



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Comparación de la Huella de CO₂ del mantenimiento tradicional de vías de
tercer orden vs estabilización de subrasante con cemento

Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero Civil

Autores:

Troya Arrobas, Anggela Maite
Urgiles Bermeo, Maria Elizabeth

Tutor:

Ing. Carlos Saldaña García

Riobamba, Ecuador. 2026

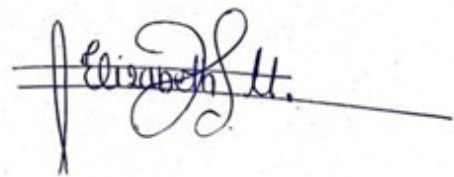
DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotras, Anggela Maite Troya Arrobas con cédula de ciudadanía 2100805320 y María Elizabeth Urgiles Bermeo, con cédula de ciudadanía 0605136126, autoras del trabajo de investigación titulado: Comparación de la Huella de CO₂ del mantenimiento tradicional de vías de tercer orden vs estabilización de subrasante con cemento, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad. Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones. En Riobamba, 24 de junio de 2026.



Anggela Maite Troya Arrobas

C.I.: 2100805320



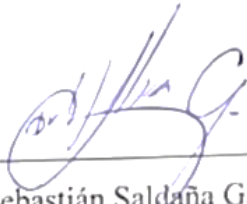
María Elizabeth Urgiles Bermeo

C.I.: 0605136126

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs., catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“COMPARACIÓN DE LA HUELLA DE CO2 DEL MANTENIMIENTO TRADICIONAL DE VÍAS DE TERCER ORDEN VS ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE CON CEMENTO”**, bajo la autoría de Anggela Maite Troya Arrobas y María Elizabeth Urgiles Bermeo; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 29 días del mes de junio de 2026.



Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs.

C.I: 0301496584

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

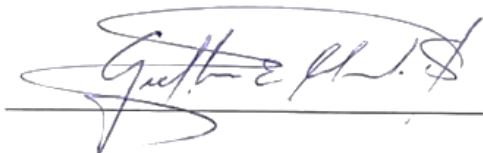
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **“COMPARACIÓN DE LA HUELLA DE CO2 DEL MANTENIMIENTO TRADICIONAL DE VÍAS DE TERCER ORDEN VS ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE CON CEMENTO”**, presentado por **Anggela Maite Troya Arrobas**, con cédula de identidad número 2100805320 y **Maria Elizabeth Urgiles Bermeo** con cédula de identidad número 0605136126, bajo la tutoría de Ing. Carlos Sebastián Saldaña García, Mgs.; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 29 de junio de 2026.

Ing. Angel Edmundo Paredes Garcia, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Guillermo Edvin Machado Sotomayor, Phd.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Julio Andres Fiallos Iglesias, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, Anggela Maite Troya Arrobas con CC: 2100805320 y María Elizabeth Urgiles Bermeo con CC: 0605136126 estudiantes de la Carrera de **Ingeniería Civil**, Facultad de **Ingeniería**; han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado: "**Comparación De La Huella De CO2 De Mantenimiento Tradicional De Vías De Tercer Orden Vs Estabilización De Subrasante Con Cemento**", cumple con el 4% de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 17 de junio de 2026


Mgs. Carlos Saldaña García
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Dedico este logro, en primer lugar, a mi abuelita Marianita de Jesús, quien hoy descansa en el cielo. Estoy segura de que sonríe al ver que todo aquello que anhelaba para sus nietas se está cumpliendo. Aunque ya no puede acompañarnos físicamente, su amor, sus enseñanzas y sus recuerdos han estado presentes en cada paso de este camino.

A mis padres, por su apoyo incondicional, su esfuerzo y su confianza durante toda esta etapa. Gracias por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis queridas hermanas por ser mi compañía y mejores amigas.

Y a mi gatita, mi fiel compañera, que llegó a mi vida para brindarme consuelo y compañía en días complicados, convirtiéndose en una pequeña luz que me ayudó a seguir adelante.

Con amor y gratitud.

Por: Anggela Maite Troya.

La culminación de mi trabajo de titulación representa un paso más hacia el cumplimiento de todas las metas que me he propuesto en la vida. Con profundo amor y gratitud, le dedico mi tesis en primer lugar a Dios, por permitirme siempre seguir adelante y darme la fortaleza para avanzar a pesar de los tropiezos y dificultades que se me presentaron en el camino.

Dedico este logro a mis padres Román y Violeta, quienes, a pesar de las adversidades y la distancia, siempre han estado para mí, nunca me han dejado sola y han sido mi motor que me impulsa siempre a seguir adelante. A mis hermanos Diana y Michael, quienes en aquellos momentos en los que sentí que ya no podía más, me brindaron ánimo, fortaleza y palabras de aliento para continuar. Y, por último, les dedico esta tesis a mis dos grandes amores: mi gatito Milo, quien me acompañó en los inicios de mi vida universitaria y permaneció a mi lado por largas noches de estudio, y a mi perrito Zeus quien llegó a mi vida al finalizar esta etapa profesional y se convirtió en una compañía incondicional. A todos ustedes les dedico este paso tan importante en mi vida, cada esfuerzo realizado y cada sacrificio que hizo posible este sueño, son lo más importante que tengo y sé que sin ustedes, nada de esto sería posible.

Con todo mi amor, les dedico mi más grande logro, LOS AMO.

Por: Maria Elizabeth Urgiles Bermeo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, le agradezco a Dios por permitirme culminar una meta más en mi vida, por no dejar que me rinda en los momentos difíciles y, sobre todo, por permitirme compartir este logro con mis seres queridos y que ellos puedan ver que, gracias a su apoyo, todo esto es posible.

Agradezco con inmensa gratitud y amor a mis padres Román y Violeta, quienes, a pesar de la distancia y las dificultades de la vida, siempre han estado para mí. Jamás me han dejado sola y, aun cuando yo misma me he rendido en más de una ocasión, ellos han permanecido a mi lado, gracias por no rendirse conmigo, por brindarme amor, apoyo y aliento incondicional. A mis hermanos Diana y Michael les agradezco por todo el cariño y apoyo que me han brindado, que a pesar de la distancia nunca me han dejado sola, los amo infinitamente y les agradezco por estar para mí, presentes en mi vida. Le agradezco a mi gatito Milo, quien me acompaña hasta el día de hoy, brindándome cariño, compañía, acompañándome en los momentos de cansancio y desvelo, a mi perrito Zeus quien llegó al finalizar esta etapa universitaria y me alegrar los días.

Finalmente agradezco este triunfo a mis amigos, quienes me han visto reír, llorar, sufrir y celebrar, gracias por su compañía en cada etapa de este proceso.

Stalin, gracias a ti y a tu familia por abrirme las puertas de su hogar y de sus vidas, por acogerme con cariño y permitirme formar parte de su familia, gracias por tanto apoyo y afecto durante tantos años. José, gracias por acompañarme desde los inicios de mi carrera, por ayudarme cada vez que lo necesité y por brindarme tu amistad sincera e incondicional, gracias por aceptarme y quererme.

Con todo mi amor y gratitud, LOS AMO.

Por: Maria Elizabeth Urgiles Bermeo.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi padre, por ser el motor que me impulsó a seguir adelante en cada momento de este camino y por brindarme su apoyo incondicional cuando más lo necesité. Su confianza en mí fue una de las mayores motivaciones para alcanzar esta meta.

A mi madre, por sus palabras de aliento, su cariño y por motivarme constantemente a no rendirme frente a las dificultades.

A mis amigos, quienes me acompañaron durante esta etapa universitaria, compartiendo alegrías, desafíos y experiencias que hicieron de este recorrido una etapa inolvidable.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que iniciaron este camino junto a mí. A pesar de las dificultades y los distintos rumbos que tomó la vida, valoro profundamente su compañía, las experiencias compartidas y el haber formado parte de mi vida universitaria.

Por: Anggela Maite Troya Arrobas.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Antecedentes	16
1.2. Zona de estudio	16
1.2.1. Vía Alao – Pungalá	16
1.2.2. Vía Cascada de Puelazo – Bocatoma	18
1.3. Planteamiento del problema.....	19
1.4. Justificación	20
1.5. Objetivos.....	21
1.5.1. Objetivo general.....	21
1.5.2. Objetivos específicos	21
CAPÍTULO II. MARCO TEORICO	22
2.1. Estado del arte.....	22
2.2. Definición de procesos constructivos	23
2.2.1. Estabilización de subrasante	23
2.2.2. Método de lastrado.....	24
2.2.3. Función del material de lastre en vías	25
2.2.4. Características del material de lastre.....	25
2.2.5. Procesos constructivos del método de lastrado	26
2.2.5.1. Transporte de maquinaria a obra y transporte y retorno diario del personal	26
2.2.5.2. Reconformación de la subrasante	26
2.2.5.2.1. Reconformación del perfil longitudinal	26
2.2.5.2.2. Conformación de la sección transversal	26
2.2.5.2.3. Control de niveles y verificación geométrica.....	27
2.2.5.3. Explotación del material de lastre	27

2.2.5.3.1.	Minado del material en cantera	27
2.2.5.3.2.	Acopio temporal dentro de cantera	27
2.2.5.4.	Transporte del material de lastre	27
2.2.5.4.1.	Cargado en volqueta	27
2.2.5.4.2.	Movilización de la volqueta llena hacia la obra	27
2.2.5.4.3.	Descarga del material	27
2.2.5.4.4.	Movilización de la volqueta hacia el centro de acopio	27
2.2.5.5.	Tendido y conformación del lastre.....	28
2.2.5.5.1.	Extendido del material en la subrasante	28
2.2.5.5.2.	Distribución longitudinal de lastre	28
2.2.5.5.3.	Conformación de la sección transversal	28
2.2.5.6.	Captación de agua en punto de abastecimiento	28
2.2.5.6.1.	Movilización del tanquero hacia el punto de captación	28
2.2.5.6.2.	Proceso de llenado del tanque	28
2.2.5.7.	Humectación	28
2.2.5.7.1.	Movilización del tanquero hacia la obra (lleno).....	28
2.2.5.7.2.	Aplicación de agua sobre la vía.....	29
2.2.5.8.	Compactación.....	29
2.2.6.	Método de estabilización con cemento	29
2.2.7.	Cemento	29
2.2.7.1.	Clasificación del cemento	30
2.2.8.	Proceso constructivo del método de estabilización con cemento	31
2.2.8.1.	Replanteo y preparación de la subrasante	31
2.2.8.1.1.	Reconocimiento del área	31
2.2.8.1.2.	Colocación de las estacas laterales	31
2.2.8.1.3.	Ubicación y marcado de los ejes del terreno	31
2.2.8.1.4.	Control de niveles y marcado de cotas	32
2.2.8.2.	Escarificación y nivelación del suelo existente.....	32
2.2.8.2.1.	Escarificación del suelo.....	32
2.2.8.2.2.	Nivelación del suelo	32
2.2.8.3.	Humectación y compactación primaria.....	32
2.2.8.3.1.	Movilización del tanquero vacío a la zona de captación.....	32
2.2.8.3.2.	Utilización de la motobomba	32

2.2.8.3.3.	Movilización del tanquero cargado al centro de gravedad	33
2.2.8.3.4.	Aplicación de agua en la subrasante.....	33
2.2.8.3.5.	Compactación primaria	33
2.2.8.4.	Distribución del cemento sobre la subrasante.....	33
2.2.8.4.1.	Transporte del material por medio de un camión silo para cemento a granel	34
2.2.8.4.2.	Transporte del material por medio de un camión de carga para cemento en sacos.....	34
2.2.8.4.3.	Distribución del cemento de forma mecanizada	34
2.2.8.4.4.	Distribución del cemento de forma manual	34
2.2.8.5.	Mezclado suelo – cemento (en seco)	34
2.2.8.6.	Adición de agua y mezclado húmedo	34
2.2.8.6.1.	Mezclado y activación del agua con el cemento	35
2.2.8.7.	Conformación y perfilado de la capa estabilizada	35
2.2.8.8.	Compactación final de la capa estabilizada	35
2.2.8.9.	Curado y protección de la capa estabilizada	35
2.2.9.	Huella de carbono en los procesos de estabilización de subrasante	35
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		38
3.1.	Enfoque de investigación.....	38
3.2.	Tipo de investigación.....	39
3.3.	Esquema metodológico.....	39
3.4.	Fuentes de información y criterios de selección	39
3.5.	Método de análisis	40
3.5.1.	Definición del alcance de estudio	40
3.5.2.	Área, volúmenes y cantidades de obra.....	40
3.5.3.	Definición de procesos constructivos y recursos operativos	46
3.5.4.	Análisis de rendimiento y tiempo operativo de maquinaria	46
3.5.5.	Determinación de emisiones de CO ₂ asociadas a maquinaria.....	47
3.5.6.	Determinación de emisiones de CO ₂ asociadas a mano de obra.....	49
3.5.7.	Determinación de emisiones de CO ₂ asociadas a herramienta menor	50
3.5.8.	Determinación de emisiones de CO ₂ asociadas a materiales	51
3.5.8.1.	Determinación de la huella de CO ₂ en función de ciclo de vida del cemento	51
3.5.8.2.	Aplicación de factores de emisión.....	52

3.5.8.3.	Determinación de la huella de CO ₂ en función de la cal	52
3.5.8.3.1.	Aplicación de factores de emisión.....	53
CAPÍTULO IV ANALISIS Y RESULTADOS		54
4.1.	Análisis del proceso de lastrado.....	54
4.1.1.	Rendimiento y tiempo de operación de maquinaria.....	54
4.1.2.	Lastrado con espesor de capa de 10 cm	55
4.1.3.	Lastrado con espesor de capa de 10 cm, 15 cm y 20 cm	58
4.2.	Método de estabilización con cemento	60
4.2.1.	Rendimientos y tiempo de operación de maquinaria	60
4.2.2.	Aplicación mecanizada de cemento - Transporte desde las fábricas de Cotopaxi (Latacunga) y Chimborazo (Riobamba).....	63
4.2.3.	Aplicación manual de cemento - Transporte desde las fábricas de Cotopaxi (Latacunga) y Chimborazo (Riobamba).....	69
4.3.	Proyección de la huella de carbono del método de lastrado a 10 años	72
4.4.	Proyección de la huella de carbono del método de estabilización con cemento a 10 años.....	74
4.5.	Comparación de métodos constructivos	77
4.6.	Comparación global de resultados	83
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		88
5.1.	Conclusiones.....	88
5.2.	Recomendaciones	89
BIBLIOGRAFÍA.....		90
ANEXOS.....		97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Centros geométricos para la humectación de la vía	17
Tabla 2 Resumen de las características de los suelos.....	18
Tabla 3 Cuantificación del consumo energético y emisiones de CO ₂ de cada proceso unitario en el límite de la planta de cemento	37
Tabla 4 Metodología para la determinación de la cantidad de agua necesaria	41
Tabla 5 Dosificaciones propuestas y óptimas por tramos en las vías Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma.	44
Tabla 6 Metodología para la determinación de la cantidad de cemento requerido.....	44
Tabla 7 Dosificación en peso de cemento según las propiedades físicas y geométricas de la vía Alao – Pungalá	45
Tabla 8 Metodología para la determinación de la cantidad de cal requerido.....	45
Tabla 9 Resumen de las fórmulas empleadas para determinar los rendimientos operativos y el tiempo total de trabajo de la maquinaria y los equipos utilizados en el proceso constructivo.	47
Tabla 10 Consumo de combustible de la maquinaria empleada para el análisis de los procesos de estabilización de subrasante.	48
Tabla 11 Peso del acero (Kg) existente en la herramienta menor empleada en obra.....	51
Tabla 12 Rendimiento y tiempos de operación de maquinaria para el análisis de proceso de lastrado	54
Tabla 13 Procesos y subprocesos con indicadores de equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales para el proceso de lastrado	56
Tabla 14 Huella de carbono para el proceso de lastrado con capa de 15 cm y 20 cm.	58
Tabla 15 Análisis de rendimientos y tiempos de operación para el método de estabilización con cemento con aplicación mecanizada para la vía de Alao - Pungalá.....	61
Tabla 16 Procesos y subprocesos con indicadores de equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales para el proceso de estabilización con cemento de aplicación mecanizada – Latacunga – Dosificación óptima.....	63
Tabla 17 Análisis de la Huella de CO ₂ para un sub – proceso mecanizado con dosificaciones diferentes en base a la estabilización de suelo con cemento.	66
Tabla 18 Análisis de la Huella de CO ₂ para un sub – proceso manual con dosificaciones diferentes en base a la estabilización de suelo con cemento.	69
Tabla 19 Análisis de las emisiones de CO ₂ acumuladas de la vía para 10 años con el método de lastre	73
Tabla 20 Análisis de las emisiones de CO ₂ acumuladas de la vía para 10 años con el método de estabilización con cemento.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distancia zona de Stock Riobamba – Centro de gravedad vía Alao – Pungalá.	17
Figura 2 Mapa geológico de la vía Alao – Pungalá.	18
Figura 3 Distancia zona de Stock Riobamba – Centro de gravedad.	19
Figura 4. Proceso de conformación y estabilización mediante método de lastrado.....	24
Figura 5. Estabilización química.....	24
Figura 6. Límites granulométricos para lastre.....	25
Figura 7 Comparación porcentual del consumo energético y emisiones de CO ₂ en la producción de Clinker y Cemento.....	36
Figura 8. Esquema metodológico.....	39
Figura 9. Emisiones de CO ₂ anuales per cápita	50
Figura 10. Representación gráfica de las simulaciones evaluadas para las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)	77
Figura 11. Emisiones de CO ₂ generadas por uso y fabricación de equipo y maquinaria en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)	78
Figura 12 Emisiones de CO ₂ generadas por mano de obra en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)	80
Figura 13. Emisiones de CO ₂ generadas por herramienta menor en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)	81
Figura 14. Emisiones de CO ₂ generadas por materiales en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)	82
Figura 15. Proyección de la huella de carbono del método de lastrado y método de estabilización con cemento a 10 años en la vía Alao - Pungalá.....	84
Figura 16. Proyección de la huella de carbono del método de lastrado y método de estabilización con cemento a 10 años en la vía Cascada de Puelazo - Bocatoma.....	86

RESUMEN

Las vías rurales de tercer orden constituyen un elemento fundamental para la conectividad y el desarrollo socioeconómico de las comunidades; por lo que es de vital importancia garantizar condiciones adecuadas de tránsito y seguridad, por esta razón, es necesario que se realicen mantenimientos periódicos para su conservación, sin embargo, los métodos tradicionales de mantenimiento generan impactos ambientales asociados al consumo de materiales, intervención del ser humano y transporte y uso de maquinaria. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo comparar la huella de carbono generada por el método de lastrado y la estabilización de subrasante con cemento en vías rurales del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo.

