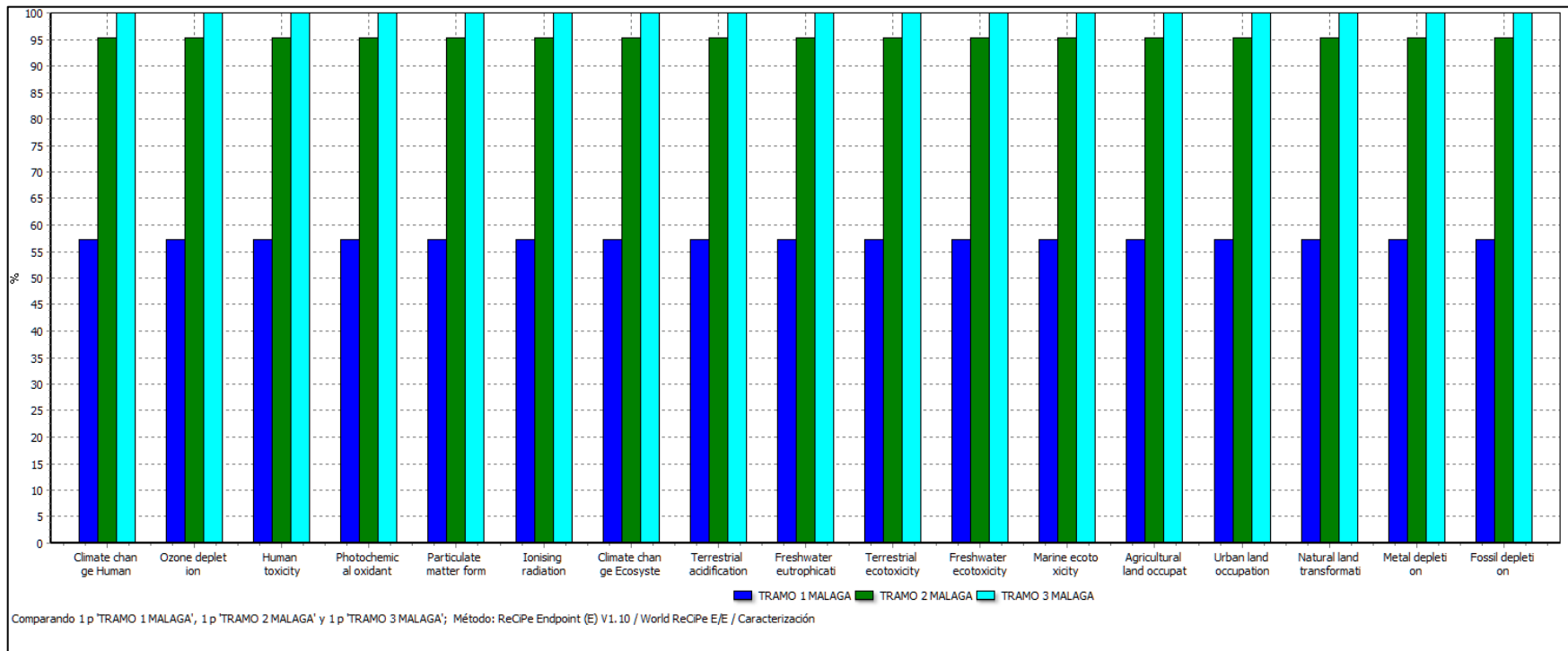


Ilustración 98. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de Málaga.

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración anterior, se muestran todas las categorías de impacto que evaluó el software, y que a primera vista, muestra que el tramo 3 del proyecto, es el que más aporta a cada una de estas categorías estudiadas, aunque en la ilustración 76, se muestra que las horas de maquinaria del tramo 1 son las más altas en comparación con las otras tres, en la tabla 27 se observa que el volumen de diésel consumido por las volquetas es mucho más alto en consideración al de las máquinas, y esto se traduce, en que este tramo 3 sea el que más pesa dentro de la comparación de impactos.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	TRAMO 1 MÁLAGA	TRAMO 2 MÁLAGA	TRAMO 3 MÁLAGA
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA	DALY	174.738,41	291.112,95	305.493,04
AGOTAMIENTO DE OZONO	DALY	8,80	14,66	15,38
TOXICIDAD HUMANA	DALY	61.108,69	101.810,49	106.839,62
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	DALY	27,26	45,41	47,66
FORMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	DALY	51.808,76	86.312,35	90.575,92
RADIACIÓN IONIZANTE	DALY	48,41	80,65	84,63
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS	SPECIES.YR	930,93	1.550,92	1.627,53
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	SPECIES.YR	6,66	11,10	11,65
EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,07	0,12	0,13
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	SPECIES.YR	2,35	3,91	4,11
ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,06	0,10	0,10
ECOTOXICIDAD MARINA	SPECIES.YR	14,44	24,06	25,25
OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS	SPECIES.YR	1,07	1,79	1,88
OCUPACIÓN DE SUELO URBANO	SPECIES.YR	2,41	4,02	4,22
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL	SPECIES.YR	85,07	141,74	148,74
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO	\$	133.597.530,82	222.575.196,29	233.569.727,39
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL	\$	2.825.893.437,11	4.707.926.224,92	4.940.483.320,98

Tabla 30. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Málaga.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la cuantificación de los impactos, se observa en la tabla 30, que en todas las categorías de impacto el tramo 3 tiene mayor influencia, sobre los otros dos, con valores que duplican o más en algunos casos con respecto a los valores del tramo 1.

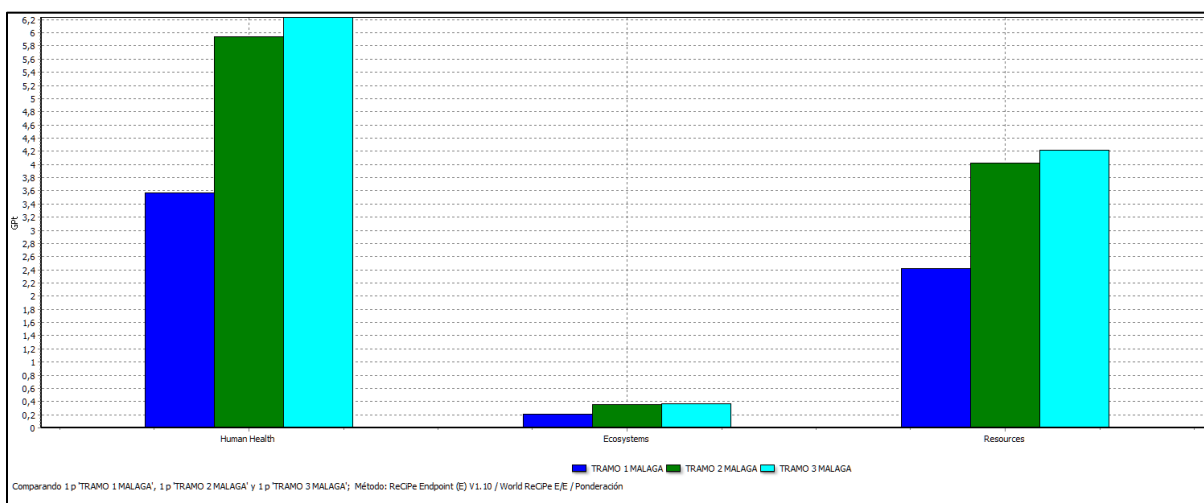


Ilustración 99. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de Málaga.

Fuente: Elaboración propia

DAÑO DE CATEGORÍA	UNIDAD	TRAMO 1 MÁLAGA	TRAMO 2 MÁLAGA	TRAMO 3 MÁLAGA
SALUD HUMANA	GPt	3,57	5,94	6,23
ECOSISTEMAS	GPt	0,21	0,35	0,37
RECURSOS	GPt	2,41	4,02	4,22
TOTAL	GPt	6,19	10,31	10,82

Tabla 31. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Málaga.

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico y tabla anterior, se puede observar que los tramos 2 y 3 son los tramos que tienen un comportamiento muy similar, pero considerablemente superior al tramo 1, en cuanto al impacto que tiene la ejecución de las actividades constructivas, en los ecosistemas, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos.

7.8.2 *Impactos generados por el proyecto de Rionegro*

En el proyecto de Rionegro, se tienen ocho frentes de trabajo, en los cuales se reportó el siguiente comportamiento en el aporte de contaminantes. Cabe recordar que estos frentes de trabajo, también contaban con notables diferencias en sus variables técnicas pero este proyecto de construcción presentaba una notoria variabilidad, y era que los frentes de trabajo se ubicaban por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar.

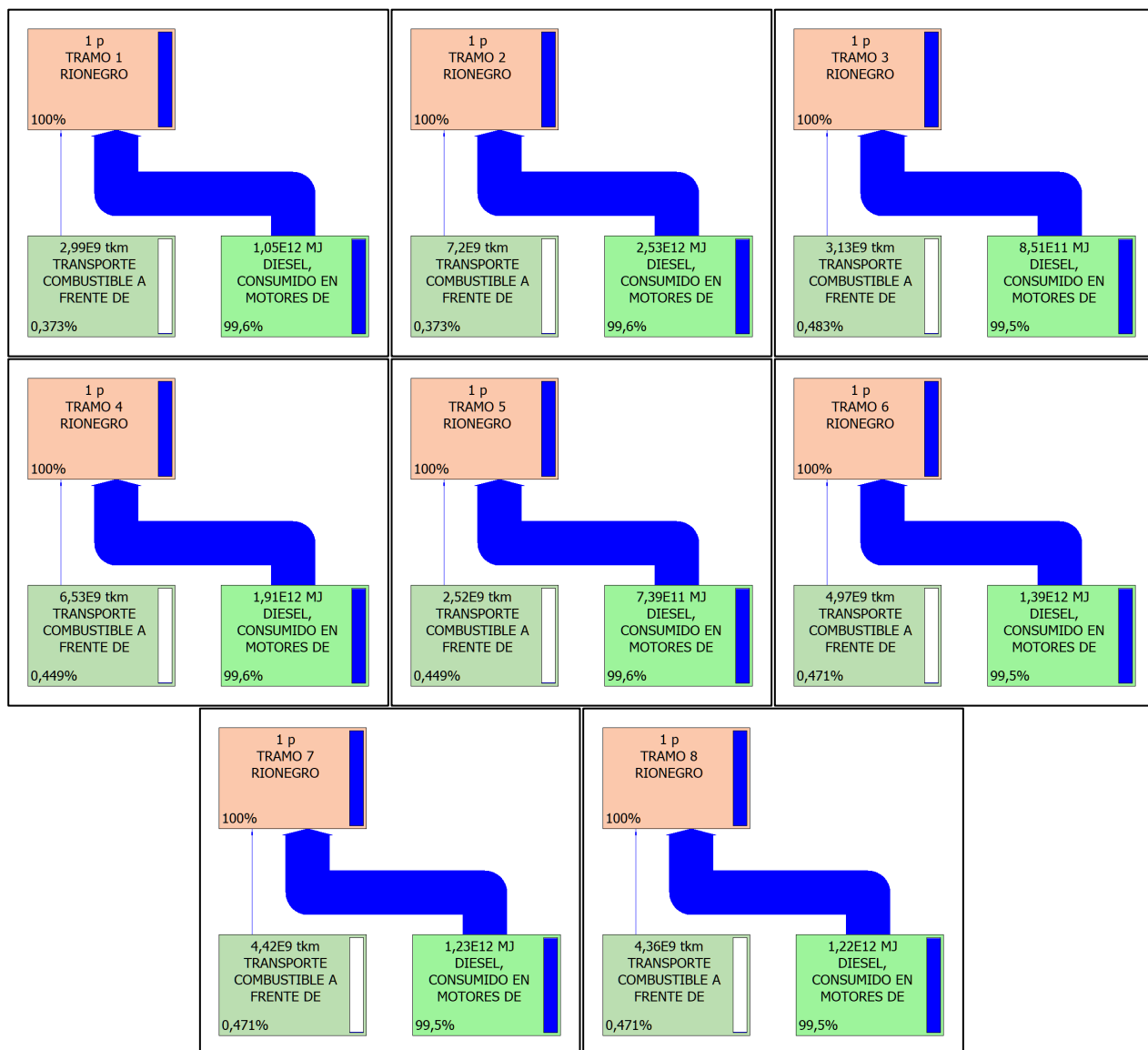


Ilustración 100. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 100, nuevamente se tiene que la tendencia de los 8 tramos de que el consumo del diésel en los motores de combustión de las máquinas y volquetas, son los que más aportan en los impactos ambientales del proyecto de Rionegro.

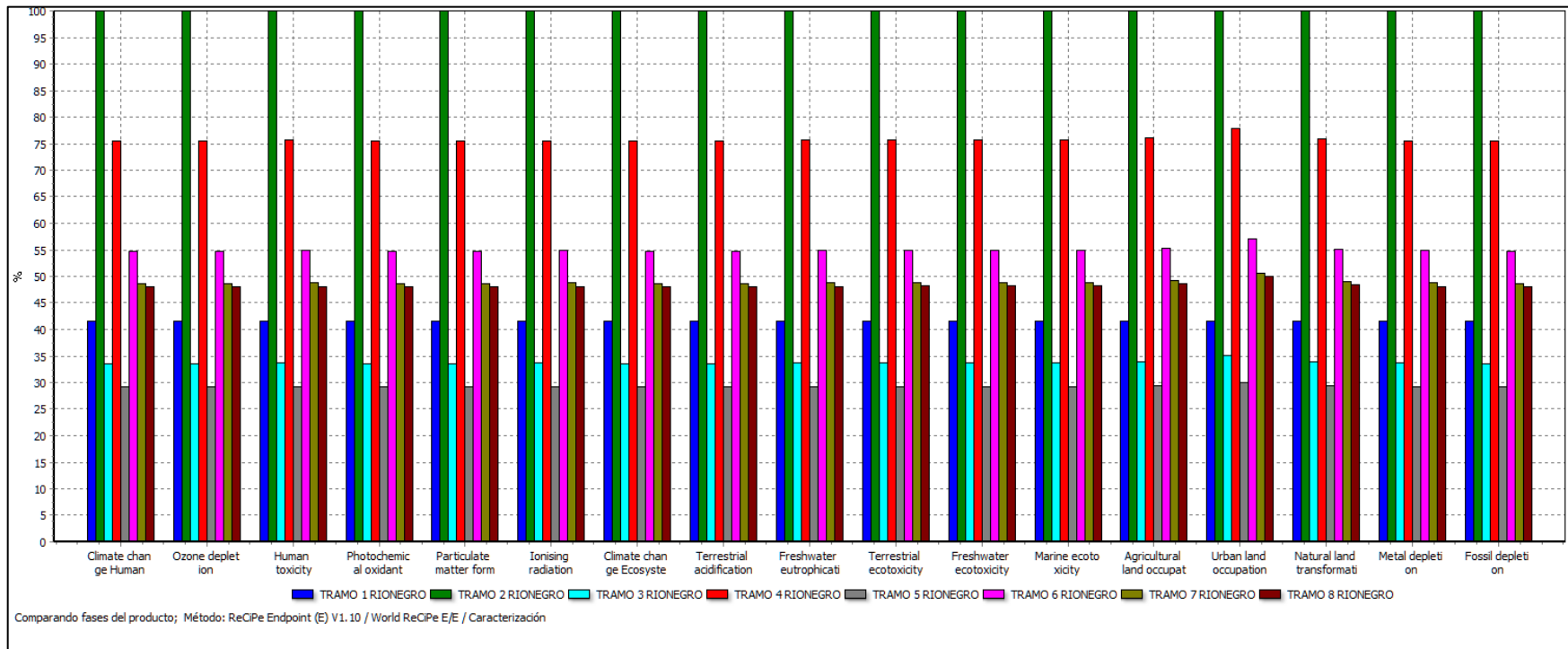


Ilustración 101. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 101, se refleja que los tramos 2, 4 y 6 están por encima del 50% n la medición de las diferentes categorías de impacto, donde notablemente el tramo 2 lidera los impactos, donde aquí se presentó la segunda mayor cantidad de viajes de volqueta a la escombrera de todos los tramos de este proyecto, pero era el tramo que tenía mayor distancia a recorrer a la escombrera. Por estas dos novedades, es que el tramo 2 del proyecto de Rionegro es el más impactante de todas las intervenciones.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	TRAMO 1 RIONEGRO	TRAMO 2 RIONEGRO	TRAMO 3 RIONEGRO	TRAMO 4 RIONEGRO	TRAMO 5 RIONEGRO	TRAMO 6 RIONEGRO	TRAMO 7 RIONEGRO	TRAMO 8 RIONEGRO
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA	DALY	3,4 x 10 ⁵	8,2 x 10 ⁵	2,8 x 10 ⁵	6,2 x 10 ⁵	2,4 x 10 ⁵	4,5 x 10 ⁵	4,0 x 10 ⁵	3,9 x 10 ⁵
AGOTAMIENTO DE OZONO	DALY	17,18	41,35	13,90	31,24	12,07	22,65	20,14	19,87
TOXICIDAD HUMANA	DALY	1,2 x 10 ⁵	2,8 x 10 ⁵	9,6 x 10 ⁴	2,2 x 10 ⁵	8,3 x 10 ⁴	1,6 x 10 ⁵	1,4 x 10 ⁵	1,4 x 10 ⁵
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	DALY	53,36	128,42	43,15	96,98	37,47	70,32	62,52	61,69
FORMACIÓN DE MATERIAL PARTÍCULADO	DALY	1,0 x 10 ⁵	2,4 x 10 ⁵	8,2 x 10 ⁴	1,8 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁴	1,3 x 10 ⁵	1,2 x 10 ⁵	1,2 x 10 ⁵
RADIACIÓN IONIZANTE	DALY	94,33	227,05	76,37	171,58	66,29	124,44	110,64	109,16
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS	SPECIES. YR	1,8 x 10 ³	4,4 x 10 ³	1,5 x 10 ³	3,3 x 10 ³	1,3 x 10 ³	2,4 x 10 ³	2,1 x 10 ³	2,1 x 10 ³
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	SPECIES. YR	13,04	31,39	10,55	23,71	9,16	17,19	15,28	15,08
EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE	SPECIES. YR	0,15	0,35	0,12	0,26	0,10	0,19	0,17	0,17
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	SPECIES. YR	4,54	10,93	3,68	8,27	3,20	6,00	5,34	5,26
ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	SPECIES. YR	0,11	0,27	0,09	0,20	0,08	0,15	0,13	0,13
ECOTOXICIDAD MARINA	SPECIES. YR	27,97	67,32	22,68	50,92	19,67	36,94	32,85	32,41
OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS	SPECIES. YR	2,00	4,80	1,63	3,66	1,41	2,66	2,36	2,33
OCUPACIÓN DE SUELO URBANO	SPECIES. YR	3,95	9,50	3,34	7,40	2,86	5,41	4,81	4,75
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL	SPECIES. YR	160,40	386,07	130,87	293,32	113,33	213,06	189,44	186,90
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO	\$	2,6 x 10 ⁸	6,3 x 10 ⁸	2,1 x 10 ⁸	4,7 x 10 ⁸	1,8 x 10 ⁸	3,4 x 10 ⁸	3,1 x 10 ⁸	3,9 x 10 ⁸
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL	\$	5,5 x 10 ⁹	1,3 x 10 ¹⁰	4,5 x 10 ⁹	1,0 x 10 ¹⁰	3,9 x 10 ⁹	7,3 x 10 ⁹	6,5 x 10 ⁹	6,4 x 10 ⁹

Tabla 32. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 32, se conserva la tendencia de liderazgo del tramo 2 en la magnitudes de impacto elevadas, asociadas a las horas de trabajo de la maquinaria que en este frente de obra, fue donde se presentaron las más altas, y que además fue donde más kilómetros recorrieron las volquetas, ya que generaron más escombros que los demás frentes de obra, con un volumen de 394 m³ de escombros con 76 Km de distancia por recorrer, mientras que el segundo en esta lista 335 m³ de escombros con 41 Km de distancia por recorrer.

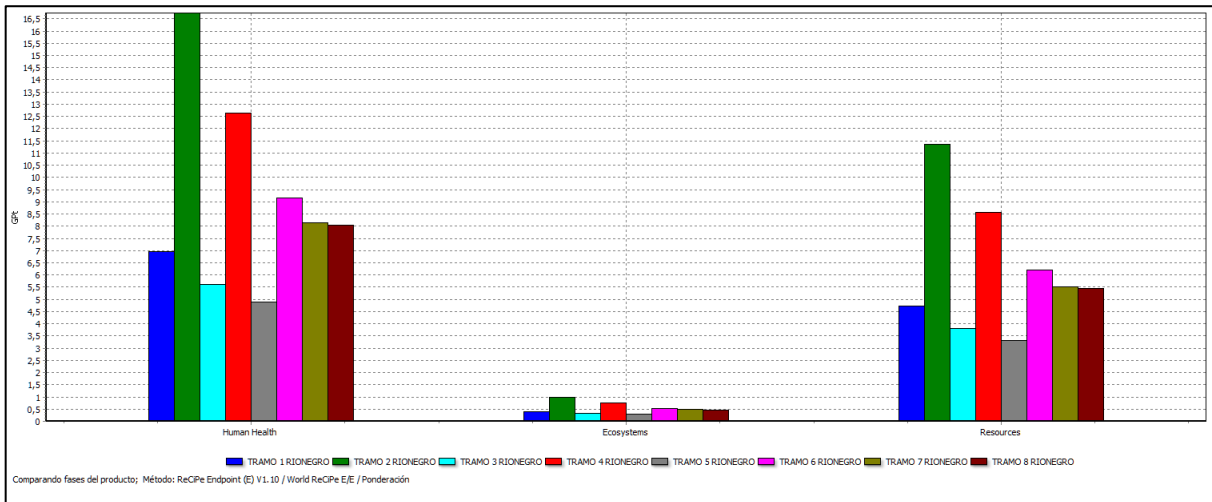


Ilustración 102. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de Rionegro.
Fuente: Elaboración propia

DAÑO DE CATEGORÍA	UNIDAD	TRAMO 1 RIONEGRO	TRAMO 2 RIONEGRO	TRAMO 3 RIONEGRO	TRAMO 4 RIONEGRO	TRAMO 5 RIONEGRO	TRAMO 6 RIONEGRO	TRAMO 7 RIONEGRO	TRAMO 8 RIONEGRO
SALUD HUMANA	Gpt	6,96	16,74	5,63	12,65	4,89	9,17	8,16	8,05
ECOSISTEMAS	Gpt	0,41	0,99	0,33	0,74	0,29	0,54	0,48	0,47
RECURSOS	Gpt	4,72	11,35	3,82	8,58	3,31	6,22	5,53	5,46
TOTAL	Gpt	12,08	29,08	9,78	21,97	8,49	15,93	14,17	13,98

Tabla 33. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.
Fuente: Elaboración propia

Nuevamente se observa que los tramos 2 y 4 son los que marcan una puntuación elevada en los impactos finales a los ecosistemas, la salud humana y los recursos, todo esto debido a las grandes distancias que estaban los frentes de obra a los sitios de destino de las volquetas, y el gran número de horas de trabajo de la maquinaria. Estos dos frentes tuvieron que remover

cantidades de tierra adicionales por la reconfiguración de taludes asociados al fenómeno invernal presente este año en el país.

7.8.3 Impactos generados por el proyecto de San Vicente de Chucurí

En este proyecto se debe resaltar inicialmente, que, en su construcción y diseño, se evidenciaron ciertas novedades de índole técnico, como:

- Es el proyecto de menor altitud sobre el nivel del mar (693 msnm).
- El proyecto es el más cercano a la refinería de Barrancabermeja (62 Km en promedio).
- El proyecto tiene frentes de obra con mayor excavación (Entre 35 a 60 cm de espesor tiene el diseño de pavimento).

Con estas claridades, a continuación, se muestra el panorama del aporte de las actividades en los impactos ambientales de cada uno de los frentes de obra:

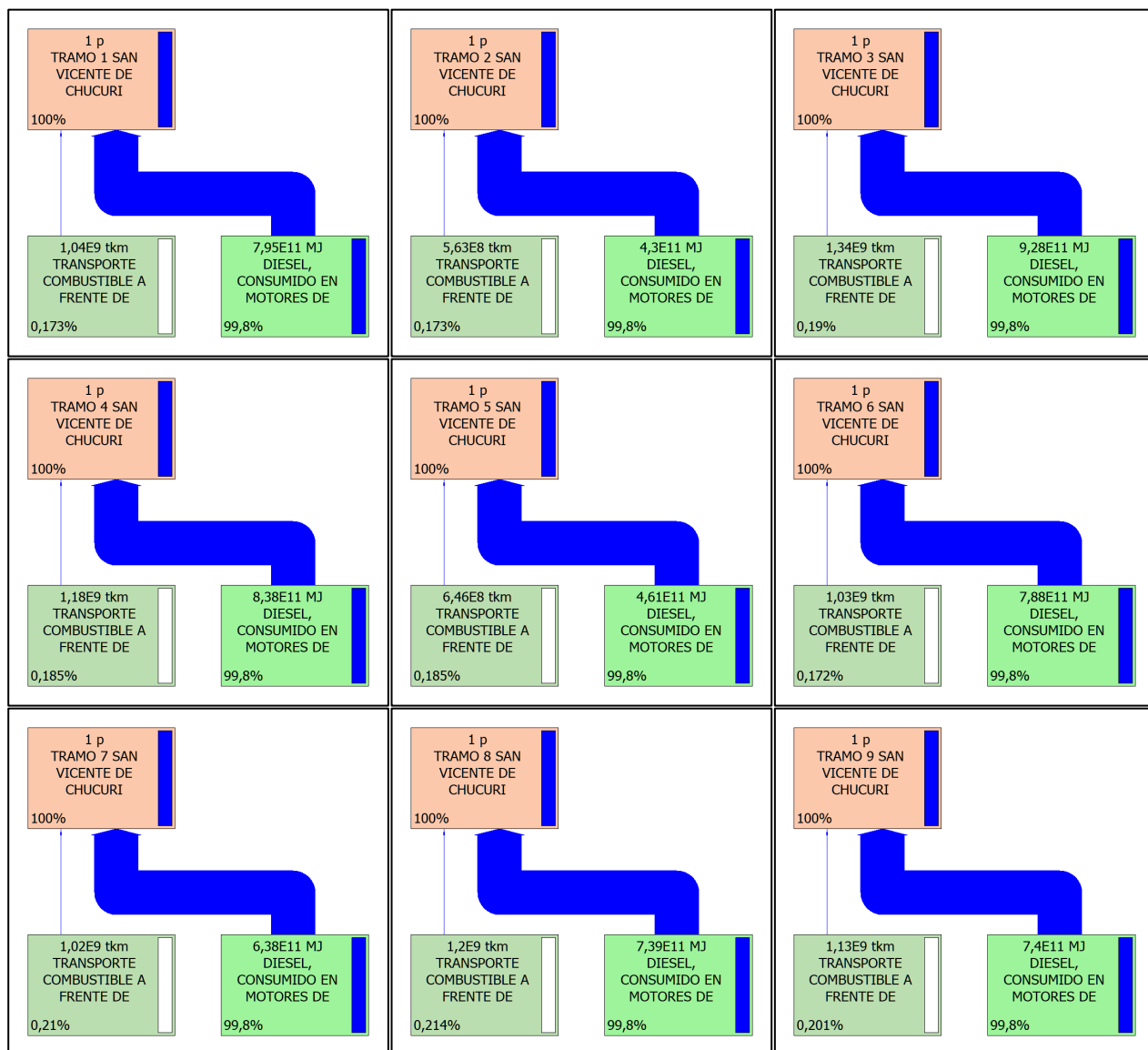


Ilustración 103. Red de aporte a los impactos ambientales generados por cada uno de los tramos en el proyecto de San Vicente de Chucurí.