La metodología se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y comparativo, considerando dos vías de estudio: Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma. Se determinó la huella de carbono asociada a las actividades de construcción mediante el análisis de uso y fabricación de maquinaria, mano de obra, fabricación de materiales y uso y fabricación de herramienta menor. Para la estabilización con cemento se evaluaron dos fuentes de abastecimiento de cemento (Riobamba y Latacunga), dos métodos de aplicación (manual y mecanizado), dosificaciones del 2, 4 y 6% y una dosificación óptima por tramo, y para el método de lastrado se realizaron tres simulaciones en función del espesor de la capa de lastre, de 0.10 m, 0.15 m y 0.20 m. Adicionalmente, se realizó una proyección de emisiones acumuladas para el periodo de 10 años considerando la frecuencia de mantenimiento requerida para cada alternativa.

Los resultados evidenciaron que el lastrado presenta mayores emisiones acumuladas durante el periodo de análisis debido a la necesidad de intervenciones periódicas. En la vía Alao – Pungalá, el lastrado con espesor de 20 cm generó 8541.02 toneladas de CO₂ en 10 años, mientras que la estabilización con cemento utilizando la dosificación óptima registró 830.81 toneladas de CO₂, equivalente a una reducción aproximada de 90.30%. De igual manera, en la vía Cascada de Puelazo - Bocatoma, el lastrado con espesor de 20 cm generó 2770.54 toneladas de CO₂, mientras que la estabilización con cemento al 2% registró 794.57 toneladas de CO₂, correspondiente a una reducción aproximada del 71.30%.

Al comparar ambos métodos, la estabilización de subrasante con cemento constituye la alternativa ambientalmente más favorable para las condiciones analizadas, especialmente cuando se emplean dosificaciones optimizadas y fuentes de abastecimiento cercanas, debido a que permite reducir significativamente la huella de carbono acumulada durante el periodo de vida analizado.

Palabras clave: estabilización de subrasante, huella de carbono, método de lastrado, estabilización con cemento, sostenibilidad ambiental.

ABSTRACT

Third-order rural roads play a fundamental role in connectivity and the socioeconomic development of communities. Therefore, ensuring adequate trafficability and safety conditions is essential and requires periodic maintenance to preserve their functionality. However, traditional maintenance methods generate environmental impacts associated with material consumption, human intervention, transportation, and machinery operation. In this context, the objective of this research was to compare the carbon footprints of gravel road maintenance and cement-based subgrade stabilization on rural roads in Riobamba Canton, Chimborazo Province, Ecuador. The methodology was developed through a quantitative and comparative approach considering two case-study roads: Alao–Pungalá and Cascada de Puelazo–Bocatoma. The carbon footprint associated with construction activities was determined by analyzing machinery use and manufacturing, labor, material production, and the use of minor tools. For cement stabilization, two cement supply sources (Riobamba and Latacunga), two application methods (manual and mechanized), cement contents of 2%, 4%, and 6%, and an optimum dosage for each road section were evaluated. For the gravel maintenance method, three scenarios were analyzed based on gravel layer thicknesses of 0.10 m, 0.15 m, and 0.20 m. Additionally, a projection of cumulative emissions over a 10-year period was conducted, accounting for the maintenance frequency required for each alternative. The results showed that gravel maintenance generates higher cumulative emissions throughout the analysis period due to the need for recurrent maintenance interventions. On the Alao–Pungalá road, the 20 cm gravel layer generated 8,541.02 tons of CO₂ over 10 years, whereas cement stabilization at the optimum dosage produced 830.81 tons of CO₂, representing an approximate 90.30% reduction. Similarly, on the Cascada de Puelazo–Bocatoma road, the 20 cm gravel layer generated 2,770.54 tons of CO₂, while 2% cement stabilization produced 794.57 tons of CO₂, corresponding to an approximate 71.30% reduction. The comparison of the two alternatives demonstrated that cement-based subgrade stabilization is the most environmentally favorable option under the analyzed conditions, particularly when optimized cement dosages and nearby supply sources are used, as it significantly reduces the cumulative carbon footprint over the evaluated service life.

Keywords: subgrade stabilization, carbon footprint, gravel road maintenance, cement stabilization, environmental sustainability.



Publicar documentos en Píndalo.
Reservados todos los derechos. No se permite la explotación económica ni la transformación de esta obra. Queda permitida la impresión en su totalidad.

Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La infraestructura vial rural desempeña un papel fundamental en la conectividad de Riobamba, en el desarrollo económico y principalmente en el acceso de la población a servicios básicos, en Ecuador, las vías de tercer orden presentan muchos problemas debido a sus factores climáticos, tránsito vehicular, características geotécnicas del suelo y debido a la falta de mantenimiento periódico. [1]

Tradicionalmente, el mantenimiento de vías no pavimentadas se realiza con el método de lastrado, el cual consiste en la colocación de material granular sobre la superficie de la capa de rodadura para mejorar su capacidad estructural, este proceso implica la realización de actividades como extracción de material pétreo, transporte, tendido y humectación, lo que implica el uso continuo de maquinaria pesada, y consumo de combustibles fósiles. [2]

Debido a esto, se presenta otra alternativa técnica, que es la estabilización de subrasante con cemento, lo que permite mejorar las propiedades mecánicas del suelo y aumentar la resistencia de la estructura vial, sin embargo, la producción de cemento representa una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono dentro del sector de la construcción. [3]

Por esto, la evaluación de la huella de carbono en proyectos viales es una herramienta importante para determinar qué proceso genera mayor impacto ambiental y por ende seleccionar la alternativa más sostenible.

En este contexto, la presente investigación plantea una comparación teórica de la huella de carbono generada por el método de lastrado y la estabilización de la subrasante con cemento, aplicados a dos vías de tercer orden de la provincia de Chimborazo.

1.2. Zona de estudio

1.2.1. Vía Alao – Pungalá

La vía Alao – Pungalá corresponde a una vía de tercer orden que se encuentra ubicada en la provincia de Chimborazo, según Jara Páez (2024) la misma presenta una longitud de 13.8 km y un ancho promedio de 6 m. [4]

De acuerdo con la información proporcionada por la Prefectura de Chimborazo, la maquinaria destinada para actividades de mantenimiento de toda la provincia se encuentra ubicada en la zona de stock Riobamba – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). En base a ello, se determinó una distancia de transporte de 32.9 km desde la zona de stock (ESPOCH) hasta el centro geométrico de la vía puesta en estudio (Alao – Pungalá), obtenida mediante la herramienta Google Maps [5], como se muestra en la Figura 1.

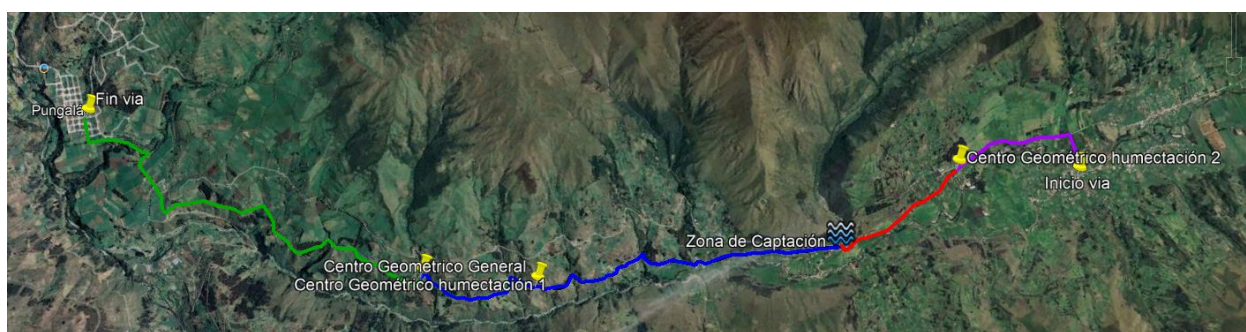
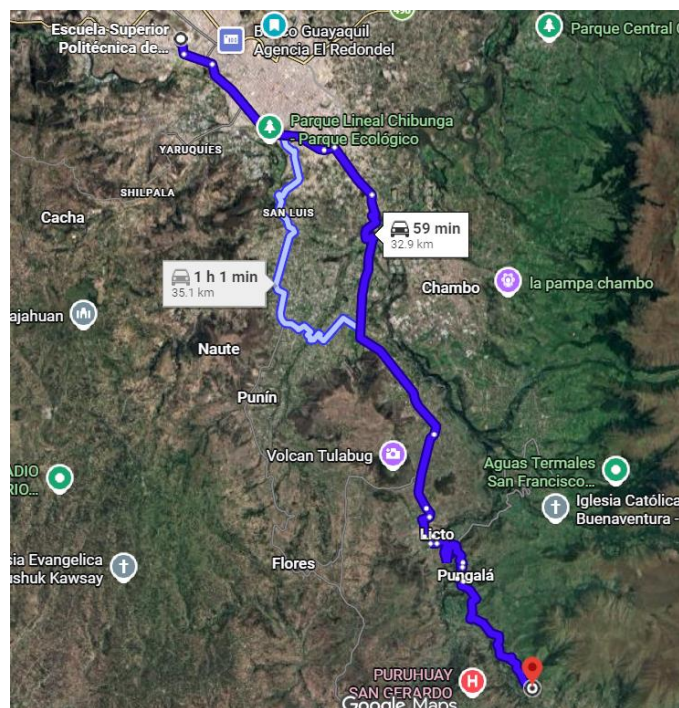


Figura 1. Distancia zona de Stock Riobamba – Centro de gravedad vía Alao – Pungalá.

Fuente: Google Maps [5]

La zona presenta un afluente hídrico con varios accesos que puede servir como zona de captación, sin embargo, la principal zona de abastecimiento se plantea en el punto Barrio Maguazo. Al tener como zona de abastecimiento un punto no intermedio en la vía se deben determinar las distancias desde: Punto inicial vía – Zona de abastecimiento y Centro Geométrico vía – Zona de abastecimiento como se presenta en la Figura 1 y se detallan en la Tabla 1:

Tabla 1

Centros geométricos para la humectación de la vía

Tramo	Distancia (km)	Centro Geométrico	Distancia (km)
Tramo 1	6.843		
Tramo 2	3.865	Centro Geométrico humectación 1	5.3
Tramo 3	0.767		
Tramo 4	2.325	Centro Geométrico humectación 2	1.6

Jara Páez (2024) determinó que en la vía Alao – Pungalá existen cuatro tipos de suelo: arena café, arena con agregado granular, arena con grava y arena negra. La distribución geológica de cada suelo se presenta en la Figura 2, mientras que las características geotécnicas se resumen en la Tabla 2 [4].

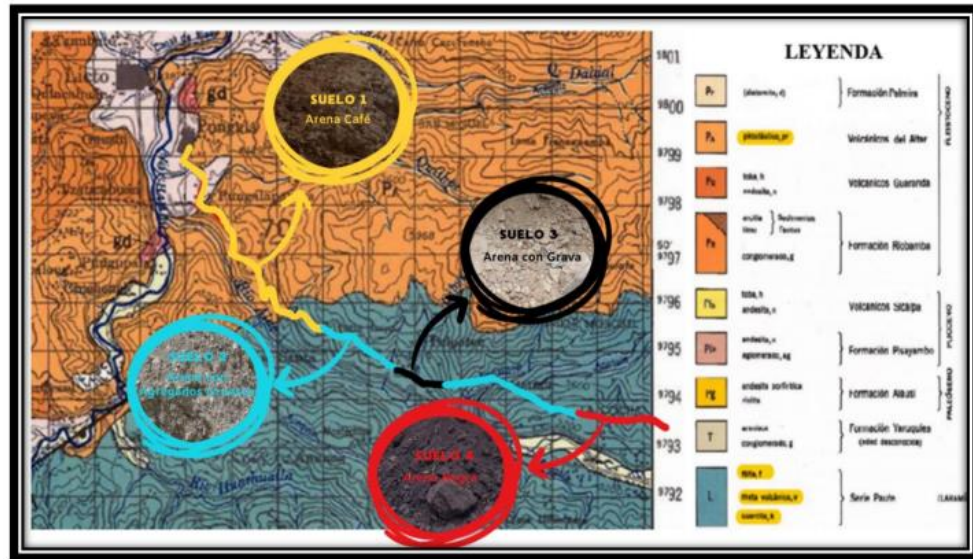


Figura 2 Mapa geológico de la vía Alao – Pungalá.

Fuente: Adaptado de [4]

Tabla 2

Resumen de las características de los suelos[4]

Suelo	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Extensión (Km)	6.843	3.865	0.767	2.325
SUCS	SM-ll	SM-CL	SW	SM-d
AASHTO	A-4	A-4	A-1-b	A-4
Densidad seca máx. (g/cm3)	1.488	1.912	1.431	1.693
Humedad óptima	22.80%	9.99%	23.51%	17.98%
CBR 95%	16.63%	23.51%	27.60%	33.00%

1.2.2. Vía Cascada de Puelazo – Bocatoma

La vía Cascada de Puelazo – Bocatoma tiene una longitud de 15 km y un ancho de 6 m, al igual que para la vía de Alao Pungalá, la zona de stock para la maquinaria se encuentra ubicada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

Al ya saber en qué zona se encuentra la maquinaria, debemos determinar cuál es la distancia al centro de gravedad de la vía, por lo que con ayuda de la herramienta ArcGIS Online y Google Maps se logró determinar un trayecto de 30.3 km desde la zona de stock, como se muestra en la Figura 3.[6]

Por otro lado, se determinó una zona de abastecimiento de agua ubicada al inicio de la vía, misma que presenta una distancia hacia el centro de gravedad de 7.5 km. Se escogió dicha zona por la facilidad de acceso y captación de agua como se muestra en la Figura 3:

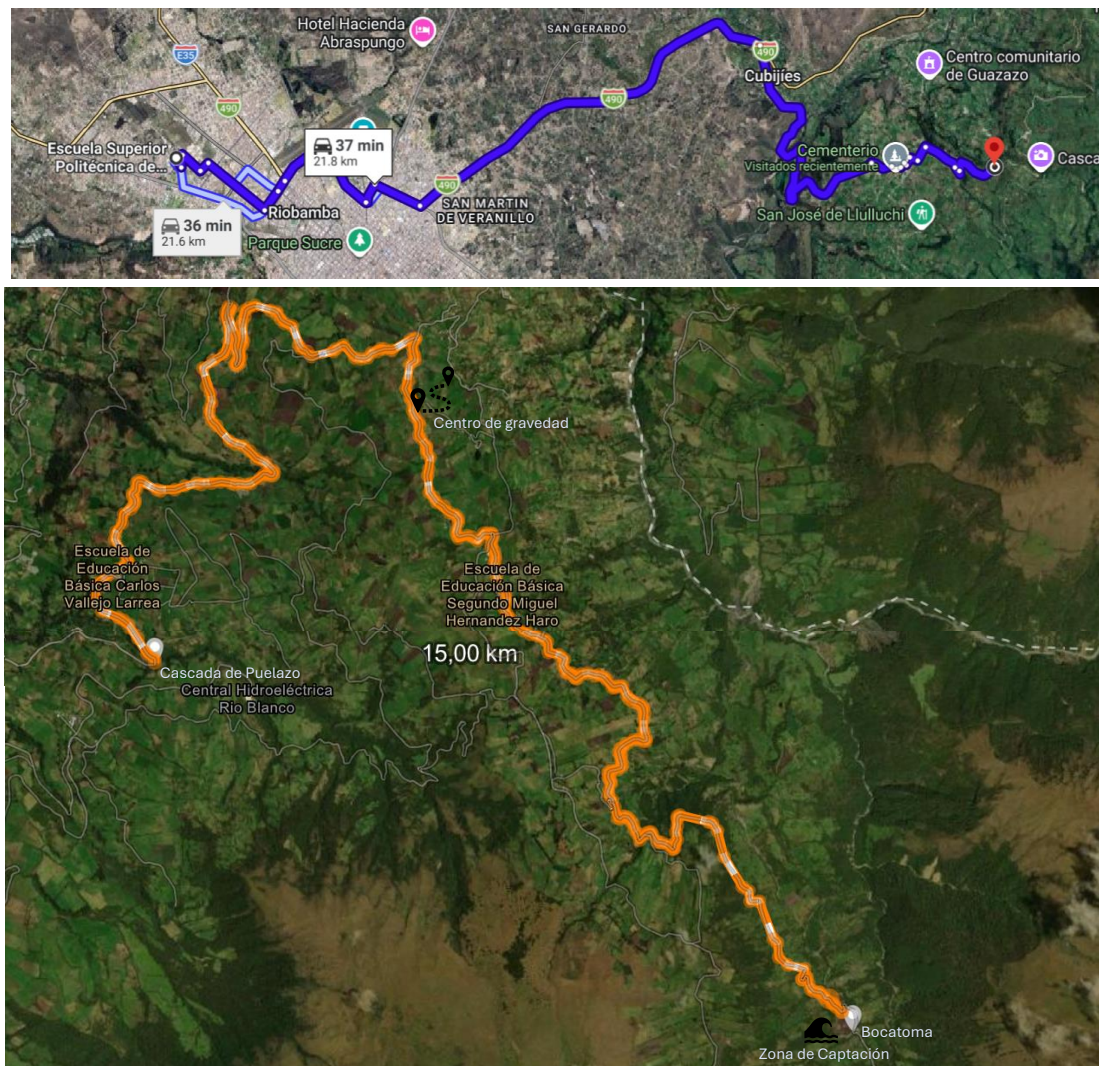


Figura 3 Distancia zona de Stock Riobamba – Centro de gravedad.