Fuente: Elaboración propia

Como se resaltó anteriormente, en las novedades técnicas, la distancia de la refinería es muy cercana a los frentes de obra, y se observa claramente que la actividad del transporte del combustible a los tramos intervenidos, aportan mucho menos que los otros dos proyectos en estudio, esto es algo que se entrará en detalle más adelante. Sin embargo, sigue el liderazgo de la actividad de consumo de combustible en cuanto al aporte en los impactos ambientales.

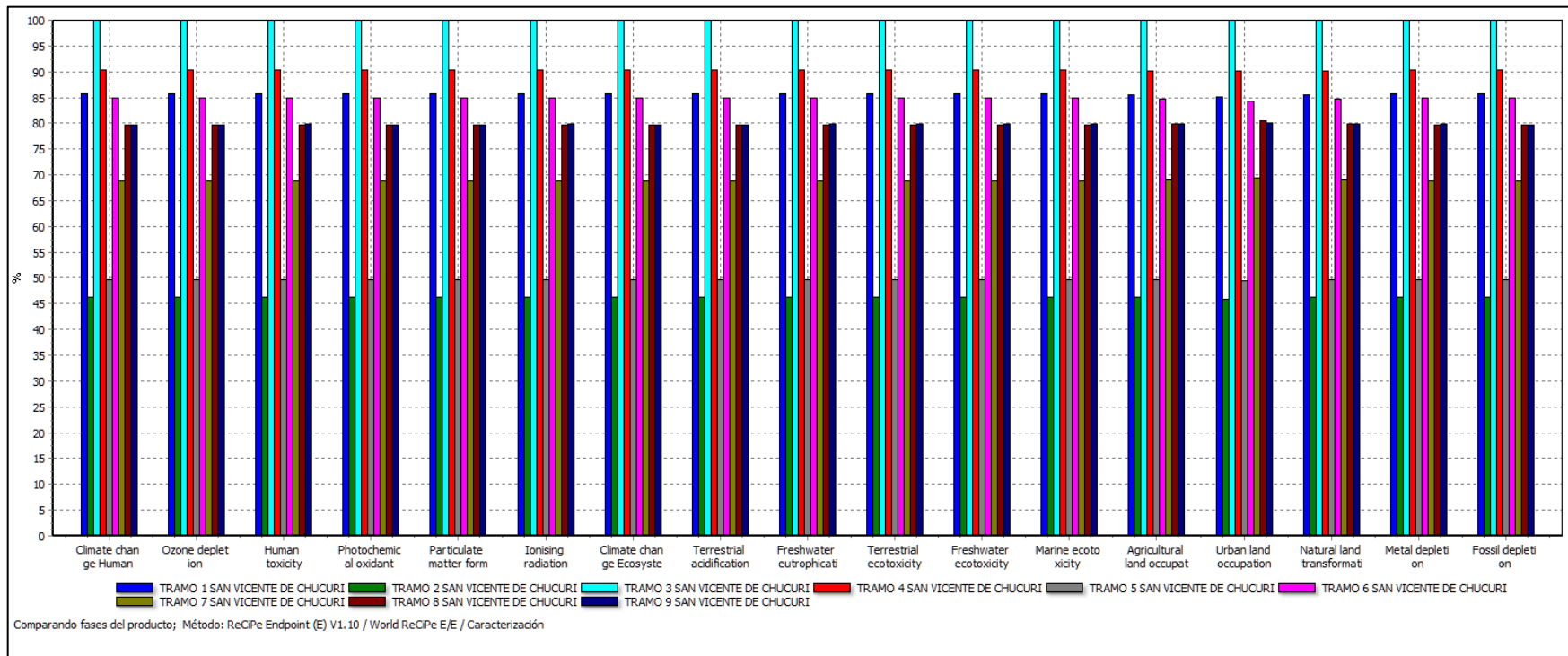


Ilustración 104. Porcentajes de participación en los impactos ambientales en los tramos del proyecto de San Vicente de Chucurí.

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior, se observa con preocupación que tan solo 2 tramos, están por debajo del 50% del total de los impactos generados por el tramo más impactante, y esto se asume que es por la influencia de las condiciones técnicas del proyecto, y que, aunque tuvieron influencia del invierno presentado en el país, se acerca más a un estado real de proyecto, bajo un escenario predictivo desde el diseño del mismo, ya que no tuvieron que realizar reprocesos, manejo de taludes por emergencia, u otras situaciones que afectaran las lluvias en el proceso constructivo.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	TRAMO 1 SVDC	TRAMO 2 SVDC	TRAMO 3 SVDC	TRAMO 4 SVDC	TRAMO 5 SVDC	TRAMO 6 SVDC	TRAMO 7 SVDC	TRAMO 8 SVDC	TRAMO 8 SVDC
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA	DALY	2,6 x 10 ⁵	1,4x10 ⁵	3,0x10 ⁵	2,7x10 ⁵	1,5x10 ⁵	2,6x10 ⁵	2,1x10 ⁵	2,4x10 ⁵	2,4x10 ⁵
AGOTAMIENTO DE OZONO	DALY	12,95	7,00	15,11	13,64	7,50	12,83	10,40	12,04	12,06
TOXICIDAD HUMANA	DALY	8,9x10 ⁴	4,8x10 ⁴	1,0x10 ⁵	9,4x10 ⁴	5,2x10 ⁴	8,8x10 ⁴	7,1x10 ⁴	8,3x10 ⁴	8,3x10 ⁴
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	DALY	40,26	21,76	46,97	42,41	23,31	39,88	32,32	37,41	37,47
FORMACIÓN DE MATERIAL PARTÍCULADO	DALY	7,7x10 ⁴	4,1x10 ⁴	8,9x10 ⁴	8,1x10 ⁴	4,4x10 ⁴	7,6x10 ⁴	6,1x10 ⁴	7,1x10 ⁴	7,1x10 ⁴
RADIACIÓN IONIZANTE	DALY	71,05	38,39	82,91	74,84	41,15	70,38	57,06	66,04	66,15
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS	SPECIES. YR	1.371,42	741,15	1.600,28	1.444,59	794,22	1.358,58	1.101,12	1.274,52	1.276,65
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	SPECIES. YR	9,84	5,32	11,48	10,36	5,70	9,75	7,90	9,14	9,16
EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE	SPECIES. YR	0,11	0,06	0,13	0,12	0,06	0,11	0,09	0,10	0,10
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	SPECIES. YR	3,41	1,84	3,98	3,59	1,98	3,38	2,74	3,17	3,18
ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	SPECIES. YR	0,08	0,05	0,10	0,09	0,05	0,08	0,07	0,08	0,08
ECOTOXICIDAD MARINA	SPECIES. YR	21,01	11,35	24,52	22,13	12,17	20,81	16,88	19,54	19,57
OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS	SPECIES. YR	1,47	0,80	1,72	1,55	0,85	1,46	1,19	1,37	1,38
OCUPACIÓN DE SUELO URBANO	SPECIES. YR	2,73	1,47	3,21	2,89	1,59	2,70	2,23	2,58	2,57
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL	SPECIES. YR	119,08	64,35	139,14	125,55	69,03	117,96	95,89	111,03	111,10
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO	\$	2,0x10 ⁸	1,1x10 ⁸	2,3x10 ⁸	2,1x10 ⁸	1,1x10 ⁸	1,9x10 ⁸	1,6x10 ⁸	1,8x10 ⁸	1,8x10 ⁸
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL	\$	4,2x10 ⁹	2,2x10 ⁹	4,9x10 ⁹	4,4x10 ⁹	2,4x10 ⁹	4,1x10 ⁹	3,3x10 ⁹	3,9x10 ⁹	3,9x10 ⁹

Tabla 34. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

Como se había mencionado, existen dos tramos en este proyecto que no impactan de la misma forma que el resto de los tramos, que son el 2 y el 5, y realizando un análisis a la cantidad de viajes de material y escombros generados, fueron los que presentaron una menos cuantía en esta necesidad, y pues como ya se ha dicho a lo largo de este documento, la alta incidencia del consumo de combustible de las volquetas es el que impacta dentro de la identificación y cuantificación de impactos generados por un tramo de mejoramiento vial.

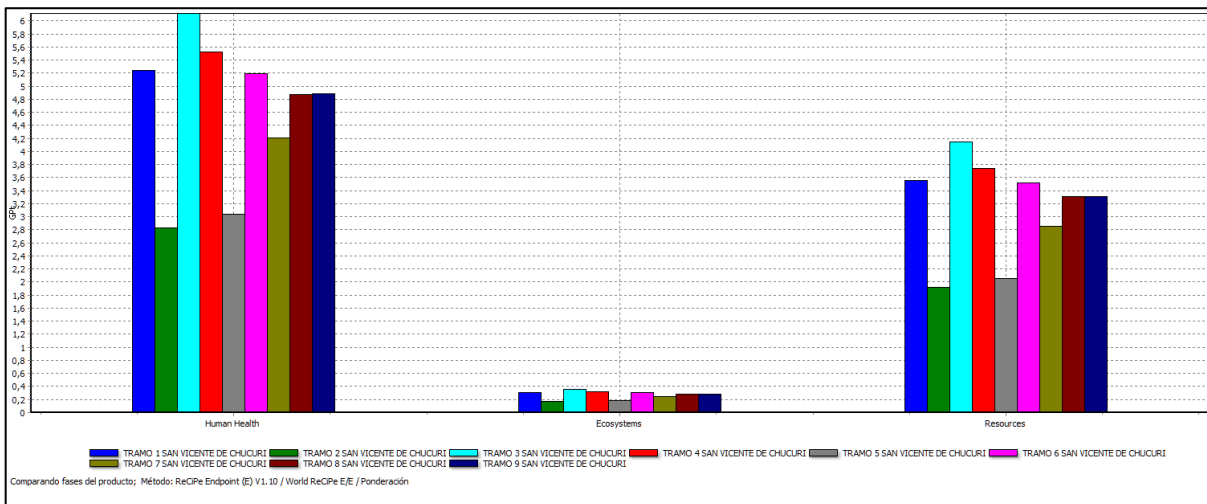


Ilustración 105. Valoración de los impactos ambientales en el endpoint en el proyecto de San Vicente de Chucurí.

Fuente: Elaboración propia

DAÑO DE CATEGORÍA	UNIDAD	TRAMO 1 SVDC	TRAMO 2 SVDC	TRAMO 3 SVDC	TRAMO 4 SVDC	TRAMO 5 SVDC	TRAMO 6 SVDC	TRAMO 7 SVDC	TRAMO 8 SVDC	TRAMO 8 SVDC
SALUD HUMANA	GPt	5,24	2,83	6,12	5,52	3,04	5,19	4,21	4,87	4,88
ECOSISTEMAS	GPt	0,31	0,17	0,36	0,32	0,18	0,31	0,25	0,29	0,29
RECURSOS	GPt	3,56	1,92	4,15	3,74	2,06	3,52	2,85	3,30	3,31
TOTAL	GPt	9,10	4,92	10,62	9,59	5,27	9,02	7,31	8,46	8,48

Tabla 35. Valoración de los impactos en cada uno de los tramos del proyecto de San Vicente de Chucurí.

Fuente: Elaboración propia

Los tramos 2 y 5, como se esperaba, son los que menos incidencia tienen en la totalidad de impactos generados en el *endpoint* del ciclo de vida en los tres factores analizados. La comparación entre el tramo 2, que es el de menor cuantía de los nueve, y el tramo 3, que a su vez reporta los valores más altos, dobla en valores de cada uno de los ítems evaluados en esta parte del proceso de análisis, mientras que los otros cinco tramos están por encima de la media de los datos, mostrando una diferencia notoria, en estos tramos de bajo impacto.

7.9 Análisis de los impactos ambientales obtenidos

7.9.1 Análisis de las categorías de impacto

En este apartado, se muestra el comportamiento de las diferentes categorías de impacto analizadas dentro del ciclo de vida, bajo el método de ReCiPe Endpoint, y que generó el software SimaPro v8.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	MÁLAGA	RIONEGRO	SAN VICENTE DE CHUCURÍ	TOTAL
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA	DALY	771.344,40	3.545.185,66	2.057.707,00	6.374.237,06
AGOTAMIENTO DE OZONO	DALY	38,83	178,40	103,52	320,76
TOXICIDAD HUMANA	DALY	269.758,80	1.230.691,12	711.167,06	2.211.616,99
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	DALY	120,33	553,91	321,79	996,03
FORMACIÓN DE MATERIAL PARTÍCULADO	DALY	228.697,02	1.052.717,09	611.572,60	1.892.986,71
RADIACIÓN IONIZANTE	DALY	213,68	979,87	567,96	1.761,52
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS	SPECIES.YR	4.109,37	18.887,14	10.962,53	33.959,04
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	SPECIES.YR	29,42	135,40	78,65	243,47
EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,33	1,51	0,87	2,72
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	SPECIES.YR	10,37	47,23	27,27	84,86
ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,26	1,17	0,67	2,10
ECOTOXICIDAD MARINA	SPECIES.YR	63,75	290,75	167,98	522,48
OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS	SPECIES.YR	4,74	20,86	11,79	37,39
OCUPACIÓN DE SUELO URBANO	SPECIES.YR	10,66	42,00	21,97	74,64
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL	SPECIES.YR	375,55	1.673,39	953,12	3.002,06
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO	\$	589.742.454,50	2.704.188.097,29	1.567.389.194,04	4.861.319.745,84
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL	\$	12.474.302.983,01	57.314.689.830,53	33.260.344.499,38	103.049.337.312,92

Tabla 36. Valoración de los impactos en cada uno de los proyectos estudiados.

Fuente: Elaboración propia

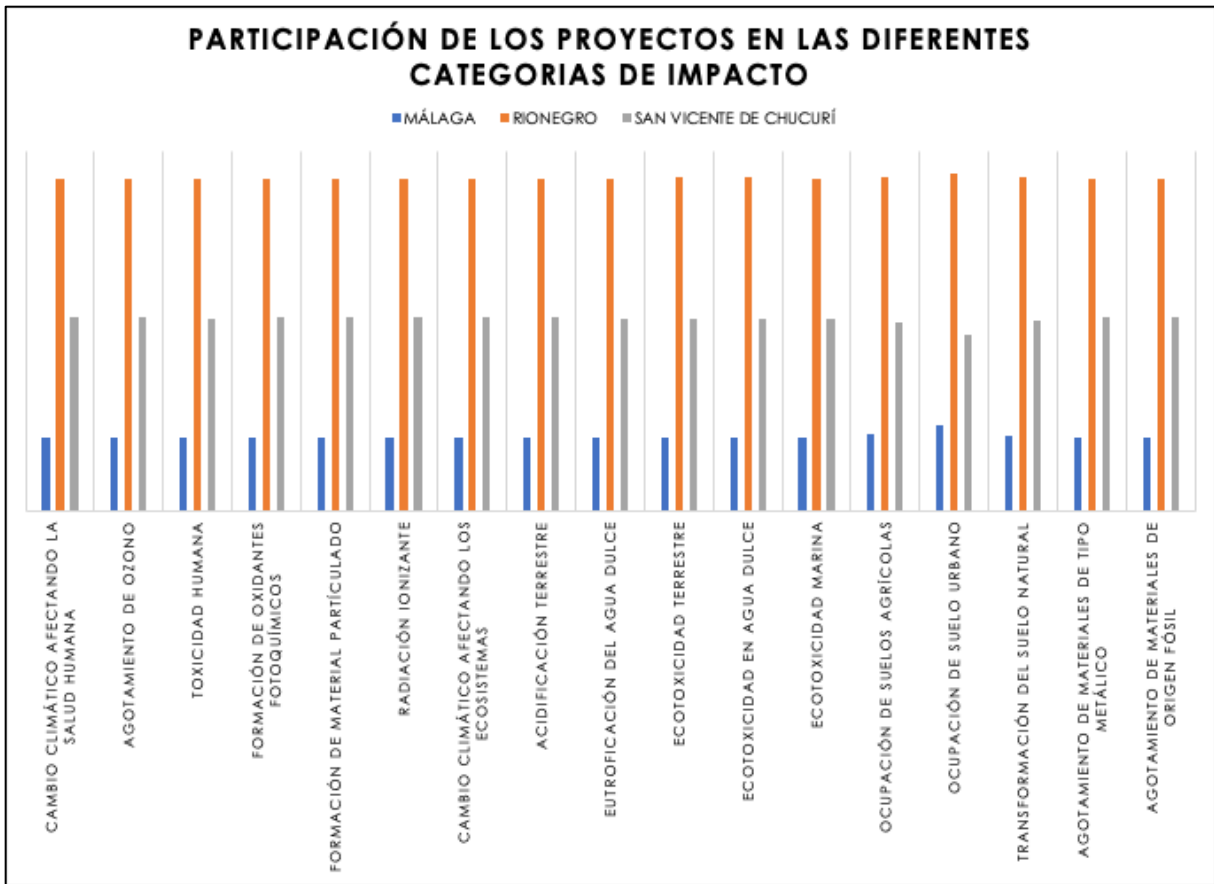


Ilustración 106. Valoración de las categorías de impacto en los proyectos de mejoramiento vial.
Fuente: Elaboración propia

En la anterior tabla e ilustración, se observa claramente que el proyecto de Rionegro es el que presenta mayor incidencia en los impactos ambientales generados por la actividad de mejoramiento de vías terciarias. Cabe resaltar, que el proyecto de Rionegro presentó implicaciones de orden técnico que influenciaron en el mayor consumo de diésel como son que era el proyecto que tenía la mayor distancia desde la escombrera y la cantera hacia los frentes de obra, y que necesitó de mayor cantidad de materiales por los daños hechos por las lluvias, y que además sufrió con más severidad los embates de la ola invernal presentados este año (2022), en el país.

7.9.2 Análisis específico del daño producido por la categoría de impacto cambio climático

A continuación, se muestra la magnificación del daño producido por la combustión del diésel en cada uno de los proyectos estudiados, desde el punto de vista, del daño asociado con el cambio climático en la salud humana, los ecosistemas y los recursos.

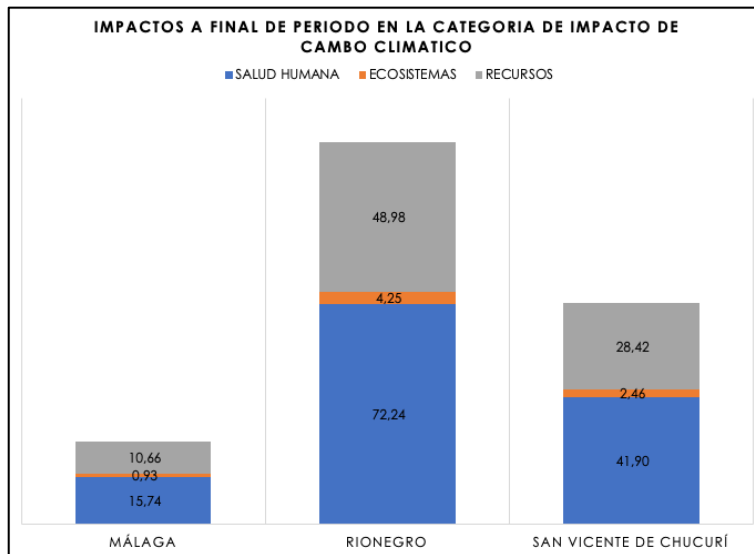


Ilustración 107. Valoración de los impactos ambientales efectuados por el cambio climático por la ejecución de proyectos de mejoramiento vial.

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la ilustración 105, la tendencia se mantiene, en la que el proyecto de Rionegro es más impactante que los de Málaga y el de San Vicente de Chucurí. Esto se deduce por los amplios consumos de diésel que tuvo el proyecto, por su lejanía al sitio de disposición final de materiales y al lugar de obtención de materiales granulares, el cual, sumado a los altos índices de consumo por kilómetro de las volquetas, supera al consumo por hora de las máquinas que se utilizaron en los proyectos de mejoramiento vial.

CATEGORÍA DE DAÑO	UNIDAD	MÁLAGA	RIONEGRO	SAN VICENTE DE CHUCURÍ
SALUD HUMANA	GPt	15,74	72,24	41,90
ECOSISTEMAS	GPt	0,93	4,25	2,46
RECURSOS	GPt	10,66	48,98	28,42
TOTAL	GPt	27,33	125,46	72,78

Tabla 37. Valoración de los impactos asociados al cambio climático en los proyectos de mejoramiento vial.
Fuente: Elaboración propia

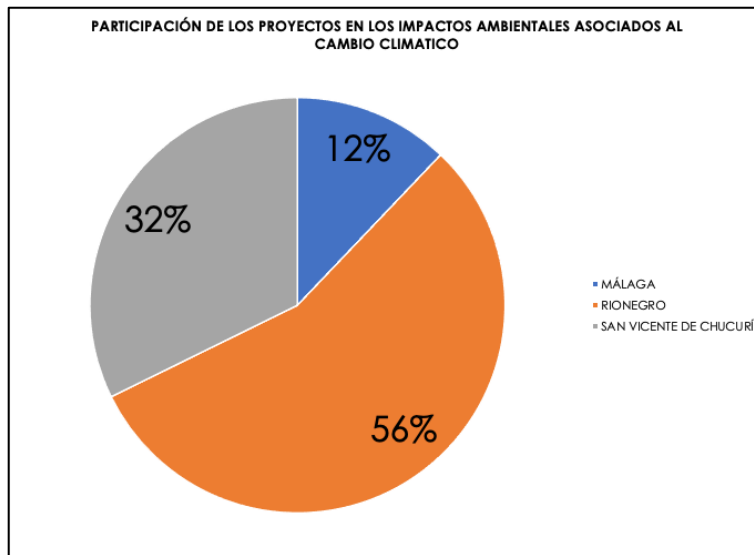


Ilustración 108. Participación de los proyectos de mejoramiento vial en la generación de impactos ambientales.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo mostrado en la Tabla 37 y la Ilustración 107, el proyecto de Rionegro reporta el 56% de los impactos ambientales generados por las emisiones atmosféricas, a partir de la combustión del diésel en los motores de la maquinaria y las volquetas, en la ejecución de este.

7.9.3 Análisis de las emisiones atmosféricas emitidas

En la tabla 38, se muestran todos los compuestos que se emitieron a la atmósfera, por cuenta de la combustión del diésel en los 3 proyectos de mejoramiento vial, resaltando que se emitieron 1.621,75 toneladas métricas de CO₂ de origen fósil, que comparados con el dato que refiere el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, frente a lo que un colombiano emite al

año 1,6 toneladas de CO₂, los tres proyectos, emitieron lo que generarían 1,013 colombianos en un año (Minambiente, 2022a).

COMPUESTO	UNIDAD	MÁLAGA	RIONEGRO	SAN VICENTE DE CHUCURÍ	TOTAL
CARBON DIOXIDE, FOSSIL	Mtn	49,05	995,11	577,59	166,73
CARBON DIOXIDE, LAND TRANSFORMATION	Kton	4,61	92,79	53,58	731,96
CHLOROFORM	Kg	20,50	407,68	233,79	61,55
DINITROGEN MONOXIDE	Kton	1,69	34,23	19,87	1.489,54
ETHANE, 1,1-DIFLUORO-, HFC-152A	Kg	40,97	828,63	480,05	46,66
ETHANE, 1,1,1-TRICHLORO-, HCFC-140	Kg	1,29	25,96	15,03	36,54
ETHANE, 1,1,1,2-TETRAFLUORO-, HFC-134A	Tn.lg	1,36	20,80	9,74	44,09
ETHANE, 1,1,2-TRICHLORO-1,2,2-TRIFLUORO-, CFC-113	Kg	1,32	24,67	13,59	1.701,50
ETHANE, 1,2-DICHLORO-1,1,2,2-TETRAFLUORO-, CFC-114	Kg	47,32	947,24	545,34	44,07
ETHANE, 2-CHLORO-1,1,1,2-TETRAFLUORO-, HCFC-124	Kg	1,32	24,66	13,59	356,29
ETHANE, HEXAFLUORO-, HFC-116	Kg	10,73	199,45	109,48	4.165,06
HYDROCARBONS, CHLORINATED	Kg	266,47	5,16	2.983,49	322,75
METHANE	Kg	8,90	179,58	103,87	5.865,29
METHANE, BIOGENIC	Tn.lg	161,96	3.263,71	1.886,61	1.052,38
METHANE, BROMO-, HALON 1001	mg	28,92	585,41	339,29	469,89
METHANE, BROMOCHLORODIFLUORO-, HALON 1211	Kg	12,90	261,37	151,56	4.251,78
METHANE, BROMOTRIFLUORO-, HALON 1301	Kg	262,32	5,24	3.088,59	32,21
METHANE, CHLORODIFLUORO-, HCFC-22	Tn.lg	0,89	17,92	10,38	694,62
METHANE, DICHLORO-, HCC-30	Kg	19,15	386,47	223,63	236,80
METHANE, DICHLORODIFLUORO-, CFC-12	Kg	6,66	131,93	75,46	323,66
METHANE, DICHLOROFLUORO-, HCFC-21	g	9,14	180,37	102,95	2.201,35
METHANE, FOSSIL	Kton	60,40	1.224,41	710,30	1.235,74
METHANE, MONOCHLORO-, R-40	Kg	34,04	687,51	397,96	306,86
METHANE, TETRACHLORO-, CFC-10	Kg	8,56	170,87	98,18	2.593,15
METHANE, TETRAFLUORO-, CFC-14	Kg	78,06	1.451,61	796,86	525,44
METHANE, TRICHLOROFLUORO-, CFC-11	G	14,83	292,82	167,14	102,98
METHANE, TRIFLUORO-, HFC-23	Kg	2,91	57,39	32,76	5.231,71
NITROGEN FLUORIDE	mg	146,93	2.914,46	1.668,60	4.593,75
SULFUR HEXAFLUORIDE	Kg	285,09	5,66	3.329,61	166,73

Tabla 38. Compuestos emitidos a la atmósfera por la ejecución de los tres proyectos de mejoramiento vial.

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, si se observa la sumatoria de las emisiones del hexafloruro de azufre, que son 3,62 toneladas de este compuesto, y se considera la referencia del Área Metropolitana del Valle de Aburra, que reportó para el 2013, que en la zona metropolitana de la capital antioqueña, se emitieron 37 toneladas métricas de compuestos SO_x, es decir, que los tres proyectos aportarían casi el 10% de las emisiones de SO_x de las emisiones que se refieren para el Valle de Aburrá, y debe tenerse en cuenta que las condiciones orográficas del Valle de Aburra, pueden permitir una acumulación de los contaminantes por largo tiempo.