Fuente: ArcGIS Online[6]

Mejía Gallegos (2024) menciona que la vía de Cascada de Puelazo – Bocatoma presenta un único estrato a lo largo de todo el camino, además gracias a ensayos de Proctor modificado logró determinar una densidad óptima de 1.83 g/cm^3 con un contenido de humedad óptima de 18.5% [7]

1.3. Planteamiento del problema

Actualmente el desarrollo de la infraestructura vial en Ecuador tiene que regirse a una gestión pública eficiente, transparente y en especial amigable con el planeta, este enfoque responde a lo establecido en la Ley Orgánica de Integridad Pública, en donde el Artículo 4 establece como finalidad garantizar una administración pública “íntegra, eficiente, ágil, transparente, libre de violencia y corrupción, con responsabilidad ambiental y social y orientada a resultados”,

mediante la optimización del uso de los recursos del Estado [7]. De igual manera, las reformas que se introdujeron a la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Contratación Pública incorporan como principio clave la sostenibilidad en sus contrataciones, se resalta el Artículo 4 en donde se señala que los procesos deben regirse por criterios de "igualdad, sostenibilidad, simplificación, transparencia, integridad y mejor valor por dinero"[7]

Sin embargo, actualmente estas disposiciones no se pueden observar en la gestión de vías de tercer orden en el cantón de Riobamba, ya que en la actualidad, cerca del 72% de las vías de tercer orden se encuentran en mal estado debido a varios factores geológicos e hidrogeológicas y por falta de mantenimiento [4], esto afecta principalmente a la conectividad rural y el desarrollo económico local; las soluciones que se adoptan, tales como el método de lastrado y el método de estabilización de subrasante con cemento generalmente se seleccionan bajo un criterio técnico, sin considerar un análisis integral que considere la huella de carbono ni los impactos ambientales en el ciclo de vida del proyecto. Por ejemplo, la utilización de cemento demuestra que ayuda a mejorar la resistencia estructural del suelo [4], sin embargo, es posible otro problema debido a las emisiones altas de CO₂ generadas, desde su producción hasta su aplicación en obra, este método contravendría los principios de sostenibilidad y eficiencia del gasto público, ya que no se considera el verdadero costo ambiental del método constructivo adoptado. Además, al no incorporar en la toma de decisiones un análisis y cuantificación de la huella de carbono ni mecanismos que evalúen el estado ambiental final, se estaría incumpliendo con los artículos 4 y 9 de la Ley de Integridad Pública, misma que establece que el uso de recursos públicos debe ser ambientalmente responsable y, por ende, que los contratos públicos se alineen con políticas sostenibles.[7]

Así, se puede evidenciar una falta de alineación entre la práctica operativa y el marco legal vigente en el país, poniendo así en riesgo el cumplimiento de los principios constitucionales y legales que rigen la contratación pública en la nación, esta brecha normativa y ambiental representa un gran obstáculo para la implementación de infraestructura vial resiliente con el medio ambiente. En este contexto, se plantea la necesidad de evaluar comparativamente la huella de carbono de dos alternativas técnicas y teóricas para el mejoramiento vial como son el lastrado y la estabilización de subrasante con cemento, con el fin de generar información objetiva, misma que contribuirá a la toma de decisiones públicas responsables, transparentes, sostenibles y resilientes con el medio ambiente.

1.4. Justificación

La realización de mantenimientos viales en las vías de tercer orden de la provincia de Chimborazo es importante, ya que el 52.39% de la población reside en áreas rurales según los resultados del Censo de Población y Vivienda 2022 del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [8] y depende en gran medida de estas vías de tercer orden para el acceso a servicios, actividades productivas y movilidad diaria. Por ende, la recuperación y estabilización de las carreteras mediante método de lastrado o estabilización con cemento representa un gran avance para los residentes de la vía Alao-Pungalá y la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma, ya que esta actividad mejora el comercio, la comunicación y la movilidad entre las diferentes zonas. Al analizar la estabilización de subrasante desde una perspectiva más amigable con

nuestro entorno, podemos observar que la incorporación de aditivos a una subrasante puede tener un gran impacto ambiental. Entre las alternativas empleadas se encuentra la estabilización con cemento, técnica que contribuye al incremento de la capacidad estructural y durabilidad de la vía [9],[10],[11],[12], sin embargo, diversos estudios han señalado que la fabricación de cemento constituye una importante fuente de emisiones de CO₂ debido al consumo energético y a los procesos requeridos para su producción [13] ,[14]. De igual manera, las actividades de extracción, transporte y reposición periódica de materiales granulares utilizados asociados al mantenimiento vial por lastrado también generan emisiones. Por esta razón, es pertinente analizar el impacto ambiental asociado a estas actividades, considerando que la fabricación de cemento es responsable de aproximadamente entre el 7 y 8% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con actividades humanas [14], de igual manera, las operaciones de extracción y transporte generan emisiones relacionadas al consumo de combustibles fósiles y al uso de maquinaria pesada. Por ello, se debe determinar la huella de CO₂ que produce esta actividad y realizar un análisis comparativo. Estos resultados les ayudarán a los GADs Municipal y Provincial en la toma de decisiones desde el punto de vista de la sustentabilidad al momento de elegir la alternativa de mantenimiento de las vías de tercer orden.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Comparar la huella de carbono teórica entre la estabilización de subrasante mediante la aplicación de cemento versus el método de lastrado aplicado a dos casos de estudio Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir los procesos constructivos para ejecutar las obras de mantenimiento vial adicionando el cemento como agente estabilizador de subrasante y los procesos del método de lastrado.
- Evaluar la Huella de CO₂ tanto para cada proceso constructivo definido como para la intervención total.
- Comparar los valores de huella de CO₂ obtenidos entre el mantenimiento de lastrado con la estabilización de subrasante mediante la aplicación de cemento.

CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

2.1. Estado del arte

En los últimos años, los estudios relacionados con infraestructura vial se han basado en métodos constructivos que permitan mejorar el comportamiento mecánico de las vías rurales, y a su vez, reducir los impactos ambientales asociados a su construcción y mantenimiento, en donde las alternativas de estabilización mediante cemento y método de lastrado han sido ampliamente estudiadas debido a su aplicación frecuente en vías de segundo y tercer orden.

En nuestro país, Jara Páez (2024), desarrolló una investigación enfocada en la reducción de tiempos de mantenimiento vial mediante estabilización de subrasante en la vía Alao – Pungalá, en este estudio identificó distintos tipos de suelo presentes en el tramo vial: arena café, arena con agregado granular, arena con grava y arena negra. Mediante la clasificación SUCS y AASHTO, el autor determinó que la mayor parte de los materiales corresponde a suelos granulares limosos y arenosos, presentando variaciones en densidad seca máxima, humedad óptima y capacidad portante (CBR). Los resultados obtenidos evidenciaron valores de CBR comprendidos entre 16.63% y 33%, lo que demuestra una variabilidad importante en las condiciones de la subrasante a lo largo de la vía [4]

Además, evaluó el comportamiento mecánico de la subrasante estabilizada con cemento, determinó dosificaciones óptimas de acuerdo con las características geotécnicas de cada tramo, los resultados que obtuvo evidenciaron que se mejoró la capacidad estructural del suelo y el comportamiento de la vía bajo la aplicación de cargas vehiculares [4].

Por otra parte, Mejía Gallegos (2024) realizó una investigación similar en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma, con enfoque principalmente en el análisis costo – beneficio de la estabilización de subrasante mediante la aplicación de cal y cemento, en esta investigación se determinó las dosificaciones óptimas de estabilización a partir de ensayos de laboratorio, lo que permitió obtener mejoras en el módulo de rigidez y en el comportamiento mecánico de la subrasante. [7]. A través de ensayos de Proctor Modificado, el autor determinó una densidad seca máxima aproximada de 1.83 g/cm^3 y un contenido de humedad óptima cercano al 18.5%, estos parámetros son importantes para analizar el comportamiento mecánico del suelo frente a procesos de compactación y estabilización [7].

Así mismo, Parra Merino (2024), desarrolló un estudio relacionado con la estabilización de suelo mediante reciclaje de pavimento en la vía Alao – Pungalá, analizando la variabilidad técnica de incorporar materiales reciclados con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de la subrasante, con este estudio se demostró que se puede reducir la necesidad de reemplazar totalmente todo el material existente cada que sea necesario realizar mantenimientos [15].

Actualmente se han realizado investigaciones en donde se incorporan criterios ambientales dentro de la evaluación de proyectos viales. Iñiguez Delgado (2024) realizó un análisis comparativo entre estabilización suelo – cemento y métodos convencionales para asfaltado vial, llegando a la conclusión de que la estabilización de suelos ayuda en la reducción de tiempos de

ejecución y disminución de emisiones asociadas al transporte y explotación excesiva de materiales pétreos [16].

Sin embargo, aunque actualmente existen investigaciones relacionadas con la estabilización de subrasantes y mantenimiento vial, estas poseen poca información sobre la comparativa del impacto ambiental que generan tanto el método de lastrado como el método de estabilización con cemento, debido a ello, la presente investigación busca contribuir con información técnica y ambiental, lo que permite analizar y comparar ambos métodos, con enfoque principal en emisiones de dióxido de carbono durante la ejecución de cada método.

2.2. Definición de procesos constructivos

2.2.1. Estabilización de subrasante

Muchos de los suelos que existen en el país no poseen la capacidad portante suficiente para resistir las cargas provenientes de estructuras o agentes externos, por lo que resulta fundamental evaluar las características físicas y mecánicas del suelo sobre el cual se va a trabajar.

Es por ello que existen técnicas y métodos de estabilización que permiten mejorar las propiedades de los suelos, posibilitando con ello la construcción en la mayoría de los terrenos. Según Fratelli Graciela (1993), “para estabilizar un suelo se requiere de la aplicación de procesos que alteren sus propiedades iniciales, logrando una mejora en el comportamiento del material desde el punto de vista resistente, incrementando o protegiendo sus características mecánicas, estabilidad volumétrica y capacidad de drenaje, entre otras”[17]

Por otra parte, Sánchez Albán (2014) menciona que la estabilización de suelos consiste en agregar un producto químico o aplicar un tratamiento físico con el objetivo de mejorar las características iniciales del terreno, buscando con ello incrementar su resistencia o disminuir su plasticidad [10]. La elección del método de estabilización dependerá de las características del material sobre el cual se trabajará y de las condiciones que se desean mejorar o alcanzar.

En la investigación actual se plantean dos tipos de estabilización: Física como se observa en la Figura 4 y química como se observa en la Figura 5. De acuerdo con Sánchez Albán (2014), el método físico consiste en mezclar dos o más suelos con propiedades complementarias con el propósito de obtener un nuevo material de mejor calidad. En este contexto, el lastre puede considerarse como un tipo de estabilización física. [10]



Figura 4. Proceso de conformación y estabilización mediante método de lastrado

Fuente: Holcim Ecuador [18]

Por otro lado, la estabilización química consiste en la incorporación de cemento Portland al suelo. Según Sánchez Albán (2014), este tipo de estabilización es utilizado principalmente para suelos de tipo arenoso con la finalidad de incrementar la resistencia mecánica [10].



Figura 5. Estabilización química

Fuente: Holcim Ecuador [19]

2.2.2. Método de lastrado

El lastrado vial es un método constructivo que se usa principalmente en vías no pavimentadas, comprende un conjunto de actividades que mejora la superficie de rodadura de vías no pavimentadas mediante la colocación, distribución, humectación y compactación de material granular o pétreo sobre la superficie de rodadura lo que mejora las condiciones de resistencia, soporte estructural y tránsito de la vía; por lo general, esta capa granular es de espesores comprendidos de entre 10 a 20 cm, dicho espesor depende de factores como las condiciones del terreno, el tránsito vehicular y los requerimientos del proyecto [2].

Las vías lastradas son ampliamente usadas en sectores rurales debido a su menor costo de construcción y mantenimiento en comparación con las vías pavimentadas. Sin embargo, estas vías son más susceptibles al deterioro debido a las cargas vehiculares constantes, la presencia de agua y erosión superficial y mantenimientos poco frecuentes, generan deformaciones, pérdida de material y disminución de las condiciones de serviciabilidad de las vías. [9]

2.2.3. Función del material de lastre en vías

El material granular empleado en vías lastradas cumple con la función estructural importante dentro de la capa de rodadura, debido a que permite que las cargas generadas por el tránsito vehicular se distribuyan a las capas inferiores del terreno, lo que ayuda en la reducción de deformaciones y disminuye los esfuerzos excesivos sobre la subrasante [20]

De acuerdo con las Especificaciones Generadas para la Construcción de Caminos y Puentes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (MTOPE), la finalidad de las capas granulares es proporcionar soporte estructural, mejorar la estabilidad de las vías, y ayudar al comportamiento adecuado mecánico de la vía frente a las cargas repetitivas vehiculares [20].

De igual forma, el material granular favorece el drenaje superficial de las vías, lo que disminuye la acumulación de agua dentro de las vías, cabe recalcarlo debido a que la presencia excesiva de humedad provoca pérdida de capacidad portante, deterioro superficial y reducción de la estabilidad de la vía [9].

2.2.4. Características del material de lastre

El material de lastre que se usa en las vías debe cumplir con ciertos requerimientos físicos y mecánicos que permiten garantizar un adecuado desempeño estructural y funcional, entre las principales características se encuentran la resistencia al desgaste, estabilidad granulométrica, capacidad de compactación y control de plasticidad.

Se debe cumplir con las características que se muestran a continuación:

Los agregados gruesos consistirán en partículas resistentes y durables que tengan un porcentaje de desgaste a la abrasión de 50% como máximo. Las partículas finas consistirán en una mezcla de arena y arcilla o limo, y no deberán contener material vegetal; el índice de plasticidad de la fracción que pasa el tamiz N.º 40 será como máximo de 9 y su límite líquido no será mayor de 35; la fracción que pasa el tamiz N.º 200 no deberá ser mayor que las dos terceras partes de la fracción que pasa el tamiz N.º 40 [2].

Se deberá cumplir los límites de una de las granulometrías especificadas en la Figura 6.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	A	B	C	D
3" (76.2 mm.)	100	--	--	--
2" (50.8 mm.)	80 - 100	100	--	--
1" (25.4 mm.)	55 - 85	75 - 95	100	100
3/8" (9.50 mm.)	--	--	50 - 85	60 - 100
Nº 4 (4.750 mm.)	30 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
Nº 200 (0.075 mm.)	5 - 15	5 - 15	5 - 15	5 - 20

Figura 6. Límites granulométricos para lastre

Fuente: MOP- 001-F- 2002[20]

2.2.5. Procesos constructivos del método de lastrado

Para la presente investigación se identificaron siete procesos principales correspondientes al método de lastrado, adicional al transporte y retorno diario del personal, así como la movilización inicial de la maquinaria hacia el centro geométrico de la obra. De igual manera, cada uno de los procesos definidos fue subdividido en distintos subprocesos, con la finalidad de facilitar el análisis técnico, operativo y la estimación de la huella de carbono asociada a cada etapa del método constructivo.

A continuación, se presenta la identificación de los procesos y subprocesos considerados para la ejecución del método del lastrado, detallando las actividades que intervienen en cada etapa constructiva, con el fin de establecer de manera ordenada las operaciones requeridas durante la ejecución de la obra.

2.2.5.1. Transporte de maquinaria a obra y transporte y retorno diario del personal

El transporte inicial de maquinaria es una actividad previa a la ejecución del lastrado, en este punto, se movilizan los equipos y maquinarias necesarios desde el punto de almacenamiento hasta el frente de la obra, esta fase es importante para garantizar la disponibilidad operativa de equipos como motoniveladora, rodillo, tanquero, volqueta y maquinaria de apoyo, las cuales intervienen en actividades posteriores.

De igual forma, el transporte diario del personal forma parte de las actividades necesarias para la ejecución de obras viales, en el mantenimiento rutinario de vías lastradas, el SERCOP establece que este tipo de servicio requiere la disponibilidad de mano de obra y herramientas manuales para ejecutar las actividades de mantenimiento general de la vía [21].

2.2.5.2. Reconformación de la subrasante

La reconformación de la subrasante corresponde a la preparación inicial de la superficie sobre la cual se colocará el material de lastre, durante esta actividad se restituye el perfil longitudinal, se conforma la sección transversal y se corrigen las irregularidades de la vía antes de la colocación del lastre.

2.2.5.2.1. Reconformación del perfil longitudinal

Consiste en regularizar la superficie de la vía, eliminando deformaciones, ondulaciones, y depresiones existentes, lo que permite mejorar la continuidad de la rasante y facilitar el tránsito vehicular sobre la vía intervenida.

2.2.5.2.2. Conformación de la sección transversal

Permite generar la pendiente lateral necesaria para evacuar el agua superficial de manera rápida hacia los bordes o cunetas, este aspecto es importante ya que las vías lastradas son susceptibles al deterioro debido a la presencia de agua, lo que provoca la pérdida de material, baches y reducción en la serviciabilidad de las vías [2].

2.2.5.2.3. Control de niveles y verificación geométrica

Se verifica que la superficie reconformada cumpla con las condiciones requeridas de pendiente, sección transversal y alineamiento, esta actividad se relaciona con el control técnico de la obra y permite asegurar que la vía presente la geometría adecuada antes de colocar el material de lastre.

2.2.5.3. Explotación del material de lastre

Corresponde a la obtención del material pétreo requerido para conformar la capa de rodadura, en Ecuador, el material pétreo es materia prima fundamental para la construcción de obras civiles, y su extracción en minas y canteras es considerada una actividad importante dentro del sector de la construcción [22].

2.2.5.3.1. Minado del material en cantera

El minado de material en cantera consiste en la extracción del material desde una fuente autorizada, esto se realiza mediante el uso de maquinaria pesada, durante este proceso se obtiene el volumen de material requerido de lastre para la obra vial.

2.2.5.3.2. Acopio temporal dentro de cantera

Corresponde al almacenamiento provisional del material dentro de la cantera, lo que permite organizar el material para facilitar su posterior transporte.

2.2.5.4. Transporte del material de lastre

Corresponde al transporte del material granular desde el centro de acopio en la cantera hacia la zona de intervención, lo que garantiza el abastecimiento del material necesario para conformar la capa de rodadura, además esta actividad es la que constituye el mayor consumo de combustible y por ende emisiones.

2.2.5.4.1. Cargado en volqueta

Consiste en incorporar el material previamente almacenado en la cantera al equipo de transporte mediante cargadora frontal.

2.2.5.4.2. Movilización de la volqueta llena hacia la obra

Corresponde a la movilización del material desde el centro de acopio hasta la zona de intervención, este subproceso depende de la distancia de acarreo, velocidad de operación, capacidad de carga y condiciones de la vía.

2.2.5.4.3. Descarga del material

Consiste en depositar el lastre en los puntos definidos del tramo de intervención.

2.2.5.4.4. Movilización de la volqueta hacia el centro de acopio

El retorno de la volqueta vacía permite completar el ciclo de transporte y reiniciar el proceso de cargado.

2.2.5.5. Tendido y conformación del lastre

Consiste en distribuir el material de lastre sobre la subrasante previamente reconformada, buscando alcanzar el espesor, pendiente y sección transversal requerida. Las especificaciones MOP – 001-F-2002 establecen los criterios para el material granular que se usa en capas viales, considerando granulometría, resistencia, límites de plasticidad y compactación [20].

2.2.5.5.1. Extendido del material en la subrasante

Consiste en colocar el lastre sobre la superficie previamente preparada, distribuyendo el material de manera uniforme a lo largo de cada tramo intervenido.

2.2.5.5.2. Distribución longitudinal de lastre

Consiste en repartir el material en sentido del eje vial, asegurando que la capa de lastre tenga continuidad y tratando de evitar concentraciones vacías de material.

2.2.5.5.3. Conformación de la sección transversal

Consiste en establecer la pendiente y geometría necesaria para garantizar el drenaje superficial y estabilidad de la vía.

2.2.5.6. Captación de agua en punto de abastecimiento

Corresponde al almacenamiento de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima requerida durante la compactación del lastre.

2.2.5.6.1. Movilización del tanquero hacia el punto de captación

Corresponde al recorrido desde el tramo intervenido hacia el punto de abastecimiento de agua.

2.2.5.6.2. Proceso de llenado del tanque

Se llena el tanque teniendo en cuenta su capacidad, mediante la utilización de equipos de bombeo.

2.2.5.7. Humectación

La humectación consiste en la aplicación controlada de agua sobre la superficie del material de lastre, con el fin de alcanzar las condiciones óptimas de humedad, para el posterior proceso de compactación, cuando se trabaja con material granular, la humedad influye en la densificación del material y en su capacidad para alcanzar una estructura que sea estable, para identificar la humedad óptima se realizan ensayos como el de Proctor Modificado para determinar la humedad óptima y densidad seca máxima del material [2].

2.2.5.7.1. Movilización del tanquero hacia la obra (lleno)

Corresponde al traslado del tanquero cargado desde el punto de captación hasta el tramo que requiere aplicación de agua, la cantidad de viajes que se realiza depende del volumen de agua necesario y de la capacidad de almacenamiento del tanquero.

2.2.5.7.2. Aplicación de agua sobre la vía

Se realiza mediante un tanquero cisterna con sistema de riego, lo que permite distribuir de forma uniforme el agua a lo largo de la superficie de la vía.

2.2.5.8. Compactación

La compactación es el proceso mediante el cual se densifica el material de lastre colocado sobre la vía lo que permite reducir vacíos y mejorar la resistencia mecánica. La estabilización mecánica mediante la compactación permite aumentar la resistencia al esfuerzo cortante del material pétreo y mejorar el comportamiento frente a las cargas vehiculares repetitivas, este control resulta importante para garantizar la estabilidad, durabilidad y mejorar el desempeño de la capa de rodadura [2].

2.2.6. Método de estabilización con cemento

“La estabilización del suelo es modificar o alterar las propiedades del suelo existente de tal manera que se obtenga un material que cumpla con los requisitos estructurales requeridos”[10].

En dicho contexto, la estabilización de suelos con cemento tiene como finalidad mejorar la capacidad del terreno para disipar y soportar las cargas generadas por el tráfico vehicular, así como optimizar las propiedades físicas y químicas del estrato existente.

Sin embargo, Jurado y Clavijo (2016) mencionan que no todos los suelos son aptos para procesos de estabilización, debido a que algunos presentan altos contenidos de materia orgánica, lo que genera bajos niveles de resistencia incluso después de ser estabilizados [11].

Además, los mismos autores señalan que los suelos arcillosos orgánicos con contenidos de materia orgánica superiores al 10% presentan incrementos mínimos en su resistencia a comparación con aquellos suelos cuyo contenido orgánico es inferior a dicho porcentaje [11].

Por lo que se puede concluir que los suelos arenosos (granulares) responden de manera óptima a la estabilización química con cemento, logrando con ello un incremento alto en su resistencia mecánica, mientras que para suelos arcillosos (cohesivos), la estabilización con cal se consolida como la alternativa más eficiente debido a su capacidad para modificar la plasticidad del suelo, sin menoscabar que la adición de cemento en estos últimos también aporta aumentos considerables en la capacidad portante del suelo [11].

2.2.7. Cemento

En la estabilización con cemento, dicho material es el encargado de proporcionar resistencia y durabilidad al estrato tratado. Sin embargo, en el mercado existen diferentes tipos de cemento, por lo que no todos presentan el mismo comportamiento ni las mismas prestaciones para este tipo de procedimientos.

En ese sentido, es necesario profundizar en la elección adecuada de un cemento que posea características específicas de fraguado, resistencia y desempeño mecánico, con el fin de

garantizar una adecuada estabilización y un mejor comportamiento del suelo frente a cargas vehiculares y a las diferentes condiciones ambientales.

2.2.7.1. Clasificación del cemento

Para comprender las diferentes variantes de cemento existentes, es necesario definir en primer lugar qué es el cemento. Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente por silicatos hidráulicos de calcio, los cuales fraguan y se endurecen mediante una reacción química en presencia de agua.

En el ámbito de la construcción, el cemento es utilizado en diversas áreas, razón por la cual se han desarrollado distintos tipos de cemento capaces de cumplir con criterios físicos y químicos específicos según las necesidades de cada obra. En este contexto Jurado y Clavijo (2016) mencionan que, para satisfacer dichas especificaciones existen normativas como ASTM C150, ASTM C1157 [11], [23],[24] .

La normativa ASTM C150 clasifica ocho tipos de cemento Portland [23]:

- Tipo I: Normal.
- Tipo IA: Normal con aire incluido.
- Tipo II: Moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo IIA: Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido.
- Tipo III: Alta resistencia inicial.
- Tipo IIIA: Alta resistencia inicial con aire incluido.
- Tipo IV: Bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Alta resistencia a los sulfatos.

Por otro lado, la normativa ASTM C1157, denominada Especificación de Desempeño para Cementos Hidráulicos, establece seis tipos de cemento [24]:

- Tipo GU: Uso general.
- Tipo HE: Alta resistencia inicial.
- Tipo MS: Moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo HS: Alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH: Moderado calor de hidratación.
- Tipo LH: Bajo calor de hidratación.

Asimismo, Jurado y Clavijo (2016) señalan que el tamaño de las partículas de cemento influye en gran parte en los procesos de estabilización. Los autores destacan que las partículas adecuadas para procesos de estabilización de suelos presentan tamaños comprendidos entre 0.5 y 100 micras. Con base en dichas características se selecciona el cemento tipo MH, correspondiente a un cemento de moderado calor de hidratación [11].

El cemento tipo MH se caracteriza por presentar un moderado calor de hidratación y resistencia a los sulfatos, lo que se traduce en un mayor tiempo de fraguado inicial con lo cual se puede mejorar la trabajabilidad al tener mayor tiempo para conformar el lastre

2.2.8. Proceso constructivo del método de estabilización con cemento

Para la presente investigación se identificaron diez procesos principales para la ejecución de la estabilización incluido el transporte y retorno diario del personal, así como la movilización inicial de la maquinaria hacia el centro geométrico de la obra. De igual forma, cada uno de los procesos definidos fue subdividido en distintos subprocesos, con la finalidad de facilitar el análisis técnico y operativo, así como la estimación de la huella de carbono asociada a cada etapa del método constructivo.

A continuación, se presenta la identificación de los procesos y subprocesos considerados para la ejecución del método de estabilización, detallando las actividades que intervienen en cada etapa constructiva, con el propósito de establecer de manera ordenada las operaciones requeridas durante la ejecución de la obra.

Nota: El transporte de la maquinaria por primera vez a la obra y el transporte del personal diario está descrito en el método de lastrado, por lo que en este punto no se describirá dicho apartado.

2.2.8.1. Replanteo y preparación de la subrasante

Según Llumiquinga Cumbajin (2015), “en términos generales se entenderá como replanteo al proceso de localización del eje de la carretera, inmediatamente anterior a la construcción de esta”, mientras que “la subrasante es la que define el alineamiento vertical, pues esta subrasante depende de la topografía del terreno”[25].

2.2.8.1.1. Reconocimiento del área

El reconocimiento del área constituye el punto de partida del proyecto, ya que nos permite identificar las vías en las que se ejecutarán los trabajos, determinar la maquinaria que puede ingresar a la zona y analizar las posibles áreas de captación de agua. Durante esta primera visita se realiza una inspección visual del sector y se toman apuntes técnicos relacionados con las condiciones existentes del área de estudio.

2.2.8.1.2. Colocación de las estacas laterales

Con el fin de contar con una mejor referencia en campo, se procede a la colocación de estacas que permitirán realizar un adecuado marcado de las laterales de la vía. La instalación de las estacas se deberá efectuar de manera manual, respetando el espaciamiento previamente establecido que por lo general es de 20 metros entre cada punto de referencia en el caso de rectas y de 10 metros en el caso de curvas.

2.2.8.1.3. Ubicación y marcado de los ejes del terreno

En esta etapa se define y delimita el área de intervención siguiendo los diseños previamente establecidos, además se realiza el replanteo de los ejes mediante el uso de cal, con la finalidad

de marcar y definir las áreas específicas donde se llevarán a cabo las actividades de estabilización.

2.2.8.1.4. Control de niveles y marcado de cotas

Se verifica que los niveles del terreno se encuentren conforme a los diseños previamente establecidos, comprobando además que las cotas iniciales y finales coincidan con los niveles obtenidos en la etapa del levantamiento topográfico.

2.2.8.2. Escarificación y nivelación del suelo existente

La escarificación del suelo consiste en desmenuzar el material existente hasta obtener una textura homogénea del suelo que permita una adecuada mezcla con el cemento, mientras que la nivelación garantiza un espesor uniforme de la capa a estabilizar.

2.2.8.2.1. Escarificación del suelo

La escarificación corresponde al proceso de remover y aflojar la capa superficial del terreno. Generalmente esta actividad se realiza a profundidades comprendidas entre los 15 y 20 cm, con el objetivo de romper la estructura compacta del suelo y prepararlo para una nueva compactación o para la incorporación de agentes estabilizantes.

2.2.8.2.2. Nivelación del suelo

La nivelación del suelo es el proceso de cortar los puntos altos o rellenar los puntos más bajos del suelo para conseguir una superficie plana, uniforme y con pendiente en base al diseño establecido.

2.2.8.3. Humectación y compactación primaria

La humectación consiste en incorporar agua al terreno en función de los requerimientos analizados previamente, con la finalidad de alcanzar un contenido de humedad cercano al óptimo. Para determinar dicho contenido, se tomó como referencia las tesis de Jara (2024) y Mejía (2024) [4][7].

Una vez alcanzado y homogenizado el rango de humedad óptima, se procede con la compactación primaria, con la finalidad de garantizar la máxima densidad posible del suelo y asegurar un adecuado comportamiento estructural del material estabilizante.

2.2.8.3.1. Movilización del tanquero vacío a la zona de captación

Se considera que el camión cisterna se encuentra ubicado en el centro de gravedad de la obra, por lo que se debe movilizar hacia la zona de captación de agua para abastecerse y posteriormente iniciar con el riego presurizado requerido para la humectación del terreno.

2.2.8.3.2. Utilización de la motobomba

Corresponde al proceso mediante el cual se realiza la captación e impulsión del agua desde la fuente de abastecimiento hacia el camión cisterna. Este procedimiento permite garantizar el

suministro continuo de agua necesario para cubrir con la humedad óptima que necesita el terreno para empezar con la estabilización.

2.2.8.3.3. Movilización del tanquero cargado al centro de gravedad

Una vez que el tanquero alcanza su capacidad máxima de almacenamiento, el mismo procede a moverse hacia el centro geométrico de la obra, con la finalidad de ejecutar la etapa correspondiente al riego presurizado.

2.2.8.3.4. Aplicación de agua en la subrasante

La aplicación del agua en la subrasante corresponde al proceso de riego controlado sobre la superficie previamente escarificada y nivelada, con el objetivo de incrementar el contenido de humedad del suelo hasta alcanzar la humedad óptima de compactación.

En esta actividad se emplea un sistema de riego presurizado, permitiendo con ello distribuir el agua de manera uniforme sobre el área de trabajo.

2.2.8.3.5. Compactación primaria

“La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto unas con otras, mediante la reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades mecánicas”[26].

La etapa de compactación primaria es fundamental para preparar la subrasante antes de la incorporación del agente estabilizante, garantizando con ello las condiciones adecuadas para el correcto desarrollo de la estabilización.

2.2.8.4. Distribución del cemento sobre la subrasante

La distribución del cemento sobre la subrasante corresponde al proceso de incorporación del agente estabilizante sobre la superficie previamente preparada y compactada. Esta actividad tiene como objetivo garantizar una dosificación uniforme del cemento en toda el área de trabajo, todo en función de la densidad del suelo, con el propósito de colocar la cantidad exacta de cemento requerida por el diseño de estabilización.