Y, por último, en el reporte de compuestos emitidos a la atmósfera, se incluye algunas variaciones de compuestos hidroclorofluorocarbonados HCFC, tales como el metano diclorodifloruro, el metano diclorofloruro, el metano tetracloruro, el metano tetrafloruro, metano triclorofloruro y el metano trifloruro, que son gases que agotan la capa de ozono directamente, y por ende, afectan el cambio climático. Estos compuestos HCFC, suman en total 2,91 toneladas métricas, un dato que al parecer no dice mucho, pero si se compara con lo informado por ANRACI, que es el gremio colombiano de la protección contra incendios, el Ministerio de Medio Ambiente, y el PNUD Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, en su asociación en pro de la implementación del Protocolo de Montreal en Colombia, para el año 2019, el sector de los equipos de extinción de incendios, generó emisiones de estos compuestos en una cuantía de 1,124 toneladas (ANRACI et al., 2020). Comparando con el ejercicio que se realizó para los mejoramientos viales, estos tres proyectos generaron comparativamente el 0,00259% de las emisiones de la industria de la extinción de incendios en un año.

7.9.4 Análisis de las categorías de impacto ambiental por tramo ejecutado

A continuación, se muestra una tabla más detallada, donde se incluyen las variables técnicas de los proyectos, que son, la altitud sobre el nivel del mar, la pendiente y el espesor de la excavación:

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPESOR DE LA EXCAVACIÓN (cm)	CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA (DALY)	AGOTAMIENTO DE OZONO (DALY)	TOXICIDAD HUMANA (DALY)	FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS (DALY)	FORMACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (DALY)	RADIACIÓN IONIZANTE (DALY)	CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS (SPECIES.YR)	ACIDIFICACIÓN TERRESTRE (SPECIES.YR)	EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE (SPECIES.YR)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	174.738,41	8,80	61.108,69	27,26	51.808,76	48,41	930,93	6,66	0,07
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	291.112,95	14,66	101.810,49	45,41	86.312,35	80,65	1.550,92	11,10	0,12
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	305.493,04	15,38	106.839,62	47,66	90.575,92	84,63	1.627,53	11,65	0,13
RIONEGR0	TRAMO 1	22,45	921	30	341.416,12	17,18	118.390,16	53,36	101.403,85	94,33	1.818,91	13,04	0,15
	TRAMO 2	19,53	919	30	821.747,28	41,35	284.950,79	128,42	244.066,80	227,05	4.377,90	31,39	0,35
	TRAMO 3	16,84	959	30	276.229,70	13,90	95.975,98	43,15	82.009,65	76,37	1.471,63	10,55	0,12
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	620.737,97	31,24	215.540,98	96,98	184.313,96	171,58	3.307,01	23,71	0,26
	TRAMO 5	15,20	925	30	239.831,88	12,07	83.277,65	37,47	71.212,60	66,29	1.277,72	9,16	0,10
	TRAMO 6	11,04	881	30	450.136,31	22,65	156.364,77	70,32	133.646,78	124,44	2.398,12	17,19	0,19
	TRAMO 7	13,95	817	30	400.222,18	20,14	139.026,00	62,52	118.827,13	110,64	2.132,20	15,28	0,17
	TRAMO 8	11,75	850	30	394.864,22	19,87	137.164,79	61,69	117.236,34	109,16	2.103,66	15,08	0,17
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	257.420,67	12,95	88.940,41	40,26	76.512,93	71,05	1.371,42	9,84	0,11
	TRAMO 2	10,37	148	35	139.115,98	7,00	48.065,42	21,76	41.349,32	38,39	741,15	5,32	0,06
	TRAMO 3	10,61	146	60	300.378,70	15,11	103.814,78	46,97	89.275,69	82,91	1.600,28	11,48	0,13
	TRAMO 4	7,57	157	60	271.154,26	13,64	93.706,16	42,41	80.591,33	74,84	1.444,59	10,36	0,12
	TRAMO 5	9,00	141	35	149.078,42	7,50	51.518,89	23,31	44.308,46	41,15	794,22	5,70	0,06
	TRAMO 6	7,96	197	35	255.010,37	12,83	88.106,17	39,88	75.796,77	70,38	1.358,58	9,75	0,11
	TRAMO 7	16,24	218	35	206.684,41	10,40	71.459,65	32,32	61.424,08	57,06	1.101,12	7,90	0,09
	TRAMO 8	12,83	229	35	239.232,40	12,04	82.718,81	37,41	71.095,90	66,04	1.274,52	9,14	0,10
	TRAMO 9	12,14	501	35	239.631,79	12,06	82.836,79	37,47	71.218,11	66,15	1.276,65	9,16	0,10
TOTAL					6.374.237,06	320,76	2.211.616,99	996,03	1.892.986,71	1.761,52	33.959,04	243,47	2,72

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPESOR DE LA EXCAVACIÓN (cm)	ECOTOXICIDAD TERRESTRE (SPECIES.YR)	ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE (SPECIES.YR)	ECOTOXICIDAD MARINA (SPECIES.YR)	OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS (SPECIES.YR)	OCUPACIÓN DE SUELO URBANO (SPECIES.YR)	TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL (SPECIES.YR)	AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO (\$)	AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL (\$)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	2,35	0,06	14,44	1,07	2,41	85,07	133.597.530,82	2.825.893.437,11
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	3,91	0,10	24,06	1,79	4,02	141,74	222.575.196,29	4.707.926.224,92
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	4,11	0,10	25,25	1,88	4,22	148,74	233.569.727,39	4.940.483.320,98
RIONEGR0	TRAMO 1	22,45	921	30	4,54	0,11	27,97	2,00	3,95	160,40	260.334.210,05	5.519.377.479,99
	TRAMO 2	19,53	919	30	10,93	0,27	67,32	4,80	9,50	386,07	626.592.941,31	13.284.473.710,78
	TRAMO 3	16,84	959	30	3,68	0,09	22,68	1,63	3,34	130,87	210.760.246,60	4.465.951.802,57
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	8,27	0,20	50,92	3,66	7,40	293,32	473.523.289,08	10.035.526.078,48
	TRAMO 5	15,20	925	30	3,20	0,08	19,67	1,41	2,86	113,33	182.953.171,67	3.877.383.367,91
	TRAMO 6	11,04	881	30	6,00	0,15	36,94	2,66	5,41	213,06	343.424.834,57	7.277.520.640,30
	TRAMO 7	13,95	817	30	5,34	0,13	32,85	2,36	4,81	189,44	305.343.587,79	6.470.540.388,59
	TRAMO 8	11,75	850	30	5,26	0,13	32,41	2,33	4,75	186,90	301.255.816,21	6.383.916.361,90
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	3,41	0,08	21,01	1,47	2,73	119,08	196.062.777,61	4.160.838.645,21
	TRAMO 2	10,37	148	35	1,84	0,05	11,35	0,80	1,47	64,35	105.956.776,39	2.248.611.670,71
	TRAMO 3	10,61	146	60	3,98	0,10	24,52	1,72	3,21	139,14	228.803.710,60	4.855.259.249,76
	TRAMO 4	7,57	157	60	3,59	0,09	22,13	1,55	2,89	125,55	206.537.214,21	4.382.864.694,23
	TRAMO 5	9,00	141	35	1,98	0,05	12,17	0,85	1,59	69,03	13.552.489,62	2.409.663.554,34
	TRAMO 6	7,96	197	35	3,38	0,08	20,81	1,46	2,70	117,96	194.225.974,25	4.121.876.549,77
	TRAMO 7	16,24	218	35	2,74	0,07	16,88	1,19	2,23	95,89	157.453.703,70	3.340.858.713,08
	TRAMO 8	12,83	229	35	3,17	0,08	19,54	1,37	2,58	111,03	182.253.106,68	3.866.978.294,75
	TRAMO 9	12,14	501	35	3,18	0,08	19,57	1,38	2,57	111,10	182.543.441,00	3.873.393.127,54
TOTAL					84,86	2,10	522,48	37,39	74,64	3.002,06	4.861.319.745,84	103.049.337.312,92

Tabla 39. Impactos ambientales generados por cada tramo intervenido.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 39, se observan los impactos ambientales generados en cada uno de los tramos, donde se resaltan en color rojo los datos más bajos por cada columna y en verde los más altos, y donde la máxima generación de impactos se obtuvo en el tramo 2 del proyecto de Rionegro, en el cual se presentó un espesor de excavación menor, pero una de las pendientes y altitudes más altas, por lo que se puede asumir, y teniendo en cuenta las inclemencias del clima dentro del proyecto de Rionegro, que esta incidencia de la pendiente y de la altura, son directamente proporcional a la generación de impactos, puesto que vemos en una situación similar a los tramos 4 y 6 del mismo proyecto. Y adicionalmente, se confirma lo dicho en el párrafo anterior, al observar la tendencia de los tramos que menos valor tienen en los impactos ambientales generados, como se refleja en el tramo 2, 5 y 7 del proyecto de San Vicente de Chucurí.

Ahora bien, en el tramo 3 del proyecto de San Vicente de Chucurí, tiene la notoriedad de que posee una de las excavaciones más altas con 60 centímetros de espesor, pero sus impactos no son muy altos, y esto es debido a que la diferencia de horas de trabajo para 30 o 60 centímetros de espesor no son relevantes en el impacto ambiental, y como ya se había referido, dentro del consumo de combustible en estos proyectos, las volquetas superan por mucho a la maquinaria toda en conjunto en el consumo de combustible y por ende en los impactos ambientales.

7.9.5 Análisis del daño generado por el cambio climático por tramo ejecutado

En la tabla a continuación, se muestra en detalle, la comparación de las variables técnicas de los proyectos, comparadas con los datos entregados del daño ambiental en la salud humana, los ecosistemas y los recursos

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPESOR DE LA EXCAVACIÓN (cm)	SALUD HUMANA (GPt)	ECOSISTEMAS (GPt)	RECURSOS (GPt)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	3,57	0,21	2,41
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	5,94	0,35	4,02
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	6,23	0,37	4,22
RIONEGRO	TRAMO 1	22,45	921	30	6,96	0,41	4,72
	TRAMO 2	19,53	919	30	16,74	0,99	11,35
	TRAMO 3	16,84	959	30	5,63	0,33	3,82
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	12,65	0,74	8,58
	TRAMO 5	15,20	925	30	4,89	0,29	3,31
	TRAMO 6	11,04	881	30	9,17	0,54	6,22
	TRAMO 7	13,95	817	30	8,16	0,48	5,53
	TRAMO 8	11,75	850	30	8,05	0,47	5,46
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	5,24	0,31	3,56
	TRAMO 2	10,37	148	35	2,83	0,17	1,92
	TRAMO 3	10,61	146	60	6,12	0,36	4,15
	TRAMO 4	7,57	157	60	5,52	0,32	3,74
	TRAMO 5	9,00	141	35	3,04	0,18	2,06
	TRAMO 6	7,96	197	35	5,19	0,31	3,52
	TRAMO 7	16,24	218	35	4,21	0,25	2,85
	TRAMO 8	12,83	229	35	4,87	0,29	3,30
	TRAMO 9	12,14	501	35	4,88	0,29	3,31
TOTAL					129,87	7,64	88,06

Tabla 40. Daños por el cambio climático generados por cada tramo intervenido.

Fuente: Elaboración propia

Nuevamente, como se reflejó en la tabla 39, los tramos 2 de los proyectos de Rionegro y San Vicente de Chucurí, son los extremos alto y bajo respectivamente de la magnificación de los daños a la salud humana, a los ecosistemas y a los recursos, por cuenta del impacto ambiental del cambio climático. Sin embargo, si se deja a un lado el tramo 2, que fue el más impactante, pero que a su vez fue el que más recursos requirió, y se observa con detalle el tramo 1 del proyecto de Rionegro, se observa que este es el tramo con la altitud más elevada y su pendiente está por encima de la media, y por esto, este tramo daría más certeza a la afirmación que entre más

elevada este ubicada la intervención y el tramo tenga una pendiente más inclinada, los impactos y los daños ser más cuantiosos.