En este proceso pueden aplicarse dos métodos de distribución de cemento. El primer método corresponde al mecanizado, el cual utiliza como máquina principal un espaciador mecánico de cemento. El segundo método se realiza de forma manual, mediante el transporte de cemento en sacos por medio de un camión de carga, dejando con ello que el personal de obra distribuya el material por tramos sobre la superficie de trabajo.

Se debe tener en cuenta que la distribución del cemento se efectúa mediante una dispersión controlada sobre la subrasante, respetando las cantidades establecidas en el diseño de estabilización. Una distribución homogénea es fundamental para evitar variaciones en la resistencia y en el comportamiento del material estabilizado, asegurando con ello un adecuado desempeño estructural de la vía.

2.2.8.4.1. Transporte del material por medio de un camión silo para cemento a granel

Consiste en transportar el cemento a granel desde la planta de producción hasta la obra mediante un vehículo de transporte (Mamut andino).[27]

2.2.8.4.2. Transporte del material por medio de un camión de carga para cemento en sacos

Cosiste en transportar el cemento en sacos desde la planta de producción hasta la obra mediante un vehículo de transporte (Camión de carga)

2.2.8.4.3. Distribución del cemento de forma mecanizada

La distribución del cemento de forma mecanizada consiste en la aplicación controlada del material estabilizante sobre la subrasante, mediante el uso de un espaciador mecánico de cemento. Este procedimiento permite dosificar el cemento de manera uniforme sobre toda el área de trabajo, garantizando así una adecuada homogenización y cumpliendo con las cantidades ya establecidas.

2.2.8.4.4. Distribución del cemento de forma manual

Por otro lado, la distribución del cemento de forma manual consiste en la colocación del material estabilizante sobre la subrasante mediante el uso de mano de obra. Este procedimiento se realiza distribuyendo el material por tramos, el personal encargado coloca y dispersa el cemento de manera uniforme sobre la superficie ya preparada procurando evitar acumulaciones o zonas con déficit de material.

2.2.8.5. Mezclado suelo – cemento (en seco)

Corresponde al proceso de homogenización del cemento distribuido sobre la subrasante con el suelo previamente escarificado, sin incorporar agua adicional. El objetivo principal de este procedimiento es integrar el agente estabilizante en toda la masa del suelo. Dicho procedimiento se realiza con maquinaria especializada (motoniveladora) puesto que la misma permite obtener una composición uniforme en todo el espesor de estabilización.

2.2.8.6. Adición de agua y mezclado húmedo

La incorporación de agua y mezclado húmedo corresponde al proceso mediante el cual se añade agua a la mezcla de suelo - cemento previamente homogenizado en seco. La aplicación del agua se realiza mediante riego controlado utilizando tanqueros con riego presurizado, tomando en cuenta que se debe colocar el agua con la finalidad de activar las propiedades químicas del cemento.

Nota: Este apartado comprende las actividades de movilización del tanquero vacío hacia la zona de captación, utilización de motobomba, transporte del tanquero lleno hacia el centro geométrico de la obra y aplicación de agua sobre la subrasante, mismas que ya fueron detalladas en el apartado 2.2.8.3.

2.2.8.6.1. Mezclado y activación del agua con el cemento

El mezclado y activación del cemento con el agua corresponde al proceso mediante el cual el agua incorporada entra en contacto con las partículas de cemento distribuidas en el suelo, iniciando así con las reacciones hidráulicas responsables del fraguado y endurecimiento del suelo.

Esta actividad se realiza mediante la utilización de una motoniveladora para homogenizar el suelo, cemento y agua, permitiendo con ello que el agente estabilizante se distribuya y active de forma uniforme en toda la masa del material tratado.

2.2.8.7. Conformación y perfilado de la capa estabilizada

La conformación y el perfilado de la capa estabilizada corresponde al proceso de ajuste y modelado de la superficie tratada, con el objetivo de cumplir con las dimensiones, pendientes y niveles establecidos en el diseño vial. Esta etapa se realiza una vez finalizado el mezclado y activación del suelo - cemento.

2.2.8.8. Compactación final de la capa estabilizada

La compactación final corresponde al proceso de densificación definitiva de la mezcla de suelo – cemento, mismo que es realizado una vez que se concluya la etapa de conformación y perfilado de la superficie. La misma tiene como objetivo alcanzar la densidad y resistencia especificada en el diseño de estabilización.

Este proceso se ejecuta mediante la implementación de equipos de compactación como lo es el rodillo liso, aplicando varias pasadas sobre la capa estabilizada hasta lograr una compactación uniforme en toda el área de trabajo y lograr con ello reducir el índice de vacíos para mejorar la adherencia entre las partículas del suelo y el cemento hidratado.

2.2.8.9. Curado y protección de la capa estabilizada

El curado y protección de la capa estabilizada consiste en evitar la pérdida acelerada de humedad de la superficie tratada, ya que esto podría afectar al proceso de fraguado y disminuir la resistencia final del material. Por ello, se realiza una aplicación periódica de agua mediante riego controlado por siete días.

Asimismo, se restringe el tránsito vehicular y la circulación de maquinaria pesada sobre la capa estabilizada mientras dure el curado, con la finalidad de prevenir deformaciones, fisuras o daños prematuros en la superficie tratada.

2.2.9. Huella de carbono en los procesos de estabilización de subrasante

La huella de carbono durante el proceso de estabilización corresponde a la cantidad de emisiones de CO₂ generadas durante la ejecución de las distintas actividades constructivas requeridas para el mejoramiento de las vías no pavimentadas mediante la aplicación de un agente estabilizante que en este caso es el cemento o de la adición de un material pétreo como es el lastre [17].

Durante este proceso, las principales fuentes de emisiones de CO₂ se encuentran asociadas directamente al uso de la maquinaria pesada y a la fabricación de los materiales empleados en obra.

En el caso del lastre, la maquinaria interviene en los diferentes subprocesos requeridos para la ejecución de la estabilización y representa la mayor carga de CO₂, mientras que, en el caso de la estabilización con cemento, la mayor contribución de huella de carbono proviene de la fabricación y transporte del agente estabilizante, debido al alto consumo energético y las emisiones generadas durante el proceso de su fabricación.

Para el método de estabilización con un agente estabilizante, León & Guillén-Mena (2020) realizaron una investigación sobre la huella de CO₂ que se produce al crear el cemento en el Ecuador y determinaron que dicho procedimiento se divide en dos subsistemas: la producción de Clinker y la molienda / despacho de cemento [13].

El analizar estos dos subprocesos permitió identificar que la mayor carga contaminante proviene de la calcinación de la caliza y la combustión de fósiles al horno, por lo que en la Figura 7 se puede observar la cantidad de energía total consumida y las emisiones de CO₂ para una tonelada de cemento [13].

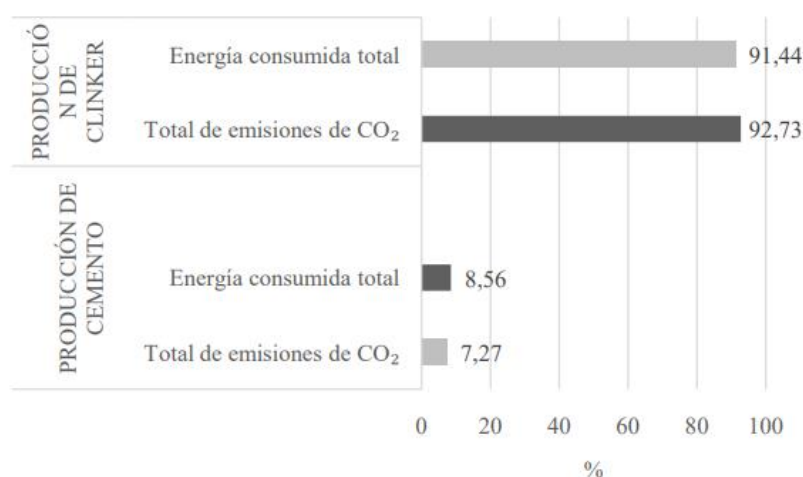


Figura 7 Comparación porcentual del consumo energético y emisiones de CO₂ en la producción de Clinker y Cemento

Por otro lado, León & Guillén-Mena (2020) analizaron el desglose de los subsistemas en procesos unitarios e identificaron que la clinkerización es la etapa de mayor impacto en huella de CO₂, aportando un 87% de las emisiones totales del sistema por lo que en la Tabla 3 se observa la cuantificación del consumo energético y emisiones de CO₂ de cada proceso unitario [13].

Tabla 3

Cuantificación del consumo energético y emisiones de CO₂ de cada proceso unitario en el límite de la planta de cemento [13].

Subsistema	Proceso unitario	Consumo de energía (MJ/t)	Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /t)
CLINKER	1. Trituración	24.48	2.89
	2. Pre - homogenización	4.44	0.64
	3. Molino de Crudo	115.22	21.24
	4. Homogenización del crudo	24.14	4.45
	5. Clinkerización (combustible)	2750.59	215.27
	5. Clinkerización (proceso industrial)		228.98
	Total, Subsistema 1	2918.87	473.47
CEMENTO	5. Molienda de cemento	262.53	35.16
	6. Despacho de cemento	10.55	1.94
	Total, del Subsistema 2	273.08	37.10
TOTAL, SISTEMA		3191.95	510.57

Gracias a dicha información se concluye que el factor de huella de CO₂ para la producción de una tonelada de cemento es de 510.57 Kg de CO₂, considerando únicamente un análisis “puerta a puerta”, es decir, sin incluir las emisiones generadas al transportar el cemento desde la fábrica hasta la obra.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de investigación

La presente investigación presenta un enfoque cuantitativo, debido a que se basa principalmente en la recopilación, procesamiento y análisis numérico de los equipos, mano de obra, materiales y herramienta menor que generan emisiones de dióxido de carbono durante la ejecución de procesos constructivos viales [28].

La cuantificación de las emisiones se realiza mediante factores de emisión específicos para cada recurso, permitiendo con ello determinar la huella de carbono asociada a cada alternativa constructiva analizada. De forma general, la huella de carbono total de cada método constructivo (lastrado y estabilización de subrasante con cemento) se determina empleando la siguiente ecuación:

$$HCO2_{Total} = HCO2_{Equipos} + HCO2_{Material} + HCO2_{Mano\ de\ obra} + HCO2_{Herramienta\ menor}$$

Donde:

$$HCO2_{Total} = \text{Huella de carbono total del proceso constructivo (Kg CO}_2 / m^2\text{)}$$

$$HCO2_{Equipos} = \text{Emisiones generadas por la operación, transporte y fabricación de maquinaria. (Kg CO}_2 / m^2\text{)}$$

$$HCO2_{Material} = \text{Emisiones generadas por la producción, transporte y utilización de los materiales empleados. (Kg CO}_2 / m^2\text{)}$$

$$HCO2_{Mano\ de\ obra} = \text{Emisiones asociadas al personal involucrado en la ejecución de las diferentes actividades constructivas. (Kg CO}_2 / m^2\text{)}$$

$$HCO2_{Herramienta\ menor} = \text{Emisiones derivadas de la fabricación y uso de herramientas menores. (Kg CO}_2 / m^2\text{)}$$

Previo a la aplicación de la ecuación general, cada componente es calculado de forma independiente mediante ecuaciones específicas basadas en consumos de combustible, tiempos de operación, cantidades de materiales empleados en obra y factores de emisión correspondientes a cada fuente de emisión analizada.

La ecuación general propuesta para la estimación de la huella de carbono se fundamenta en el principio de aditividad empleado en los inventarios de gases de efecto invernadero, según el cual las emisiones totales de un sistema corresponden a la suma de las emisiones generadas por cada fuente o categoría analizada. Este enfoque es consistente con las metodologías de cuantificación de emisiones propuestas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2023), donde las emisiones totales se obtienen mediante la agregación de las contribuciones individuales de cada fuente emisora de CO₂ [3].

De igual forma, se presenta un análisis comparativo, debido a que se estudian dos métodos constructivos: lastrado y estabilización con cemento, con el objetivo de identificar las diferencias entre ambas alternativas y analizar la mejor opción constructiva, es decir la menos contaminante.

3.2. Tipo de investigación

La investigación que se presenta es de tipo aplicada, descriptiva, debido a que se busca analizar y comparar las emisiones de huella de carbono que se producen en procesos constructivos viales, así mismo, es descriptiva ya que se analizan características operativas de cada método constructivo, identificando los distintos componentes que producen CO₂ durante la ejecución de cada proceso [28].

Finalmente, la investigación se desarrolla bajo la modalidad de estudio de caso, aplicando específicamente a las vías Alao – Pungalá, y Cascada Puelazo – Bocatoma.

3.3. Esquema metodológico

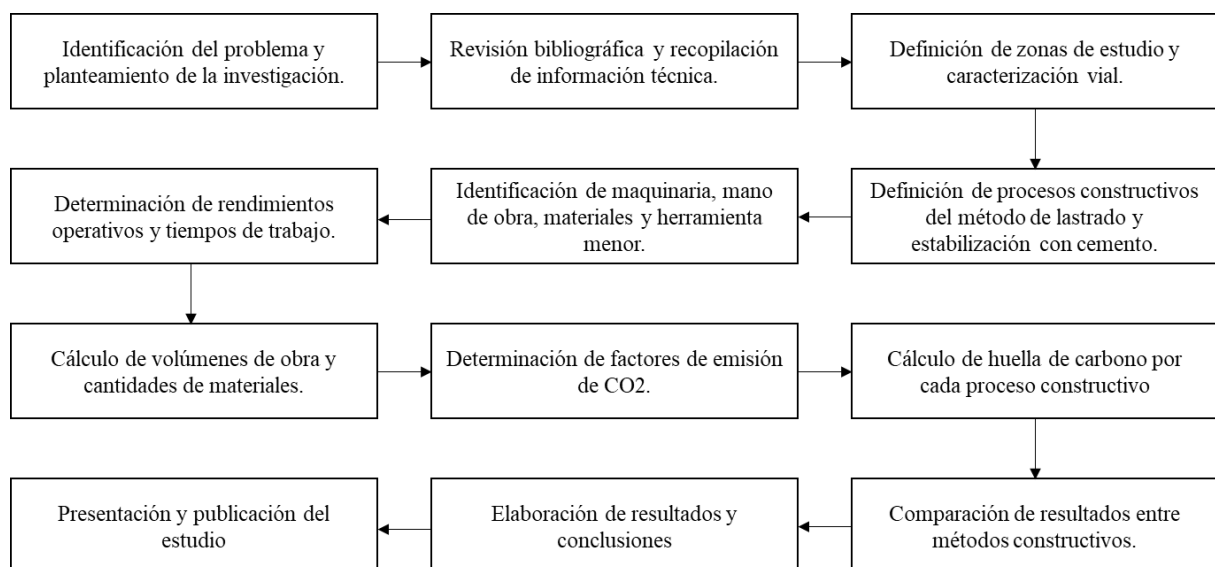


Figura 8. Esquema metodológico

3.4. Fuentes de información y criterios de selección

Para el desarrollo de la investigación se emplean diferentes fuentes de información relacionadas con construcción vial, maquinaria pesada, factores de emisiones de gases de efecto invernadero y análisis de huella de carbono (CO₂).

Las principales fuentes usadas son las siguientes:

- Artículos científicos.
- Tesis de grado.
- Normativa técnica relacionada con obras viales-
- Fichas técnicas y catálogos de maquinaria pesada.

- Factores oficiales de emisiones de CO₂.
- Información obtenida durante recorridos de campo.

La selección de la información se realiza mediante criterios de confiabilidad, datos actualizados, aplicabilidad técnica y la relación directa con procesos constructivos viales similares a los presentados en la siguiente investigación.

Adicional a esto, con relación a la obtención de los factores de emisión se emplean documentos oficiales y antecedentes bibliográficos relacionados con emisiones generadas por combustibles fósiles, emisiones generadas por el ser humano, por producción de materiales y herramienta menor, en este último caso principalmente el producido por el acero.

3.5. Método de análisis

3.5.1. Definición del alcance de estudio

Se definen las vías que se analizan, los métodos constructivos aplicados y los límites considerados para la estimación de la huella de carbono (CO₂).

El análisis realizado incluye las emisiones generadas por maquinaria, mano de obra, herramienta menor y materiales empleados durante la ejecución de cada método estudiado.

3.5.2. Área, volúmenes y cantidades de obra

Se establece los tramos de estudio correspondientes a las vías Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma, para ambas vías se considera un ancho uniforme de calzada de 6m, valor necesario para determinar el área total de intervención

$$A = b * l$$

Donde:

A: área de la vía (m²)

b: ancho de la vía (m)

l: longitud de la vía (m)

De igual forma, para el cálculo del volumen necesario de lastre se considera un factor de compactación de 30%, considerando que durante el proceso de extracción. Carga, transporte, extendido y compactación, el material granular presenta variaciones volumétricas debido a la pérdida de densidad y por la presencia de vacíos, este porcentaje es comúnmente usado en movimiento de tierra y materiales granulares para compensar la reducción volumétrica que ocurre durante la compactación y de este modo se garantiza que cuando el material este densificado se alcance el espesor final de diseño requerido en la capa de rodadura. para cuando se compacte se tenga el espesor requerido [20][29].

- **Cantidad de agua necesaria**

La estimación de agua necesaria para alcanzar las condiciones óptimas de compactación se realiza a partir de propiedades físicas del suelo con las características operativas del sistema de humectación, el procedimiento permite determinar el volumen de agua necesario por metro cuadrado de vía, el consumo de agua por metro lineal y la longitud de cobertura que cubre cada recarga del tanquero. La Tabla 4 presenta las ecuaciones utilizadas en cada etapa del cálculo.

Tabla 4
Metodología para la determinación de la cantidad de agua necesaria

Etapas	Ecuación	Descripción
1. Determinación de la masa de agua requerida	$W = \gamma d * w$	Cálculo de la masa de agua necesaria por metro cúbico de suelo a partir de la densidad seca máxima y la humedad óptima del material.
2. Conversión a volumen de agua	$V_{agua} = \frac{W}{1000}$	Conversión de la masa de agua requerida a volumen, considerando una densidad de agua de 1000 kg/m ³ .
3. Determinación del volumen de suelo por unidad de área	$V_{suelo} = e * 1m2$	Cálculo del volumen de suelo contenido en un metro cuadrado de superficie para el espesor analizado.
4. Determinación del volumen de agua por unidad de área	$\frac{V_{agua}}{m2} = \frac{V_{agua}}{m3} * e$	Volumen de agua necesario por metro cuadrado de vía.
5. Conversión a litros	$Q_{agua} = \frac{V_{agua}}{m2} * 1000$	Conversión del volumen de agua requerido a litros por metro cuadrado.
6. Consumo de agua por metro lineal de vía	$Q_{ml} = \frac{V_{agua}}{m2} * b$	Determinación del volumen de agua necesaria por metro lineal de vía considerando el ancho de aplicación.
7. Capacidad útil del tanquero	$C_{util} = C * (1 - d)$	Cálculo de la capacidad efectiva del tanquero considerando pérdidas y desperdicios durante la operación.
8. Longitud cubierta por recarga	$L = \frac{C_{util}}{Q_{ml}}$	Determinación de la longitud de vía que puede humectarse con una carga completa del tanquero.
9. Número de recargas necesarias	$Q_{agua} = \frac{L_T}{L}$	Determinación del número de recargas necesarias para humectar el tramo.

Donde:

W: masa de agua requerida (kg/m³)

γd : densidad seca del suelo (kg/m³)

w: humedad óptima (% decimal)

V agua: volumen de agua requerido (m³/m³)

e: espesor de la capa (m)

Q agua: consumo de agua (l/m²)

Q ml: consumo de agua por metro lineal (l/ml)

b: ancho de aplicación (m)

C: capacidad del tanque (litros)

d: porcentaje de pérdidas

C útil: capacidad efectiva del tanqueo (l)

L: longitud de vía cubierta por recarga (m)

Lt: longitud del tramo (m)

- Ejemplo de cálculo de agua necesaria para el tramo 1 de la vía Alao – Pungalá para un espesor de 0.10 metros.

Donde se tiene que:

Lt: 6834 m

γ_d : 1488 kg/m³

w: 22.80 %

b: 3.50 m

C útil: 18930 litros

d: 5%

Densidad del agua: 1000 kg/m³

e: 0.10 m

1. Determinación de la masa de agua requerida

$$W = \gamma_d * w$$

$$W = 1488 * 0.228$$

$$W = 339.264 \text{ kg/m}^3$$

2. Conversión a volumen de agua

$$V_{\text{agua}} = \frac{W}{1000}$$

$$V_{agua} = \frac{339.264}{1000}$$

$$V_{agua} = 0.3392 \text{ m}^3$$

3. Determinación del volumen de suelo por unidad de área

$$V_{suelo} = e * 1 \text{ m}^2$$

$$V_{suelo} = 0.1 * 1 \text{ m}^2$$

$$V_{suelo} = 0.10 \text{ m}^3$$

4. Determinación del volumen de agua por unidad de área

$$\frac{V_{agua}}{\text{m}^2} = \frac{V_{agua}}{\text{m}^3} * e$$

$$\frac{V_{agua}}{\text{m}^2} = 0.3392 * 0.10$$

$$\frac{V_{agua}}{\text{m}^2} = 0.03392 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

5. Conversión a litros

$$Q_{agua} = \frac{V_{agua}}{\text{m}^2} * 1000$$

$$Q_{agua} = 0.03392 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} * 1000$$

$$Q_{agua} = 33.926 \text{ l/m}^2$$

6. Consumo de agua por metro lineal de vía

$$Q_{ml} = \frac{V_{agua}}{\text{m}^2} * b$$

$$Q_{ml} = 33.926 * 3.5$$

$$Q_{ml} = 118.74 \frac{\text{l}}{\text{ml}}$$

7. Capacidad útil del tanquero

$$C_{\text{útil}} = C * (1 - d)$$

$$C_{\text{útil}} = 18930 * (1 - 0.05)$$

$$C_{\text{útil}} = 17983.5 \text{ l}$$

8. Longitud cubierta por recarga

$$L = \frac{C_{\text{útil}}}{Q_{ml}}$$

$$L = \frac{17983.5}{118.74}$$

$$L = 151.45 \text{ m}$$

9. Número de recargas necesarias

$$Q_{agua} = \frac{L_T}{L}$$

$$Q_{agua} = \frac{6834}{151.45}$$

$$Q_{agua} = 45.12 \approx 46 \text{ recargas}$$

• Cantidad de cemento empleado

El consumo de cemento en los procesos de estabilización de subrasante está directamente relacionado con la dosificación establecido en el diseño de estabilización, el mismo depende directamente de las características geotécnicas del suelo y del porcentaje óptimo de estabilizante requerido para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

Jara Páez (2024) para la vía de Alao – Pungalá evaluó distintos porcentajes de cemento para determinar finalmente una dosificación de cemento óptima, mientras que Mejía Gallegos (2024) para la vía de Cascada de Puelazo – Bocatoma propuso dosificaciones generales como se expresa en la TABLA 5. [4] [7]:

Tabla 5

Dosificaciones propuestas y óptimas por tramos en las vías Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma.

Vía	Tramo	Distancia (m)	Dosificaciones propuestas	Dosificación óptima
Alao – Pungalá	1	6843	3%, 4%	3%
	2	3865	2%, 4%	2%
	3	767	4%, 4%	4%
	4	2325	2%, 4%	2%
Cascada de Puelazo - Bocatoma	1	15000	2%, 4%, 6%	2%

Una vez definidas las dosificaciones óptimas de cemento con base en los estudios realizados por los autores antes mencionados, se procede a calcular la cantidad de cemento requerida para cada tramo de vía empelando la metodología explicada en la Tabla 6:

Tabla 6

Metodología para la determinación de la cantidad de cemento requerido.

Etapas	Ecuación	Descripción de las variables
1. Determinación del volumen del suelo	$V = D \times A \times E$	V = Volumen del tramo a estabilizar (m³) D = Longitud del tramo a estabilizar (m) A = Ancho de la vía (m) E = Espesor de la capa de estabilización (m)

2. Determinación del peso del suelo	$P = V \times D_s$	P = Peso del suelo a estabilizar (kg) V = Volumen del tramo a estabilizar (m3) D_s = Densidad del suelo (kg/m3)
3. Determinación de la cantidad de cemento necesaria	$C = P \times \%D$	C = Cantidad de cemento requerida (kg) P = Peso del suelo a estabilizar (kg) % D = porcentaje de cemento adoptado en el diseño de estabilización

Mediante la implementación de la metodología antes descrita, se obtiene la cantidad total de cemento necesaria para cada tramo de vía. En la Tabla 7 se presenta el cálculo detallado de la cantidad de cemento requerida para la estabilización de la subrasante:

Tabla 7

Dosificación en peso de cemento según las propiedades físicas y geométricas de la vía Alao – Pungalá

Vía	Tramo	Densidades del suelo Kg/m3	Distancia m	Ancho m	Espesor m	Volumen m3	Peso del suelo Kg	Porcentaje de cemento %	Cemento necesario Kg
Alao – Pungalá	1	1488	6843	6	0,2	8211,6	12218860,8	3%	366565,82
	2	1912	3865	6	0,2	4638	8867856	2%	177357,12
	3	1431	767	6	0,2	920,4	1317092,4	4%	52683,69
	4	1693	2325	6	0,2	2790	4723470	2%	94469,4
Cascada de Puelazo	1	1830	15000	6	0.2	18000	32940000	2%	658800

• Cantidad de cal empleado

Para determinar la cantidad de cal requerida para el subproceso: replanteo de la vía, se considera que el material se aplicará en tres líneas longitudinales con una distancia igual al tramo de estabilización y ancho uniforme de 5 cm.

Al ya tener definida las dimensiones de marcado, es necesario establecer la densidad de la cal. Amaya Navarrete (2017) señala que la densidad aparente de la cal puede variar entre 450 y 640 Kg/m3, por lo que para la presente investigación se adopta un valor de 550 kg/m3. En la Tabla 8 se detalla el procedimiento para determinar la cantidad de cal total que se empleará en el subproceso antes mencionado [30].

Tabla 8

Metodología para la determinación de la cantidad de cal requerido.

Etapa	Ecuación	Descripción de las variables
1. Determinación de la cantidad de cal para un metro lineal	$C = D_{cal} \times A \times E$	C = Cantidad de cal requerida por metro lineal (Kg/m) D_{cal} = Densidad de la cal (kg/m3) A = Ancho de la línea de marcado (m) E = Espesor de la capa de cal (m)

2. Determinación de la longitud a cubrir con un Kg de cal	$C_{Kg} = \frac{1}{C}$	C_{Kg} = Longitud que puede cubrirse con 1 Kg de cal (m/kg) C = Cantidad de cal requerida por metro lineal (Kg/m)
3. Determinación de la cantidad total de la requerida	$C_T = \frac{3 \times Lt}{C_{Kg}}$	C_T = Cantidad total de la requerida para el replanteo (Kg) Lt = Longitud total de la vía a estabilizar (m) C_{Kg} = Longitud que puede cubrirse con 1 Kg de cal (m/kg)

3.5.3. Definición de procesos constructivos y recursos operativos

Para cada método constructivo que se analiza, se define los procesos y subprocesos necesarios para la ejecución de las actividades de mejoramiento vial, de igual forma, se identifican los recursos operativos requeridos en cada etapa, como se menciona anteriormente, incluye maquinaria y equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales.

Esta planificación permite establecer la secuencia operativa de trabajo y determinar los recursos necesarios para el análisis de rendimientos, tiempos de ejecución y estimaciones de CO₂ que están asociadas a cada proceso y subproceso constructivo.

3.5.4. Análisis de rendimiento y tiempo operativo de maquinaria

Se establecen los rendimientos operativos de la maquinaria que interviene en cada actividad y subactividad. A partir de dichos rendimientos es posible calcular el tiempo total de utilización de cada equipo, expresado en horas de trabajo, parámetro indispensable para cuantificar el consumo de combustible y, por ende, las emisiones de dióxido de carbono asociadas.

La Tabla 9 resume las fórmulas empleadas para determinar los rendimientos operativos de la maquinaria, sus respectivas unidades de medida y las ecuaciones utilizadas para calcular el tiempo total de trabajo requerido en el proceso de estabilización de la subrasante mediante la aplicación de lastre o cemento.

Cabe recalcar que la información utilizada para determinar los rendimientos operativos fue obtenida a partir de las fichas técnicas de las respectivas maquinarias y equipos, así como de investigaciones y tesis desarrolladas por diversos autores, en las cuales se establecen rendimientos de equipos similares a los empleados en la presente investigación. Esta combinación de fuentes permitió adoptar valores técnicamente fundamentados y representativos de las condiciones reales de trabajo en obra.

Por esta razón, en el apartado ANEXO – CAPITULO II - Análisis de rendimientos de la maquinaria empleada en obra, se presenta de manera detallada la metodología empleada para el cálculo de los rendimientos de los equipos. En dicho capítulo se describen las variables consideradas, factores de eficiencia operativa, la capacidad de la maquinaria y en ciertos casos la potencia a la que trabajan.

Tabla 9

Resumen de las fórmulas empleadas para determinar los rendimientos operativos y el tiempo total de trabajo de la maquinaria y los equipos utilizados en el proceso constructivo

Maquinaria	Rendimiento	Unidad	Tiempo (horas)
Tractocamión con cama baja (cargado)	$R_c = \frac{t_c}{E * 60}$	(h/viaje)	$T_{total} = (R_c + R_v) * N$
Tractocamión con cama baja (vacío)	$R_v = \frac{D}{E}$	(h/viaje)	
Tanquero de agua	$R = \frac{t_c}{E}$	(h/viaje)	$T_{TOTAL} = R * N$
Camioneta	-	-	$T_{total} = \frac{d}{V * 0.83} * N_{viajes}$
Camioneta para inspección	$R = \frac{D * av}{T_c} * 60$	(m ² /h)	$T_{total} = \frac{T_c * N_{puntos}}{60}$
Motoniveladora	$R = \frac{60 * f * i * l * t}{m}$	(m ³ /h)	$T_{total} = \frac{L * Av}{R}$
Equipo topográfico	$R = \frac{Lest * E}{Tm}$	(m ² /h)	$T_{total} = \frac{L * Av}{R}$
Excavadora	$R = \frac{3600 * C * E * f}{tc}$	(m ³ /h)	$T_{total} = \frac{1}{R} * V_{total}$
Volqueta	$R = \frac{C * k * E}{tc}$	(m ³ /h)	$T_{total} = \frac{1}{R} * V_{total}$
Cargadora frontal	$R = \frac{60 * Q * k * E}{tc}$	(m ³ /h)	$T_{total} = \frac{1}{R} * V_{total}$
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización vacía)	$R = \frac{tc}{E}$	(h/viaje)	$T_{total} = R * N$
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización llena)	$R = \frac{tc}{E}$	(h/viaje)	$T_{total} = R * N$
Motobomba (captación de agua)	$R = \frac{C}{tc * c.a.}$	(m ² /h)	$T_{total} = \frac{1}{R} * \text{Área}$
Tanquero cisterna con sistema de riego (humectación)	$R = \frac{3600 * n}{V * 1000 * a}$	(h/m ²)	$T_{total} = R * \text{Área}$
Rodillo compactador vibratorio	$R = \frac{60 * V * B * i}{Z}$	(m ² /h)	$T_{total} = \frac{L * Av}{R}$
Camión silo con carga	-	-	$T_{total_c} = \frac{T_{i\text{ silo c}} + T_c + T_m}{E}$
Camión silo sin carga	-	-	$T_{total_v} = \frac{T_{i\text{ silo v}} + T_c + T_m}{E}$
Camión de carga con cemento	-	-	$T_{total_c} = \frac{T_{i\text{ camión c}} + T_c + T_m}{E}$
Camión de carga sin cemento	-	-	$T_{total_v} = \frac{T_{i\text{ camión vacío}}}{E}$
Espaciador mecánico de cemento	$R = Av * V * i$	(m ² /h)	$T_{total} = \frac{L * Av}{R}$

3.5.5. Determinación de emisiones de CO₂ asociadas a maquinaria

Para realizar la estimación de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas por la operación de maquinaria y equipo durante cada proceso constructivo, se emplea una metodología basada en el consumo de combustible y en el factor de emisión correspondiente al tiempo de combustible utilizado.

La cuantificación de la huella de carbono se determina mediante la siguiente expresión:

$$CO_2 = t * c * f.e.$$

Donde:

CO₂= emisión de huella de carbono (kg)

t: tiempo de operación de la maquinaria (horas)

c: consumo de combustible (litros /horas)

f.e.: factor de emisión de CO₂ por cada litro de combustible consumido (kg de CO₂ / litros)

El tiempo total de operación se determina a partir de los rendimientos y tiempos de cada actividad constructiva

Por otro lado se consideró el consumo de combustible de cada equipo involucrado en los distintos procesos constructivos analizados, el valor de consumo de combustible se expresa en litros por hora (l/h) y se emplea posteriormente en la ecuación general del cálculo de huella de carbono operacional, debido a la variabilidad existente entre marcas, modelos, potencia del motor y otras condiciones de operación y estado mecánico de los equipos, los valores adoptados para cada maquinaria representan consumos promedio obtenidos a partir de fichas técnicas de fabricantes, catálogos comerciales de maquinaria y antecedentes bibliográficos.

En consecuencia, los consumos de combustible considerandos en la presente investigación constituyen parámetros de referencia para el análisis de las emisiones de CO₂ producidas por cada maquinaria y equipo como se observa en la Tabla 10.