7.9.6 Análisis de las emisiones generadas por tramo ejecutado

A continuación, se muestra el comportamiento de los diversos compuestos emitidos a la atmósfera, dependiendo del tramo, la altitud, la pendiente y el espesor de la excavación:

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPEJOR DE LA EXCAVACION (cm)	CARBON DIOXIDE, FOSSIL (Mtm)	CARBON DIOXIDE, LAND TRANSFORMATION (Kton)	CHLOROFORM (Kg)	DINITROGEN MONOXIDE (Kton)	ETHANE, 1,1-DIFLUORO-, HFC-152A (Kg)	ETHANE, 1,1,1-TRICHLORO-, HCFC-140 (Kg)	ETHANE, 1,1,1,2-TETRAFLUORO-, HFC-134A (Tn.lg)	ETHANE, 1,1,2-TRICHLORO-1,2,2-TRIFLUORO-, CFC-113 (Kg)	ETHANE, 1,2-DICHLORO-1,1,2,2-TETRAFLUORO-, CFC-114 (Kg)	ETHANE, 2-CHLORO-1,1,2-TETRAFLUORO-, HCFC-124 (Kg)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	49	4,61	20,50	1,69	40,97	1,29	1,36	1,32	47,32	1,32
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	82	7,69	34,15	2,81	68,26	2,14	2,27	2,20	78,85	2,20
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	86	8,07	35,84	2,95	71,63	2,25	2,38	2,31	82,74	2,31
RIONEGRO	TRAMO 1	22,45	921	30	96	8,92	39,14	3,30	79,76	2,50	1,91	2,35	91,04	2,34
	TRAMO 2	19,53	919	30	231	21,48	94,21	7,94	191,98	6,01	4,59	5,65	219,12	5,64
	TRAMO 3	16,84	959	30	78	7,24	31,84	2,67	64,59	2,02	1,68	1,94	73,93	1,94
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	174	16,25	71,43	5,99	145,10	4,55	3,68	4,33	165,93	4,33
	TRAMO 5	15,20	925	30	67	6,28	27,60	2,32	56,06	1,76	1,42	1,67	64,11	1,67
	TRAMO 6	11,04	881	30	126	11,79	51,86	4,35	105,24	3,30	2,72	3,16	120,42	3,16
	TRAMO 7	13,95	817	30	112	10,48	46,11	3,86	93,57	2,93	2,42	2,81	107,07	2,81
	TRAMO 8	11,75	850	30	111	10,34	45,49	3,81	92,32	2,89	2,38	2,77	105,63	2,77
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	72	6,70	29,22	2,49	60,05	1,88	1,20	1,69	68,18	1,69
	TRAMO 2	10,37	148	35	39	3,62	15,79	1,34	32,45	1,02	0,65	0,92	36,85	0,92
	TRAMO 3	10,61	146	60	84	7,82	34,13	2,90	70,08	2,19	1,42	1,98	79,61	1,98
	TRAMO 4	7,57	157	60	76	7,06	30,80	2,62	63,26	1,98	1,28	1,79	71,85	1,79
	TRAMO 5	9,00	141	35	42	3,88	16,93	1,44	34,78	1,09	0,70	0,98	39,50	0,98
	TRAMO 6	7,96	197	35	72	6,64	28,95	2,46	59,48	1,86	1,19	1,68	67,54	1,68
	TRAMO 7	16,24	218	35	58	5,38	23,51	2,00	48,23	1,51	1,00	1,37	54,81	1,37
	TRAMO 8	12,83	229	35	67	6,23	27,21	2,31	55,82	1,75	1,16	1,59	63,45	1,59
	TRAMO 9	12,14	501	35	67	6,24	27,24	2,31	55,91	1,75	1,15	1,59	63,53	1,59
TOTAL					166,73	731,96	731,96	61,55	1.489,54	46,66	36,54	44,09	1.701,50	44,07

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPEJOR DE LA EXCAVACION (cm)	ETHANE, HEXAFLUORO-, HFC-116 (Kg)	HYDROCARBONS, CHLORINATED (Kg)	METHANE (Kg)	METHANE, BIOGENIC (Tn.lg)	METHANE, BROMO-, HALON 1001 (mg)	METHANE, BROMOCHLORODIFLUORO-, HALON 1211	METHANE, BROMOTRIFLUORO-, HALON 1301 (Kg)	METHANE, CHLORODIFLUORO-, HCFC-22 (Tn.lg)	METHANE, DICHLORO-, HCC-30 (Kg)	METHANE, DICHLORODIFLUORO-, CFC-12 (Kg)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	10,73	266,47	8,90	161,96	28,92	12,90	262,32	0,89	19,15	6,66
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	17,88	444,00	14,83	269,84	48,19	21,50	437,02	1,48	31,90	11,10
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	18,76	465,94	15,56	83,17	50,57	22,56	458,61	1,55	33,47	11,65
RIONEGRO	TRAMO 1	22,45	921	30	18,95	0,49	17,28	313,99	56,36	25,17	0,50	1,72	37,19	12,66
	TRAMO 2	19,53	919	30	45,61	1,19	41,59	755,73	135,64	60,57	1,21	4,15	89,51	30,47
	TRAMO 3	16,84	959	30	15,71	0,40	14,00	254,50	45,63	20,37	0,41	1,40	30,13	10,31
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	35,03	0,90	31,45	571,59	102,51	45,77	0,92	3,14	67,68	23,12
	TRAMO 5	15,20	925	30	13,54	0,35	12,15	220,84	39,61	17,68	0,35	1,21	26,15	8,93
	TRAMO 6	11,04	881	30	25,53	0,66	22,81	414,65	74,35	33,19	0,67	2,28	49,09	16,79
	TRAMO 7	13,95	817	30	22,70	0,58	20,28	368,67	66,10	29,51	0,59	2,02	43,65	14,93
	TRAMO 8	11,75	850	30	22,39	0,58	20,01	363,73	65,22	29,12	0,58	2,00	43,06	14,73
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	13,64	372,74	12,99	235,95	42,44	18,96	386,38	1,30	27,97	9,43
	TRAMO 2	10,37	148	35	7,37	201,44	7,02	127,51	22,94	10,25	208,81	0,70	15,12	5,10
	TRAMO 3	10,61	146	60	15,98	435,53	15,16	275,40	49,53	22,12	450,86	1,51	32,64	11,02
	TRAMO 4	7,57	157	60	14,41	393,01	13,69	248,59	44,71	19,97	407,00	1,37	29,47	9,94
	TRAMO 5	9,00	141	35	7,92	216,07	7,53	136,67	24,58	10,98	223,76	0,75	16,20	5,47
	TRAMO 6	7,96	197	35	13,51	369,22	12,87	233,74	42,04	18,78	382,77	1,29	27,71	9,34
	TRAMO 7	16,24	218	35	11,05	300,17	10,44	189,56	34,08	15,22	310,23	1,04	22,47	7,59
	TRAMO 8	12,83	229	35	12,80	347,55	12,08	219,43	39,45	17,62	359,09	1,21	26,01	8,79
	TRAMO 9	12,14	501	35	12,78	347,76	12,10	219,75	39,52	17,65	359,68	1,21	26,05	8,79
TOTAL					166,73	731,96	731,96	61,55	356,29	4.165,06	322,75	5.865,29	1.052,38	469,89

PROYECTO	TRAMO	PENDIENTE (%)	ALTURA (msnm)	ESPEJOR DE LA EXCAVACIÓN (cm)	METHANE, DICHLOROFLUORO-, HCFC-21 (g)	METHANE, FOSSIL (Kton)	METHANE, MONOCHLORO-, R-40 (Kg)	METHANE, TETRACHLORO-, CFC-10 (Kg)	METHANE, TETRAFLUORO-, CFC-14 (Kg)	METHANE, TRICHLOROFLUORO-, CFC-11 (G)	METHANE, TRIFLUORO-, HFC-23 (Kg)	NITROGEN FLUORIDE (mg)	SULFUR HEXAFLUORIDE (Kg)
MÁLAGA	TRAMO 1	14,66	3.073	35	9,14	60,40	34,04	8,56	78,06	14,83	2,91	146,93	285,09
	TRAMO 2	17,02	1.699	35	15,22	100,63	56,72	14,27	130,10	24,72	4,84	244,81	474,96
	TRAMO 3	8,77	1.629	35	15,98	105,60	59,52	14,97	136,52	25,94	5,08	256,90	498,43
RIONEGRO	TRAMO 1	22,45	921	30	17,30	117,90	66,16	16,41	137,91	28,08	5,50	279,72	0,54
	TRAMO 2	19,53	919	30	41,63	283,77	159,25	39,51	331,92	67,59	13,25	673,26	1,31
	TRAMO 3	16,84	959	30	14,10	95,41	53,60	13,34	114,33	22,89	4,49	227,70	0,44
	TRAMO 4	7,82	1.050	30	31,61	214,39	120,40	29,94	254,97	51,32	10,06	510,71	0,99
	TRAMO 5	15,20	925	30	12,21	82,83	46,52	11,57	98,51	19,83	3,89	197,32	0,38
	TRAMO 6	11,04	881	30	22,96	155,48	87,33	21,73	185,80	37,27	7,30	370,80	0,72
	TRAMO 7	13,95	817	30	20,41	138,24	77,65	19,32	165,20	33,14	6,49	329,68	0,64
	TRAMO 8	11,75	850	30	20,14	136,39	76,61	19,06	162,98	32,69	6,41	325,27	0,63
SAN VICENTE DE CHUCURI	TRAMO 1	8,83	501	35	12,86	88,86	49,78	12,27	99,29	20,89	4,09	208,55	416,45
	TRAMO 2	10,37	148	35	6,95	48,02	26,90	6,63	53,66	11,29	2,21	112,70	225,06
	TRAMO 3	10,61	146	60	15,03	103,69	58,09	14,33	116,33	24,40	4,78	243,58	486,05
	TRAMO 4	7,57	157	60	13,56	93,60	52,44	12,94	104,89	22,02	4,32	219,82	438,73
	TRAMO 5	9,00	141	35	7,46	51,46	28,83	7,11	57,67	12,11	2,37	120,86	241,21
	TRAMO 6	7,96	197	35	12,74	88,02	49,31	12,16	98,34	20,69	4,05	206,58	412,54
	TRAMO 7	16,24	218	35	10,36	71,35	39,98	9,87	80,43	16,81	3,30	167,80	334,53
	TRAMO 8	12,83	229	35	11,99	82,58	46,28	11,43	93,19	19,47	3,82	194,27	387,23
	TRAMO 9	12,14	501	35	12,00	82,72	46,35	11,44	93,05	19,48	3,82	194,44	387,81
TOTAL					166,73	731,96	731,96	61,55	323,66	2.201,35	1.235,74	306,86	2.593,15

Tabla 41. Emisiones generadas en cada uno de los tramos.

Fuente: Elaboración propia

En este análisis independiente por tramo, y comparativo con cada una de las variables de índole técnico que se postularon al inicio del trabajo, se confirma que los tramos con una menor altitud y menor pendiente de trazado, tienen una menor generación de emisiones, y viceversa. Claro esta, que se debe tener una referencia especial, sobre todo en el tramo 2 del proyecto de Rionegro, ya que fue el que ms generó impactos, daños y emisiones, pero a su vez tuvo mayor inclemencia del clima y efecto de los riesgos analizados en el capítulo 7.6.

Por tal razón se entendería mejor como un tramo con un máximo impacto ambiental, refiriendo al cambio climático y emisión de contaminantes, el tramo 1 de Málaga, el cual tuvo altos sus niveles de pendientes y altitud sobre el mar, pero que no padeció los riesgos implícitos en las labores constructivas, un escenario más ideal.

7.9.7 Determinación de los rangos de máximos y mínimos de emisiones, daños e impactos

Dada toda la información anterior, se establecen los siguientes rangos de máximos y mínimos de impactos ambientales, daños a causa del cambio climático y emisiones atmosféricas, en el mejoramiento de un kilómetro de vía terciaria en Colombia:

ÍTEM	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
CONDICIONES TÉCNICAS			
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	msnm	693,00	3.050,00
PENDIENTE	%	10,62	14,82
ESPEJOR DE LA EXCAVACIÓN	cm	30,00	40,50
IMPACTOS AMBIENTALES			
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LA SALUD HUMANA	DALY	771.344,40	3.545.185,66
AGOTAMIENTO DE OZONO	DALY	38,83	178,40
TOXICIDAD HUMANA	DALY	269.758,80	1.230.691,12
FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS	DALY	120,33	553,91
FORMACIÓN DE MATERIAL PARTÍCULADO	DALY	228.697,02	1.052.717,09
RADIACIÓN IONIZANTE	DALY	213,68	979,87
CAMBIO CLIMÁTICO AFECTANDO LOS ECOSISTEMAS	SPECIES.YR	4.109,37	18.887,14

ÍTEM	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
ACIDIFICACIÓN TERRESTRE	SPECIES.YR	29,42	135,40
EUTROFICACIÓN DEL AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,33	1,51
ECOTOXICIDAD TERRESTRE	SPECIES.YR	10,37	47,23
ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	SPECIES.YR	0,26	1,17
ECOTOXICIDAD MARINA	SPECIES.YR	63,75	290,75
OCUPACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS	SPECIES.YR	4,74	20,86
OCUPACIÓN DE SUELO URBANO	SPECIES.YR	10,66	42,00
TRANSFORMACIÓN DEL SUELO NATURAL	SPECIES.YR	375,55	1.673,39
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE TIPO METÁLICO	\$	589.742.454,50	2.704.188.097,29
AGOTAMIENTO DE MATERIALES DE ORIGEN FÓSIL	\$	12.474.302.983,01	57.314.689.830,53
IMPACTOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO			
SALUD HUMANA	Gpt	15,74	72,24
ECOSISTEMAS	Gpt	0,93	4,25
RECURSOS	Gpt	10,66	48,98
EMISIONES ATMOSFÉRICAS			
CARBON DIOXIDE, FOSSIL	Mtn	49,05	995,11
CARBON DIOXIDE, LAND TRANSFORMATION	Kton	4,61	92,79
CHLOROFORM	Kg	20,50	407,68
DINITROGEN MONOXIDE	Kton	1,69	34,23
ETHANE, 1,1-DIFLUORO-, HFC-152A	Kg	40,97	828,63
ETHANE, 1,1,1-TRICHLORO-, HCFC-140	Kg	1,29	25,96
ETHANE, 1,1,1,2-TETRAFLUORO-, HFC-134A	Tn.lg	1,36	20,80
ETHANE, 1,1,2-TRICHLORO-1,2,2-TRIFLUORO-, CFC-113	Kg	1,32	24,67
ETHANE, 1,2-DICHLORO-1,1,2,2-TETRAFLUORO-, CFC-114	Kg	47,32	947,24
ETHANE, 2-CHLORO-1,1,1,2-TETRAFLUORO-, HCFC-124	Kg	1,32	24,66
ETHANE, HEXAFLUORO-, HFC-116	Kg	10,73	199,45
HYDROCARBONS, CHLORINATED	Kg	5,16	2.983,49
METHANE	Kg	8,90	179,58
METHANE, BIOGENIC	Tn.lg	161,96	3.263,71
METHANE, BROMO-, HALON 1001	mg	28,92	585,41
METHANE, BROMOCHLORODIFLUORO-, HALON 1211	Kg	12,90	261,37
METHANE, BROMOTRIFLUORO-, HALON 1301	Kg	5,24	3.088,59
METHANE, CHLORODIFLUORO-, HCFC-22	Tn.lg	0,89	17,92
METHANE, DICHLORO-, HCC-30	Kg	19,15	386,47
METHANE, DICHLORODIFLUORO-, CFC-12	Kg	6,66	131,93
METHANE, DICHLOROFLUORO-, HCFC-21	g	9,14	180,37
METHANE, FOSSIL	Kton	60,40	1.224,41
METHANE, MONOCHLORO-, R-40	Kg	34,04	687,51

ÍTEM	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO
METHANE, TETRACHLORO-, CFC-10	Kg	8,56	170,87
METHANE, TETRAFLUORO-, CFC-14	Kg	78,06	1.451,61
METHANE, TRICHLOROFLUORO-, CFC-11	G	14,83	292,82
METHANE, TRIFLUORO-, HFC-23	Kg	2,91	57,39
NITROGEN FLUORIDE	mg	146,93	2.914,46
SULFUR HEXAFLUORIDE	Kg	5,66	3.329,61

Tabla 42. Rangos calculados de impactos, daños y emisiones en los mejoramientos de un kilómetro de vía terciaria en Colombia .