Cabe recalcar que en el ANEXO – CAPÍTULO II - Análisis de rendimiento de la maquinaria empleada en obra, se presentan las características técnicas de cada equipo considerado en la investigación. Entre los parámetros analizados se incluyen la capacidad operativa, potencia de la maquinaria en el caso de ser necesaria, peso, dimensiones, y demás especificaciones relevantes, las cuales fueron obtenidas a partir de fichas técnicas, manuales de uso, y documentos proporcionados por los fabricantes.

Tabla 10

Consumo de combustible de la maquinaria empleada para el análisis de los procesos de estabilización de subrasante.

Maquinaria	Actividad operativa	Consumo de combustible (l/h)
Tractocamión con cama baja (cargado)	Transporte de maquinaria	45
Tractocamión con cama baja (vacío)	Transporte de maquinaria	22
Tanquero de agua	Transporte por primera vez a obra	8.34
Camioneta	Movilización del personal	2.5
Motoniveladora	Reconformación de subrasante	17.4

Excavadora	Extracción de material	18
Volqueta	Transporte de material	20
Cargadora frontal	Cargado de material	18
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización vacía)	-	5.56
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización llena)	-	8.5
Motobomba (captación de agua)	Captación de agua	1.2
Tanquero cisterna con sistema de riego (humectación)	-	18.5
Rodillo compactador	Compactación	11

Los factores de emisión usados en el cálculo de emisiones de CO₂ se toman del documento Intensidad energética del Ecuador y estimación de la huella de carbono (2017), publicado por la Universidad Técnica de Machala, empleado específicamente los valores correspondientes al consumo de diésel, en donde se adopta un valor de 2.677 kg de CO₂/ litro [31].

De igual forma, con el propósito de validar el factor de emisión adoptado para el diésel, se realizó una revisión de fuentes bibliográficas adicionales. Como resultado de ello, se logró identificar que el Documento del Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador, edición 2022, reporta para el año 2006 un factor de emisión de 74100 Kg de CO₂ / TJ para el consumo de diésel[32].

Por lo que, mediante la correspondiente transformación de unidades, considerando el poder calorífico del combustible y su densidad, se obtuvo un factor de emisión equivalente a 2.67 Kg CO₂ / L, valor que coincide con los factores de emisión comúnmente empleados en la literatura técnica antes mencionada.

3.5.6. Determinación de emisiones de CO₂ asociadas a mano de obra

Para la estimación de las emisiones de CO₂, asociadas a la mano de obra, se considera que el tiempo de permanencia del personal en cada subactividad es equivalente al tiempo de operación de la maquinaria involucrada en el proceso constructivo, por lo tanto, las horas de trabajo correspondientes a operadores de equipo pesado, ayudantes y peones, se determinan en función del tiempo operativo de los equipos usados en cada actividad.

La cuantificación de las emisiones generadas por la mano de obra se realiza empleando un factor de emisión promedio por persona, asociado a las emisiones diarias de CO₂, para la presente investigación se considera un valor de 7.10 kg de CO₂ /día * persona, lo que corresponde a datos de emisiones per cápita reportados para Ecuador [33].

Dicho valor se obtiene mediante la conversión de unidades, debido a que la fuente consultada presentada presenta las emisiones de CO₂ en toneladas por habitante, es necesario mantener coherencia en las unidades para mejor precisión de cálculo.

Debido a la ausencia de factores de emisión específicos para mano de obra en procesos de construcción vial, la presente investigación emplea las emisiones per cápita promedio

reportadas para Ecuador como una aproximación indirecta del impacto asociado a la permanencia del personal durante la ejecución de las actividades, se reconoce que este valor no representa una emisión directa atribuible exclusivamente al proceso constructivo, por lo que debe interpretarse como una estimación referencial para incorporar la participación de la mano de obra dentro de la evaluación global de la huella de carbono.

	Emisiones de CO2 de origen fósil (toneladas)	Variación de las emisiones de CO2	Emisiones de CO2 per cápita	Población	Cambio de población	Cuota de las emisiones mundiales de CO2
2022	46.106.910	7,29%	2,59	17.823.897	0,8%	0,12%
2021	42.972.140	20,43%	2,43	17.682.454	0,78%	0,11%
2020	35.682.880	-12,48%	2,03	17.546.065	1,19%	0,099%
2019	40.769.170	-1,32%	2,35	17.340.021	1,7%	0,11%
2018	41.315.940	4,05%	2,42	17.049.547	1,73%	0,11%
2017	39.706.440	-2,95%	2,37	16.759.519	1,54%	0,11%
2016	40.912.740	-3,06%	2,48	16.505.139	1,47%	0,11%
2015	42.204.670	-0,65%	2,59	16.266.225	1,44%	0,12%
2014	42.482.830	5,44%	2,65	16.035.124	1,44%	0,12%

Figura 9. Emisiones de CO₂ anuales per cápita

La estimación de las emisiones de CO₂ asociadas a la mano de obra se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CO_2 = t * N * f.e.$$

Donde:

CO₂= emisión de huella de carbono (kg)

t: tiempo de operación de la maquinaria (días)

N: número de trabajadores involucrados.

f.e.: factor de emisión de CO₂ pen kg por persona al día (kg de CO₂ /día * persona)

3.5.7. Determinación de emisiones de CO₂ asociadas a herramienta menor

La evaluación de la huella de carbono asociada a la fabricación de la herramienta menor se realiza a partir de la cantidad de acero contenida en cada implemento, debido a que este material es la principal fuente de las emisiones de CO₂ durante su proceso de manufactura.

De acuerdo con Freire Ramón (2022), la producción de acero genera en promedio 1.9 Kg de CO₂ por cada kilogramo de acero. Este valor se adopta como factor de emisión para estimar las emisiones incorporadas a las herramientas menores utilizadas durante el proceso de estabilización de la subrasante [34].

Para determinar la huella de CO₂ de la herramienta menor se debe también estimar el peso promedio del acero en cada herramienta, por lo que se realizó una investigación en tesis, especificaciones técnicas y ferreterías nacionales y se llegó a un resumen que se presenta en la Tabla 11:

Tabla 11

Peso del acero (Kg) existente en la herramienta menor empleada en obra.

Herramienta menor	Peso de acero (kg)
Cinta métrica	0,20
Martillo	0,70
Combo	1,80
Jalón topográfico	2,50
Pala	1,50
Rastrillo	1,00
Llave de conexión	0,40
Carretilla	8,00

Una vez determinado el peso del acero contenido en cada herramienta, la huella de carbono se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H_{CO_2} = C \times P \times Fa$$

Donde:

- H_{CO_2} = Huella de carbono asociada a la fabricación de la herramienta menor (Kg de CO₂).
- C = Cantidad de herramientas del mismo tipo empleadas en obra.
- P = Peso del acero contenido en cada herramienta (Kg).
- Fa = Factor de emisión del acero de 1.9 Kg de CO₂ / Kg de acero.

Al ya cuantificar las emisiones de dióxido de carbono incorporadas a cada tipo de herramienta menor empleada en obra, se realiza finalmente la suma de las todas las emisiones individuales para con ello tener la huella de carbono total asociada a este proceso constructivo.

3.5.8. Determinación de emisiones de CO₂ asociadas a materiales

3.5.8.1. Determinación de la huella de CO₂ en función de ciclo de vida del cemento

Para cuantificar las emisiones de CO₂ asociadas a la estabilización de subrasante con cemento, es imperativo analizar el ciclo de vida del cemento como insumo principal. En el contexto ecuatoriano la presente investigación adopta los factores de emisión determinados por León & Guillén – Mena (2020) detallados en el Capítulo II, quienes con un enfoque de puerta a puerta analizaron el ciclo de vida de dicho material enfocados en la producción nacional que está dominada por tres grandes empresas: Holcim Ecuador, UNACEM Ecuador y Cemento Chimborazo [13].

Por lo que para la cuantificación de la huella de carbono asociada al cemento se empleó un factor de emisión nacional expuesto por León & Guillén – Mena (2020) de 510.57 Kg CO₂ / Tonelada de cemento [13].

3.5.8.2. Aplicación de factores de emisión

Para determinar los valores de huella de carbono emitido por la implementación del cemento, tenemos la siguiente ecuación:

$$HCO2_{cemento} = Q * Efc$$

Donde:

$HCO2_{cemento}$ = Emisiones totales de CO₂ por uso del cemento (Kg CO₂)

Q = Cantidad total de cemento necesario para la estabilización de la subrasante en (Toneladas)

Efc = Factor de emisión local de CO₂ (510.57 Kg CO₂ / Tonelada de cemento)

Por lo tanto, al aplicar la ecuación antes indicada, se obtiene el siguiente ejemplo de cálculo:

Q = 366,56582 Toneladas de cemento (este dato es la cantidad de cemento necesario para el Tramo 1, detallado en la Tabla 7)

Efc = Factor de emisión local de CO₂ (510.57 Kg CO₂ / Tonelada de cemento)

$$HCO2_{cemento} = 366,56582 \text{ T de cemento} * 510.57 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{T}}$$

$$HCO2_{cemento} = 187157,5128 \text{ Kg de CO}_2$$

3.5.8.3. Determinación de la huella de CO₂ en función de la cal

La cal es un material auxiliar empleado en el proceso de estabilización de subrasante, cuya función es marcar los ejes límites de intervención. Aunque su consumo es reducido en comparación con otros insumos, su producción industrial genera emisiones de dióxido de carbono asociadas a la descomposición térmica de la piedra caliza, al consumo de combustibles fósiles y al uso de energía eléctrica.

Con base a la metodología propuesta por Intergovernmental Panel on Climate Change y en el estudio realizado por Erxi Wu y Shang (2023), se adopta el método de factores de emisiones para cuantificar las emisiones generadas por la fabricación de la cal utilizada en el proyecto [3] [35].

Este método consiste en determinar las emisiones de CO₂ generadas durante la producción de una tonelada de cal viva, por lo que Erxi Wu y Shang (2023) utiliza la siguiente ecuación[35]:

$$Et = Ee + Ed + Ec + Ep + Eh$$

Donde:

- Et = Emisiones totales de CO₂ equivalente a una tonelada de cal (Kg CO₂ / T)
- Ee = Emisiones por uso de explosivos en la extracción de la piedra caliza.
- Ed = Emisiones por consumo constante de diésel en maquinaria y transporte.
- Ec = Emisiones por combustión de fósiles (carbón y gas)
- Ep = Emisiones indirectas por consumo de energía eléctrica.
- Eh = Emisiones por descomposición térmica de la piedra caliza

De todas las emisiones antes mencionadas, la descomposición térmica de la piedra caliza es la que constituye la fuente principal de emisiones de CO₂, pues durante la calcinación del carbonato de calcio se libera dióxido de carbono según que Erxi Wu y Shang (2023) [35].

Por lo que Erxi Wu y Shang (2023) determinaron que la producción de un kilogramo de cal genera en promedio 1.1 Kg de CO₂ / Kg de cal [35].

3.5.8.3.1. Aplicación de factores de emisión

Para determinar los valores de huella de carbono emitido por la implementación de la cal, tenemos la siguiente ecuación:

$$HCO2_{cal} = Q * Efc$$

$HCO2_{cal}$ = Emisiones totales de CO₂ por uso de la cal (Kg CO₂)

Q = Cantidad total de cal necesario para la estabilización de la subrasante (Kg)

Efc = Factor de emisión local de CO₂ (1.1 Kg CO₂ / Kg de cal)

Por lo tanto, al aplicar la ecuación que se indicó previamente, se obtiene el siguiente ejemplo de cálculo:

Q = 1138.5 Kilogramos de cal correspondiente a la cantidad total de cal requerida para el proceso de replanteo y marcado inicial de los ejes viales del proyecto. El cálculo de dicho valor ha sido detallado en el ANEXO - CAPÍTULO II – Análisis de rendimientos de la maquinaria empleada en obra.

Efc = Factor de emisión local de CO₂ (1.1 Kg CO₂ / Kg de cal)

$$HCO2_{cal} = 1138.5 \text{ Kg de cal} * 1.1 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Kg de Cal}}$$

$$HCO2_{cal} = 1252.35 \text{ Kg de CO}_2$$

CAPÍTULO IV ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. Análisis del proceso de lastrado

4.1.1. Rendimiento y tiempo de operación de maquinaria

A partir de los parámetros operativos establecidos en la metodología, se calcularon los rendimientos y tiempos de trabajo de la maquinaria utilizada en el método de lastrado. Estos valores fueron empleados posteriormente para la estimación de las emisiones de CO₂ asociadas a cada proceso constructivo. En la tabla 12 se presenta los rendimientos y tiempos de operación obtenidos para cada equipo.

Tabla 12

Rendimiento y tiempos de operación de maquinaria para el análisis de proceso de lastrado

Maquinaria		Rendimiento y tiempos de operación					
		e= 10 cm		e= 15 cm		e= 20 cm	
		R	Tiempo	R	Tiempo	R	Tiempo
Tractocamión con cama baja		2.32530	11.94	2.325301	11.94	2.325301	11.94
Tanquero (transporte)		0.66064	1.32	0.660643	1.32	0.660643	1.32
Camioneta		0.0017	91.17	0.001756	91.17	0.001756	91.17
Motoniveladora (reconformación)		0.0005	42.94	0.000519	42.94	0.000519	42.94
Equipo topográfico							
Excavadora		0.0004	47.07	0.000656	70.61	0.000875	94.14
Volqueta		0.0147	1589.6	0.022152	1834.17	0.029536	2445.56
Cargadora frontal Motoniveladora		0.0003	40.03	0.000558	46.18	0.000744	61.58
(tendido y conformación)		0.0005	42.94	0.000648	53.67	0.00077	64.40
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización vacía)		0.1064	6.30	0.106426	9.30	0.106426	12.39
Tanquero cisterna con sistema de riego (movilización llena)		0.2554	15.13	0.255422	22.31	0.255422	28.85
Motobomba (captación de agua)	T1	0.00030	12.43	0.000455	18.64	0.000606	24.86
	T2	0.00017	3.96	0.000256	5.94	0.000341	7.91
	T3	0.00030	1.38	0.000451	2.07	0.000601	2.77
	T4	0.00027	3.81	0.000408	5.71	0.000544	7.62
Tanquero cisterna con sistema de riego (humectación)	T1	0.00076	31.51	0.000769	31.51	0.000769	31.51
	T2	0.00076	17.82	0.000769	17.82	0.000769	17.82
	T3	0.00076	3.54	0.000769	3.54	0.000769	3.54
	T4	0.00076	10.76	0.000769	10.76	0.000769	10.76
Rodillo compactador		0.0011	97.80	0.0014	122.254	0.0017	146.70

La Tabla 12 muestra los rendimientos y tiempos de operación, lo que es necesario para el cálculo de huella de carbono por uso de maquinaria.

La variación de los rendimientos de los equipos se encuentra directamente relacionada con el espesor de la capa de lastre analizada, a medida que el espesor aumenta, se incrementa el volumen de material requerido por unidad de superficie, lo que genera mayores tiempos de operación en las actividades de transporte, distribución y compactación.

En el caso de la motoniveladora y el rodillo compactador, el rendimiento depende del número de pasadas necesarias para garantizar la conformación y compactación adecuada de la capa, dicho parámetro varía en función del espesor considerado, de igual forma, los rendimientos de la volqueta y cargadora frontal están determinados por el volumen total del material granular que debe ser cargado, transportado y descargado. En consecuencia, cada espesor analizado presenta tiempos operativos distintos, lo que se refleja en las variaciones de los rendimientos utilizados en las simulaciones.

4.1.2. Lastrado con espesor de capa de 10 cm

En la Tabla 13 se presentaron los procesos y subprocesos evaluados para el método de lastrado con espesor de capa de 10 cm, en donde se detalla el equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales usados durante la ejecución de cada proceso constructivo, además se muestran las emisiones de CO₂ generadas y la huella de carbono total calculada en función del área de intervención analizada, para la vía Alao – Pungalá.

Cabe recalcar que, en el apartado ANEXO – CAPITULO II - Análisis de rendimientos de la maquinaria empleada en obra, se presenta de manera detallada la metodología empleada para el cálculo de los rendimientos de los equipos. En dicho capítulo se describen las variables consideradas, factores de eficiencia operativa, la capacidad de la maquinaria y en ciertos casos la potencia a la que trabajan.