Fuente: Elaboración propia

8. Recomendaciones

Con lo observado en los resultados del análisis de ciclo de vida realizado para el diésel consumido por maquinaria y volquetas de tres proyectos de mejoramiento de vías terciarias en Colombia, en el cual, el nivel de contaminación es alto y puntual, debido a que se afecta ecosistemas del entorno rural, susceptibles a su deterioro por estos cambio en las condiciones de calidad del aire, se recomienda principalmente, el cambio de la motorización a una que tenga una fuente de generación más limpia y con menos emisiones, la cual puede ser la motorización eléctrica.

En el país, se inicia la promoción del cambio de motorización con la Ley 1964 de 2019, la cual uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones, obviamente habla solo de motorización vehicular, pero es el inicio para que se puedan generar más normas que promuevan el uso de maquinaria eléctrica en el país. Con esta ley, la Alcaldía Mayor de Bogotá, sustentó el proceso licitatorio de la compra de 1.845 unidades de buses eléctricos para el uso en el Sistema Integrado de Transporte SITP (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Estas inversiones en eficiencia energética, como la que realizó el ente territorial en sus buses de transporte urbano, gozan de ciertos beneficios tributarios, que cualquier particular puede acceder, tales como la exclusión del IVA y deducción de la renta líquida según el Estatuto Tributario, el cual menciona que puede deducirse hasta el 20% de la renta líquida el contribuyente (Ministry of Mines and Energy, 2016).

Además de esta transición de motores, también está asociado a la transformación en la generación de la energía eléctrica, ya que sabemos que este tipo de energización tiene sus impactos ambientales asociados, ya que las hidroeléctricas ocupan el 70% de la generación de energía en el país, y generando una modificación en los regímenes hidrológicos de los cauces

que se utilizan para esta industria, además de disminución de la flora y fauna, aumento de la eutroficación en aguas, entre otros impactos (Oviedo-Ocaña, 2018).

Sin embargo, la carrera por innovar en que la maquinaria de la construcción, está abierta. Caterpillar, el gigante mundial de la maquinaria, se encuentra desarrollando un prototipo de retroexcavadora en Gjellerasen, Noruega. Este prototipo, cuenta con un juego de baterías de 300 kWh, pero cuenta con un problema, su sobrepeso, ya que sería de 3,4 toneladas. Lo interesante es que estas baterías, dan una capacidad de 5 a 7 horas de trabajo y su recarga es en relación 1:1, es decir una hora de carga por una hora de trabajo (CAT, 2020).

Volvo, ya comercializa algunos modelos de maquinaria un cargador de llantas y una miniexcavadora de oruga, los cuales son de cero emisiones, carga total de sus baterías de 1 a 2 horas y una autonomía de trabajo de 8 horas continuas.(Volvo, 2021), y los británicos de JCB, han desarrollado la primera excavadora impulsada por hidrogeno, la cual también es cero emisiones, minimizando las emisiones de óxidos nitrosos en un 97% (JCB, 2020).

Las referencias previas evidencian los avances a nivel internacional, sin embargo, estas tecnologías que estan en desarrollo no han sido hasta el momento adoptadas por ninguna empresa de construcción para vías en nuestro país. Al entender que la tecnología es muy reciente, se abre un escenario tanto a nivel global como nacional, en relación con la evaluación de las afectaciones positivas y/o negativas de la adopción de estas tecnologías.

Las herramientas están modernizadas, el fomento a la transición energética también, pero para cumplir este proceso de modernización, las empresas pequeñas de construcción, que están a cargo de estas actividades de mejoramiento de vías terciarias, que son proyectos constructivos que tienen unos presupuestos menores, tengan el fomento o la obligación de utilizar herramientas con motores eléctricos, ya que como se demostró en este estudio, la utilización de

esta maquinaria vieja, genera aparte de los impactos ambientales, un impacto presupuestal muy grande.

Realizando un cálculo preliminar, el proyecto de Málaga, consumió en total 17.069 galones de diésel, y para el mes de noviembre de 2022 en la ciudad de Bogotá D.C., el precio del galón del diésel subió a \$9.302, siendo así que todo el combustible que consumió el proyecto costó \$158.782.357,13. Si el presupuesto total del proyecto, se calculó en la etapa de maduración del proyecto en \$920.439.457,00, el rubro del costo del combustible se gastó el 17% del presupuesto del proyecto. Esta es una cifra considerable, y a tener en cuenta para diversos actores, inicialmente para el contratista de obra, que podría tener un ahorro de esta índole en su proyecto, obviamente teniendo en cuenta los valores de la maquinaria y mantenimiento, pero siendo así es una cifra considerable y a tener en cuenta. Por otra parte, los entes territoriales, quienes son los que financian este tipo de proyectos, pueden minimizar el presupuesto desde la etapa de diseño del mismo, y con esto ampliar las longitudes de las intervenciones de los mejoramientos viales, o utilizar estos dineros en otras actividades que necesite la comunidad a la que prestan su servicio.

Por último en cuanto al tema de la transición energética, queda solo una inquietud para otra investigación, y es ¿Cómo se dotará de energía eléctrica una máquina que trabajará en una zona sin conexión eléctrica?, todo esto, debido a que los mejoramientos viales de vías terciarias se efectúan en las zonas rurales del país, y como lo menciona el informe de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas realizado por el Grupo de Investigación XUE, “el Sistema Interconectado Nacional, abarca aproximadamente un 34% del territorio nacional. En este, habita el 96% de la población del país, con una cobertura de 95,54%, con una cobertura a nivel urbano

de 99,35% y a nivel rural de 83,39%” (Flórez Espinosa, 2020), mostrando que no es posible conectar una maquina a la red eléctrica nacional de una manera sencilla.

Por otra parte, existe una alternativa de minimización de los impactos ambientales desde el diseño, ya que como se observó en el análisis de las estructuras de pavimento de los proyectos en estudio, algunos tramos necesitaron la excavación de hasta 60 centímetros de profundidad, lo cual va en contra de lo indicado por la Guía de Diseño de Pavimentos de Placa Huella, creada por el INVIAS, la cual menciona que estas estructuras no sobrepasen los 30 centímetros de espesor, donde se utilizan 15 centímetros en concreto y los otros en subbase (INVIAS, 2015).

Con estas variables, se puede utilizar elementos constructivos que minimicen el espesor de las excavaciones, elementos como las geoceldas, los cuales son un elemento de confinamiento muy similar a los paneles que crean las abejas para depositar allí su miel, pero en el caso de la constructivo, estas contendrán los materiales granulares necesarios para dar soporte a la vía.



Ilustración 109. Geoceldas utilizadas en la construcción de vías.

Fuente: (Syntex, 2022)

Las geoceldas pueden llegar a reducir hasta un 40% los espesores de las excavaciones en la construcción de vías, y teniendo este ahorro en la excavación, se tendrá una reducción proporcional en las horas de trabajo de la maquinaria de excavación, tendido y compactación de

materiales, adicionalmente, se reducen las cantidades de materiales necesarios para la estructura de pavimento, y con esto también, se reducen los viajes de las volquetas a los sitios de dispensación de materiales pétreos, sin hablar que también se reducirían los viajes a las escombreras por la minimización de residuos de excavación (Cañon Leguizamon, 2018). Claro esta, que este material tiene un origen en los hidrocarburos, y realizará un aporte a las diferentes categorías de impacto ambiental, pero estas tendrán que ser calculadas en otro estudio.

9. Conclusiones

Para realizar el análisis de ciclo de vida, se realizó una toma de datos en campo que tenía por objeto, conocer el consumo de diésel de las máquinas y volquetas que actuaron dentro de los proyectos de mejoramiento de vías terciarias en el Departamento de Santander. En esta toma de datos se obtuvo que, en las máquinas, los minicargadores fueron las herramientas más usadas dentro de todo el ejercicio constructivo con un 44% de las horas totales de uso. Por otra parte, la distancia que tenían que recorrer las volquetas, incidió directamente en el consumo del diésel en este equipo, debido a que recorrían a las escombreras distancias entre 23 a 76 kilómetros, y de 13 a 65 kilómetros a la cantera. Así mismo entonces se comportó el consumo del diésel de las volquetas, ya que este debía multiplicarse por la cantidad de viajes que realizaron y por el consumo por kilómetro de los vehículos, el cual rondaba entre los 5 y 7 galones por kilómetro. Los volúmenes de combustible a la final resultaban de la sumatoria de los consumos de la maquinaria con los de las volquetas, y mostró a la final que el proyecto que más utilizó el diésel fue el del municipio de Rionegro.

En el análisis de los impactos generados, se encontró que el transporte del diésel en los tres proyectos, estuvo entre el 0,847% y 0,172% de aporte al total de los impactos, mientras que la combustión del diésel en las máquinas y volquetas fue entre el 99,8% y el 99,2%. Esta utilización del diésel, por conocimiento previo, deduce que va a tener una afectación fuerte en el componente aire, por lo que se denota que el agotamiento de la capa de ozono, está entre los 33,82 y 178,40 DALY, pero la formación de material particulado se estableció entre 270 mil a 102 millones DALY, por kilómetro de mejoramiento de vía terciaria.

En el componente agua, la eutrofización de aguas dulces, se calculó entre 0,3 a 1,5 especies al año, mientras que la ecotoxicidad en los diferentes entornos acuáticos estuvo entre

los 75 a 240 especies al año. En cuanto a los materiales, se estimó que los materiales de tipo metálico, tendrán un agotamiento de más de 4 mil millones de dólares mientras que los de origen fósil, superan los 103 mil millones de dólares.

De acuerdo a todos los impactos mencionados, se encontró que, de los tres proyectos estudiados, el proyecto de Rionegro tuvo la mayor incidencia en ellos, debido a su alto consumo de materiales y cantidades de hora/trabajo de la maquinaria, que se reflejan en el alto consumo del diésel.

Similar fue el comportamiento en el daño generado por la categoría de impacto del cambio climático, la cual se estudió a profundidad para determinar las magnitudes en la afectación a la salud humana, en los ecosistemas y en los recursos. De acuerdo a esto, el proyecto de Rionegro fue el que más aportó a estos daños, con 72,24 GPt a la salud humana, 4,25 GPt a los ecosistemas y 48,98 GPt en los recursos.

En otro punto de la investigación, se realiza una comparación en cada uno de los tramos, con respecto a las variaciones técnicas y los impactos generados, por lo que se encontró que el tramo 2 del proyecto de Rionegro es el que mayor cuantifica en cada una de las categorías de impacto estudiada, mientras que el tramo 2 del proyecto de San Vicente de Chucurí, fue a su vez, el menor impactante, según la resultante dada por el software. Esta medida de máximos y mínimos, está también influenciada por las pendientes y las alturas sobre el nivel del mar, es decir, que a mayor pendiente y altura sobre el nivel del mar es mayor el impacto generado. No se puede decir lo mismo de la otra variable técnica que es el espesor de las excavaciones realizadas, ya que la diferencia entre el espesor mínimo y el máximo es de solo 30 centímetros, el cual no es relevante en cuanto a las cantidades de hora/trabajo realizadas por la maquinaria en la dinámica constructiva.

También se estableció un rango de máximos y mínimos de emisiones atmosféricas, que puedan servir de referencia, para determinar previamente o en etapa de diseño, las tasas de emisiones, así como los niveles de impacto ambiental y/o las magnitudes de los daños por cambio climático, por cada kilómetro de vía terciaria mejorado bajo el método de placa huella, teniendo como referencia, las pendientes de las zonas de trabajo, la altitud de los frentes de obra y el espesor de la excavación.

Y por último, se deja una recomendación de transición a la motorización eléctrica, con la que se reducen los impactos debidos al cambio climático, al minimizar la tasa de emisiones de contaminantes, pero con un interrogante, y es sobre, como se podrá dotar de energía eléctrica estos nuevos motores, a sabiendas de que las zonas de trabajo de esta maquinaria, no existe la disponibilidad inmediata de conexión a la red eléctrica nacional, así mismo, se recomienda la inclusión en las geoceldas en los diseños de placa huella, cuando esta necesite una excavación que sobrepase los 30 centímetros de excavación recomendados por el INVIAS para estas estructuras de pavimento, y con el ahorrar muchas horas de trabajo, cantidades de materiales y numero de viajes de volquetas.

Bibliografía

- Alarcón Hincapié, J. C. (2017). El cambio climático como factor transformador del territorio.
- Alcaldía Municipal de Málaga. (2021). Informe del componente social.
- Andrade Castañeda, H. J., Arteaga Céspedes, C. C., & Segura Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 103–112.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., Malley, C. S., Emberson, L., Franco, V., Klimont, Z., & Heyes, C. (2017). Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature*, 545(7655), 467–471. <https://doi.org/10.1038/NATURE22086>
- ANRACI, MINAMBIENTE, & PNUD. (2020). Protocolo de Montreal. Implementación en Colombia y normativa. [Www.Anraci.Org](http://www.Anraci.Org).
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). Actualización de Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018 (U. P. B. UPB, Ed.).
- Arguelles-Arguelles, A., Amezcua-Allieri, M. A., & Ramírez-Verduzco, L. F. (2021). Life Cycle Assessment of Green Diesel Production by Hydrodeoxygenation of Palm Oil. *Frontiers in Energy Research*, 0, 296. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.690725>
- Baez Gutiérrez, N. A. (2021). Estudio de suelos para la construcción de placa huellas de tres tramos de vía, localizados en la Vereda Tierra Blanca y en la Vereda San Luis, en el municipio de Málaga, departamento de Santander.

Cañón Leguizamón, S. M. (2018). Beneficios técnicos y económicos en el uso de geoceldas en estructura de pavimentos frente a los sistemas tradicionales. Universidad Católica (Vol. 2, Issue 1).

Cassidy Shell. (2022, March 18). Decarbonizing Off-Road Vehicles: An Emerging Challenge and Opportunity to Reach Net-Zero Emissions. Cleantech.Com.

CAT, P. (2020). Cat 323F Z-line. <https://www.pon-cat.com/no/pon-equipment/nyheter/nyhetsaker/z-line>

CCALC, C. del C. de A. L. y Caribe. (2021). Declaración para la Equidad en los Mercados de Carbono.

Constitución Política, (1991).

http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html

Comisión Intersectorial de Cambio Climático. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC).

Congreso. (2010). Ley 1383 de 2010.

Congreso de la Republica. (1994). Ley 164 de 1994.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, C. (2022). Proyecto edificaciones neto cero-carbono. Entregable 3: Priorización de acciones transformadoras a nivel nacional Preparado por Aliado implementador.

Departamento Nacional de Planeación. (2017). Construcción de puentes vehiculares para vías secundarias o terciarias. <https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/puentes/PTpuentes.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2018a). CONPES 3943 Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire.

Departamento Nacional de Planeación. (2018b). Plan nacional de desarrollo 2018-2022.

DNP. (2003). CONPES 3242.

DNP. (2011). CONPES 3700.

DNP. (2018). CONPES 3919. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Departamento de Planeación Nacional, 98.

DNV. (2021). Pathway to net zero emissions.

EcoInvent. (2021). Information on EcoInvent 3. <https://forum.ecoinvent.org/support/documents-and-files/information-on-ecoinvent-3/information-on-ecoinvent-3.html>

ECOPETROL. (2021). Especificación Técnica del Catálogo de Productos de Ecopetrol S.A.

Diésel Extra B2/B0. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/1da9f08e-727e-4364-baec-b40530342aee/diesel-extra-b2-b0.pdf?MOD=AJPERES&attachment=false&id=1626713155227>

Five Winds International. (2004). Gas to Liquids Life Cycle Assessment Synthesis Report.

Flórez Espinosa, F. (2020). Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. Matriz Energética En La Región Central, 117.

<https://regioncentralrape.gov.co/matriz-energetica/>

Francisco, G., Urrego, P., Pava Sánchez, J., Goyeneche, O., Subdirector, D., Dorado González, L., Collazos, C. E., Ángel, M., Ramos, V., Betancourt, J. P., Rueda, S. M., Santiago, K. Á., & Granados, P. (2022). Plan Nacional de Respuesta Segunda Temporada Lluvias (Issue 2).

García Rivera, Y. M. (2021). Informe resumen del proyecto.

Gobierno de Colombia. (2021). Circunstancias nacionales de Colombia - E2050 Colombia.

<https://e2050colombia.com/circunstancias-nacionales-de-colombia/>

Gómez, S. A. (2021). Diseño estructural. www.malaga-santander.gov.co

González Jaimes, D. A. (2021). Documento diagnóstico mejoramiento de la malla vial terciaria de las Veredas Campo Hermoso, El Ceibal, El Filón, Alto Viento, Agua Blanca, El Pertrecho y Santa Rosa del Municipio de San Vicente de Chucuri, Santander.

Hillege, L. (2022). Impact Categories (LCA) – Overview. Ecochain.
<https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/>

Hsu, D. D. (2005). Life Cycle Assessment of Gasoline and Diesel Produced via Fast Pyrolysis and Hydroprocessing. <http://www.osti.gov/bridge>

IAIA. (2009, October). What is IA? www.iaia.org/pdf/special-publications/What%20is%20IA_spa.pdf

IDEAM. (2001). Colombia : Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

IDEAM, P. M. D. CANCELLERÍA. (2017). Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC).
www.cambioclimatico.gov.co;

Intergovernmental Panel on Climate Change, I. (2018). Global Warming of 1.5°C.

INVIAS. (2015). Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-Huella. Ministerio de Transporte.

INVIAS. (2020). Política de Sostenibilidad para la infraestructura del transporte y se crea el Comité de Sostenibilidad del Instituto Nacional de Vías-INVIAS.

INVIAS. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras.

Jacobs Consultancy. (2012). EU Pathway Study: Life Cycle Assessment of Crude Oils in a European Context Life Cycle Associates.

JCB. (2020). JCB leads the way with first hydrogen fuelled excavator. <https://www.jcb.com/en-gb/news/2020/07/jcb-leads-the-way-with-first-hydrogen-fuelled-excavator>

Marshall, R., Arts, J., & Morrison-Saunders, A. (2005). International principles for best practice EIA follow-up. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 23(3), 175–181.

<https://doi.org/10.3152/147154605781765490>

Martínez González, A., Casas Leuro, O. M., Acero Reyes, J. R., & Castillo Monroy, E. F. (2011, July). Comparison of potential environmental impacts on the production and use of high and low sulfur regular diesel by life cycle assessment. *C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro*.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832011000200009

Minambiente. (1995a). Decreto 948 de 1995.

Minambiente. (1995b). Decreto 2107 de 1995.

https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto_2107_1995.htm

Minambiente. (2006). Decreto 979 de 2006. .

Minambiente. (2010a). Decreto 2811 de 1974. *Diario Oficial* N°34243, 1–50.

Minambiente. (2010b). Resolución 610 de 2010.

https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambientevt_0610_2010.htm

Minambiente. (2017a). Política Nacional de Cambio Climático. Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible (MADS).

Minambiente. (2017b). Resolución 2254 de 2017.

Minambiente. (2021, August 18). Colombia avanza en acciones y proyectos con enfoque

territorial para reducir emisiones. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/colombia-avanza-en-acciones-y-proyectos-con-enfoque-territorial-para-reducir-emisiones/>

- Minambiente. (2022a). En promedio, un colombiano emite al año 1,6 toneladas de CO₂ - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Noticias.
<https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico/en-promedio-un-colombiano-emite-al-ano-16-toneladas-de-co2/>
- Minambiente. (2022b). Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles de Uso Fuera de Carretera en Colombia.
- Minambiente. (2022c). Resolución 0762 de 2022 (762/2022). Art. 762/2022.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia. Ministerio de Minas y Energía, Colombia Banco Interamericano de Desarrollo, BID, 128.
- Ministry of Mines and Energy. (2016). Action Plan Indicative of Energy Efficiency 2017-2022. 157.
- Mooselu, M. G., Amiri, H., Azadi, S., & Liltved, H. (2022). Spatiotemporal assessment of surface water vulnerability to road construction. *Environment, Development and Sustainability*, 24(6), 7851–7873. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01763-9>
- Morgan, R. K. (2012). Environmental impact assessment: The state of the art. In *Impact Assessment and Project Appraisal* (Vol. 30, Issue 1, pp. 5–14).
<https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661557>
- Naciones Unidas. (2021). Global status report for buildings and construction.
www.globalabc.org.
- National Institute for Public Health and the Environment. (2017). ReCiPe 2016 v1.1.
www.rivm.nl/en

- Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., & H., R. H. (2004). 27 th Edition Machinery ' s Handbook. In New York.
- OMM. (2014). El Niño/Oscilación del Sur. Organización Meteorológica Mundial Tiempo-Clima-Agua, N°1145, 12.
- Orobio, A., & Orobio, J. C. (2016). Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D. DYNA (Colombia), 83(199), 9–18.
<https://doi.org/10.15446/DYNA.V83N199.55350>
- Oviedo-Ocaña, E. R. (2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud, 50(3), 191–192.
<https://doi.org/10.18273/revsal.v50n3-2018003>
- Pero, F. del, Delogu, M., & Pierini, M. (2018). Life Cycle Assessment in the automotive sector: A comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. Procedia Structural Integrity, 12, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>
- Pico, P. P. (2021). Informe Geotecnico.
- Postigo, J. C., Chacón, P., Geary, M., María, G. B., Fuenzalida, I., de La Cuadra, F., Lampis, A., Malvares Miguez, M., Palacio, G., Torres, J., & Castro, S. (2013). Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas: una vinculación necesaria.
<http://www.humanas.unal.edu.co/home/facultad/>
- Presidencia de la Republica. (2015). Decreto 1076 de 2015.
- Rincón, H. (2010). Precios de los combustibles e inflación. Borradores de Economía, 581.
- Rincón Suarez, A. A. (2021). Estudio Hidrológico e Hidráulico.
- Ruiz, S. A. (2021). Construyendo ciudades intermedias saludables en contexto de cambio climático en Latinoamérica.

- Salón Rangel, N. C. (2021). Informe de Levantamiento Topográfico.
- Schwab, K., & Zahidi, S. (2020). The Global Competitiveness Report How Countries are Performing on the Road to Recovery. www.weforum.org
- Secretaria de Ambiente. (2018). Inventario de Emisiones de Bogotá.
- Semana. (2019). Vías terciarias, un camino polvoriento y abandonado. Revista Semana. <https://www.semana.com/vias-terciarias-un-camino-polvoriento-y-abandonado/269660/>
- Shang, T., Ye, K., Wu, L., & Shang, J. (2022). Opportunism or symbiosis? A case study on contractors' unsustainable highway construction in China. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200082>
- Singh, A., Biligiri, K. P., & Sampath, P. V. (2022). Engineering properties and lifecycle impacts of Pervious All-Road All-weather Multilayered pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106186>
- Suarez, V. (2019, May 8). El poder de la tecnología en el sector construcción. *El Colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/negocios/economia/el-poder-de-la-tecnologia-en-el-sector-construccion-MC10659665>
- Sydbom, A., Blomberg, A., Parnia, S., Stenfors, N., Sandstro, T., & Dahle, S.-E. (2001). Health effects of diesel exhaust emissions. *Eur Respir Journal*, 17, 733–746.
- Syntex. (2022). Tecnologías avanzadas en ingeniería de valor.
- UN, U. N. C. C. U. (2021). COP26 explained.
- Unidad de Planeación Minero Energética, U. (2021). Consulta Series de Tiempo. http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=68&grupo=272&fechainicial=01/01/1999&fechafinal=01/10/2012

United Nations Environment Programme, U. (2016). Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators-Volume 1 (Vol. 1, Issue December).

Universidad Nacional de Colombia, U. (2014). ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA INCENTIVAR EL USO DEL GAS COMBUSTIBLE EN EL SECTOR TRANSPORTE. Informe preparado para: Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2010-13-es

UPME. (2021). Consulta Series de Tiempo.

http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=135&fechainicial=01/01/2010&fechafinal=31/12/2016

Urrego, A. (2021). Avanza el plan de mejora de 10.670 kilómetros de vías terciarias. Diario La República.

Vera Viana, J. A. (2021). Estudio de geología y geotecnia.

Volvo. (2021). Emobility - It's time to launch our electric construction machines.

<https://www.volvoce.com/global/en/our-offer/emobility/>

WBCSD. (2020). The Building System Carbon Framework.

Zanetti, M. C., & Farina, A. (2022). Life Cycle Risk Assessment Applied to Gaseous Emissions from Crumb Rubber Asphalt Pavement Construction. *Sustainability*, 14(9), 5716.

<https://doi.org/10.3390/su14095716>

Zhang, X., & Xu, D. (2022). Assessing the eco-efficiency of complex forestry enterprises using LCA/time-series DEA methodology. *Ecological Indicators*, 142, 109166.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109166>

Anexo 1. Distancia de los frentes de obra

Anexo 2. Cantidades de materiales por frente de obra

Anexo 3. Datos para cargue en el software

Anexo 4. Parámetros de base de la actividad “TRANSPORTE COMBUSTIBLE A FRENTE DE TRABAJO COL”

Anexo 5. Parámetros de base de la actividad “DIESEL, CONSUMIDO EN MOTORES DE MAQUINARIA DE CONSTRUCCIÓN CO”

Anexo 6. Inventario de emisiones del proyecto de Málaga

Anexo 7. Inventario de emisiones del proyecto de Rionegro

Anexo 8. Inventario de emisiones del proyecto de San Vicente de Chucurí

Anexo 9. Protocolo de toma de datos

Anexo 10. Formatos de trabajo diligenciados