Tabla 13

Procesos y subprocesos con indicadores de equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales para el proceso de lastrado

Proceso		Subproceso	Equipo	Mano de obra	Herramienta menor	Materiales	Subtotal de Huella de CO ₂	Total de Huella de CO ₂ (kg/m ²)
1. Transporte de maquinaria a la obra	1.1	Transporte de la maquinaria en tractocamión con cama baja	Tractocamión con cama baja	Chofer tracto camión			1303.45	0.0251
	1.2	Transporte de maquinaria rodando	Tanquero	Chofer tanquero			35.22	
			Volqueta	Chofer de volqueta			7.26	
	1.3	Transporte diario del personal (ida y vuelta)	Camioneta	Chofer			736.12	
2. Reconformación de la subrasante	2.1	Reconformación del perfil longitudinal	Motoniveladora	Operador de equipo pesado	Pico	Estacas de madera	2182.46	0.0286
	2.2	Conformación de la sección transversal		Peón	Pala			
	2.3	Control de niveles y verificación geométrica	Equipo topográfico	Topógrafo	Cinta métrica		135.55	
3. Explotación del material de lastre	3.1	Minado del material en cantera	Excavadora	Operador de equipo pesado			2563.983	0.0309
	3.2	Acopio temporal dentro de la cantera		Peón				
4. Transporte del material de lastre	4.1	Cargado en volqueta	Volqueta	Chofer de volqueta.			2173.91	1.1622
			Cargadora frontal	Peón				
				Operador de equipo pesado				
	4.2	Movilización de la volqueta llena hacia la obra	Volqueta	Chofer de volqueta.			94062.39	
	4.3	Descarga del material						

	4.4	Movilización de la volqueta vacía hacia el centro de acopio					
5. Tendido y conformación del lastre	5.1	Extendido del material en la subrasante	Motoniveladora	Operador de equipo pesado	Regla metálica	2263.18	0.027
	5.2	Distribución longitudinal del lastre		Ayudante	Pala		
	5.3	Conformación de la sección transversal		Peón	Rastrillo		
6. Captación de agua en punto de abastecimiento	6.1	Movilización del tanquero hacia el punto de captación (vacío)	Tanquero cisterna con sistema de riego	Operador de equipo pesado Peón		126.708	0.0065
	6.2	Proceso de llenado del tanque	Tanquero cisterna con sistema de riego Motobomba	Operador de equipo pesado Peón	Mangueras Llaves de control	411.784	
7. Humectación	7.1	Movilización del tanquero hacia la obra (lleno)	Tanquero cisterna con sistema de riego	Operador de equipo pesado Peón		423.152	0.0826
	7.2	Aplicación del agua sobre la vía	Tanquero cisterna con sistema de riego	Operador de equipo pesado Peón	Llaves de control	6417.98	
8. Compactación	8.1	Vaciar, vibrar, nivelar y dar acabados	Rodillo compactador	Operador de rodillo Peón		3304.124	0.0399
						TOTAL (kg/m²)	1.36
						TOTAL (T)	113.07

Con los resultados de la tabla 13 se identificó que la mayor contribución de emisiones del método de lastrado corresponde al proceso de transporte del material, con un valor de 1.1371 kg de CO₂/ m². Este resultado no se atribuye únicamente al uso de la volqueta, sino que, además, se debe al volumen requerido, distancia de acarreo y número de ciclos de transporte necesarios para abastecer la capa granular.

Estos resultados concuerdan con las condiciones de la vía Alao – Pungalá que indicó Jara Páez [4], quien identificó variabilidad geotécnica a lo largo del tramo y la necesidad de intervenciones diferenciadas según las características del suelo; por lo que, el requerimiento de material y agua no es uniforme en toda la vía.

De igual forma, los resultados tienen relación con lo que señala Parra Merino [15], que estudio las alternativas de estabilización en la vía Alao – Pungalá mediante el reciclaje de pavimento, como alternativa para reducir el reemplazo constante del material existente durante los mantenimientos, lo que permite contrastar que, en el método de lastrado convencional, las emisiones se concentran en actividades vinculadas con el abastecimiento y reposición del material granular.

Por lo tanto, el hallazgo más relevante es que, la disponibilidad y manejo del material condicionan directamente la huella de carbono del método, por lo que, las actividades de extracción, carga y acarreo se convierten en puntos críticos para cualquier alternativa de reducción de emisiones en el lastrado de la vía Alao – Pungalá.

4.1.3. Lastrado con espesor de capa de 10 cm, 15 cm y 20 cm

En la Tabla 14 se presentan los resultados de huella de carbono obtenidos para el método de lastrado considerando espesores de capa de 15 y 20 cm para la vía Alao Pungalá y espesores de capa de 10, 15 y 20 cm para la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma, los resultados muestran las emisiones de CO₂ generadas por cada proceso constructivo en función del área de intervención analizada.

Tabla 14

Huella de carbono para el proceso de lastrado con capa de 15 cm y 20 cm.

Proceso	Vía Alao - Pungalá		Vía Cascada de Puelazo - Bocatoma		
	Total de Huella de CO ₂ (kg/m ²)		Total de Huella de CO ₂ (kg/m ²)		
	Espesor de capa de 15 cm	Espesor de capa de 20 cm	Espesor de capa de 10 cm	Espesor de capa de 15 cm	Espesor de capa de 20 cm
1. Transporte de maquinaria y personal a la obra	0.0251	0.0251	0.036	0.036	0.036
2. Reconformación de la subrasante	0.028	0.028	0.028	0.028	0.028
3. Explotación del material de lastre	0.0466	0.061	0.02302	0.0345	0.046

4. Transporte del material de lastre	1.717	2.289	0.295	0.443	0.591
5. Tendido y conformación del lastre	0.068	0.0408	0.027	0.0339	0.0408
6. Captación de agua en punto de abastecimiento	0.0097	0.0129	0.0061	0.0092	0.0123
7. Humectación	0.057	0.059	0.0531	0.058	0.064
8. Compactación	0.049	0.059	0.0397	0.0497	0.059
TOTAL (kg/m²)	1.97	2.58	0.499	0.665	0.829
TOTAL (Toneladas)	163.1	213.5	44.98	59.82	74.64

Los resultados obtenidos en la Tabla 14 muestran que el transporte del material de lastre constituye la principal fuente de emisiones de CO₂ dentro del método de lastrado para ambas vías analizadas. Este comportamiento se relaciona directamente con la necesidad de movilizar grandes volúmenes de material granular mediante maquinaria pesada, lo que incrementa el consumo de combustible, y en consecuencia las emisiones de CO₂ asociadas al proceso.

La diferencia observada entre las vías Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma, se encuentran principalmente en la disponibilidad del material pétreo.

En la vía Alao – Pungalá fue necesario considerar actividades de explotación y transporte de material desde fuentes externas, mientras que en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma el material se encuentra disponible dentro del mismo tramo de intervención, esta condición reduce las emisiones asociadas al transporte y explica que los valores totales de huella de carbono sean menores en esta última vía.

Esos resultados pueden compararse con las investigaciones desarrolladas por Jara Páez [4] y Parra Merino[15] en la vía Alao – Pungalá, y a que ambas analizan alternativas de mejoramiento y mantenimiento vial en el mismo tramo de estudio. A pesar de que dichos trabajos no evalúan específicamente la huella de carbono, sus resultados permiten contextualizar las condiciones constructivas y operativas de la vía, las cuales influyen en la selección y ejecución de las actividades de intervención.

De igual manera, en la investigación de Mejía Gallegos [7] en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma, se evidenció que las condiciones particulares de cada tramo y la disponibilidad de materiales influyen directamente con el comportamiento técnico y económico de las alternativas de intervención. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que las características propias de cada vía tienen una incidencia directa sobre el comportamiento ambiental de las actividades de mantenimiento.

Además, se evidenció que el incremento del espesor de la capa granular influyen directamente sobre las emisiones generadas, ya que requiere mayor cantidad de material y un incremento en los tiempos de operación de la maquinaria, este comportamiento demuestra que pequeñas variaciones en el diseño de la estructura de la capa de rodadura puede generar grandes diferencias en las emisiones asociadas al proceso constructivo.

Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten establecer que la selección del espesor de la capa de lastre no debe responder solo a criterios estructurales y de capacidad portante, sino que además, a condiciones ambientales, debido a la influencia directa que tiene sobre las emisiones generadas durante el mantenimiento vial, así mismo los resultados permiten inferir que la disponibilidad de fuentes de material cercanas o localizadas dentro de la zona de intervención constituye un factor determinante para la reducción de emisiones de CO₂ en proyectos de mantenimiento vial, debido a que menora la dependencia de actividades de transporte externo y optimiza el uso de recursos disponibles en la vía.

4.2.Método de estabilización con cemento

4.2.1. Rendimientos y tiempo de operación de maquinaria

La estimación de la huella de carbono asociada al método de estabilización con cemento requiere determinar de manera previa los rendimientos y tiempo de operación de la maquinaria involucrada en cada proceso y subproceso constructivo. Estos parámetros nos permiten cuantificar el tiempo efectivo de funcionamiento de los equipos y, por lo tanto, estimar el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ generadas durante toda la ejecución de los trabajos.

Los rendimientos fueron calculados en función de la metodología descrita en el Capítulo III, considerando por su lado las características técnicas de cada equipo y las condiciones de operación definidas para cada actividad constructiva. La información empelada para dichos cálculos se encuentra detallada en el ANEXO - CAPÍTULO II – Análisis de rendimientos de la maquinaria empleada en obra, donde se presentan las principales especificaciones de los equipos, tales como peso, dimensiones capacidad operativa, factores de eficiencia horaria y cuando corresponde, la potencia de funcionamiento. Esta información fue obtenida a partir de fichas técnicas, manuales operativos y documentación proporcionada por los fabricantes.

Tabla 15

Análisis de rendimientos y tiempos de operación para el método de estabilización con cemento con aplicación mecanizada para la vía de Alao - Pungalá.

Maquinaria	Rendimiento y tiempos de operación							
	Riobamba OP		Riobamba 4%		Latacunga OP		Latacunga 4%	
	R	Tiempo (h)	R	Tiempo (h)	R	Tiempo (h)	R	Tiempo (h)
Transporte Cama baja - cargado	-	14.48	-	14.48	-	14.48	-	14.48
Transporte Cama baja - vacío	-	4.22	-	4.22	-	4.22	-	4.22
Transporte del Camión cisterna (tanquero)	-	1.41	-	1.41	-	1.41	-	1.41
Transporte del personal - Camioneta de inspección	-	97.26	-	97.26	-	97.26	-	97.26
Camioneta de inspección	0.0000904	3.80	0.0000904	3.80	0.0000904	3.80	0.0000904	3.80
Camioneta de inspección	0.000557	46.18	0.000557	46.18	0.000557	46.18	0.000557	46.18
Equipo topográfico (estación total / nivel)	0.000625	51.75	0.000625	51.75	0.000625	51.75	0.000625	51.75
Motoniveladora 160 HP	0.000519	42.93	0.000519	42.93	0.000519	42.93	0.000519	42.93
Motoniveladora 160 HP	0.00103	85.61	0.00103	85.61	0.00103	85.61	0.00103	85.61
Camión cisterna (tanquero) - vacío	-	22.26	-	22.26	-	22.26	-	22.26
Bomba para captación	0.000467	1.40	0.000467	1.40	0.000467	1.40	0.000467	1.40
Camión cisterna (tanquero) - cargado	-	35.61	-	35.61	-	35.61	-	35.61
Camión cisterna (tanquero) - aplicación	0.000386	1757.85	0.000386	1757.85	0.000386	1757.85	0.000386	1757.85
Rodillo compactador	0.000886	73.35	0.000886	73.35	0.000886	73.35	0.000886	73.35
Camión silo para transportar cemento - cargado	-	105.39	-	162.487	-	240.00	-	1110.00
Camión silo para transportar cemento	-	93.27	-	143.797	-	170.189	-	787.156
Espaciador mecánico de cemento	0.000511	42.27	0.000511	42.27	0.000511	42.27	0.000511	42.27
Motoniveladora 160 HP	0.000207	17.12	0.000207	17.12	0.000207	17.12	0.000207	17.12

Camión cisterna (tanquero) - vacío	-	2.06	-	2.06	-	2.06	-	2.06
Bomba para captación	0.000044	0.041	0.000044	0.041	0.000044	0.041	0.000044	0.041
Camión cisterna (tanquero) - cargado	-	3.29	-	3.29	-	3.29	-	3.29
Camión cisterna (tanquero) - aplicación	0.000036	12.00	0.000036	12.00	0.000036	12.00	0.000036	12.00
Motoniveladora 160 HP	0.000138	11.41	0.000138	11.41	0.000138	11.41	0.000138	11.41
Motoniveladora 160 HP	0.000551	45.66	0.000551	45.66	0.000551	45.66	0.000551	45.66
Rodillo compactador	0.00236	195.60	0.00236	195.60	0.00236	195.60	0.00236	195.60
Camión cisterna (tanquero) - vacío	-	26.18	-	26.18	-	26.18	-	26.18
Bomba para captación	0.00893	108.74	0.00893	108.74	0.00893	108.74	0.00893	108.74
Camión cisterna (tanquero) – cargado	-	41.89	-	41.89	-	41.89	-	41.89
Camión cisterna (tanquero) – aplicación	0.000012	125.69	0.000012	125.69	0.000012	125.69	0.000012	125.69

4.2.2. Aplicación mecanizada de cemento - Transporte desde las fábricas de Cotopaxi (Latacunga) y Chimborazo (Riobamba)

Los resultados obtenidos para la aplicación mecanizada de cemento muestran que las emisiones de CO₂ están influenciadas principalmente por las actividades de transporte y operación de maquinaria, debido al consumo de combustible que es requerido durante la ejecución del proceso constructivo. Además, se sabe que la distancia entre las plantas de producción de cemento y el área de intervención incide directamente en la huella de carbono total, por lo que se han generado diferencias entre los escenarios de abastecimiento analizados para las provincias de Cotopaxi y Chimborazo.

Una vez definidos los procesos, subprocesos y recursos considerados para la estabilización de suelos con cemento, se procedió a evaluar la huella de carbono generada por cada actividad constructiva mediante los indicadores de maquinaria, mano de obra, herramienta menor y materiales. Este análisis permitió cuantificar la contribución individual de cada componente analizado y con ello determinar la huella de carbono total asociada al proceso de estabilización como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Procesos y subprocesos con indicadores de equipo, mano de obra, herramienta menor y materiales para el proceso de estabilización con cemento de aplicación mecanizada – Latacunga – Dosificación óptima.

PROCESO	Equipo	Mano de obra	Herramienta menor	Materiales	Total, de Huella de CO ₂ (kg/m ²)
Transporte de maquinaria	Cama baja	Operador de			0,06783
	Camión cisterna (tanquero)	maquinaria			
	Camioneta de inspección				
1. Replanteo y preparación de la subrasante	Camioneta de inspección	Operador de maquinaria	Cinta métrica de 50 m	Cal	0,03195
	Equipo topográfico (estación total / nivel)	Topógrafo	Martillos		
		Ayudante de topografía	Combo		
		Peón	Jalones topográficos		
			Libreta de campo		
2. Escarificación y nivelación	Motoniveladora 160 HP	Operador de maquinaria	Palas		0,07959
		Ingeniero civil residente	Barreta		

del suelo existente		Peón	Rastrillos Cinta métrica		
3.	Camión cisterna	Operador de	Mangueras	0,12856	
Humectación	(tanquero)	maquinaria			
y	Bomba para captación	Ingeniero civil	Llaves de		
Compactación		residente	conexión		
primaria	Rodillo compactador	Peón	Palas		
			Cinta métrica		
4.	Camión silo para	Operador de	Palas	Cemento	4,84228
Distribución	transportar cemento	maquinaria			
del cemento	Espaciador mecánico	Ingeniero civil	Machete		
sobre la	de cemento	residente			
subrasante		Peón	Carretilla		
			Cinta métrica		
5. Mezclado	Motoniveladora 160	Operador de	Palas	0,00917	
suelo–cemento	HP	maquinaria			
(en seco)		Ingeniero civil	Rastrillos		
		residente			
		Peón			
6. Adición de	Camión cisterna	Operador de	Mangueras	0,03131	
agua y	(tanquero)	maquinaria			
mezclado	Bomba para captación	Ingeniero civil	Llaves de		
húmedo		residente	conexión		
	Motoniveladora 160	Peón	Palas		
	HP				
			Cinta métrica		
			Rastrillo		
7.	Motoniveladora 160	Operador de	Cinta métrica	0,02770	
Conformación	HP	maquinaria			
y perfilado de		Ingeniero civil			
la capa		residente			
estabilizada		Peón			
8.	Rodillo compactador	Operador de	Cinta métrica	0,04249	
Compactación		maquinaria			
de la capa		Ingeniero civil			
estabilizada		residente			
		Peón			
9. Curado y	Camión cisterna	Operador de	Palas	0,04969	
protección	(tanquero)	maquinaria			

Bomba para captación	Ingeniero civil residente	Rastrillos
	Peón	Carretillas
		Mangueras
TOTAL, kg CO₂ / m²		5,31059
TOTAL, toneladas CO₂		439.7167

Para la presente investigación se analizaron diferentes escenarios de estabilización mediante la aplicación mecanizada de cemento, considerando variaciones tanto en la dosificación del material como en su procedencia. Al hablar de la dosificación se evaluaron diferentes alternativas de dosificación: dosificación óptima por tramo y dosificación uniforme del 4% para la vía de Alao – Pungalá y dosificación del 2%, 4% y 6% para la vía de Cascada de Puelazo - Bocatoma, mientras que para la procedencia del material se tomaron en cuenta dos fábricas de cemento importantes en el país: Holcim (Latacunga) y Cemento Chimborazo (Riobamba).

La dosificación óptima fue determinada a partir de los estudios desarrollados por Jara Páez (2024) y Mejía Gallegos (2024) que fueron explicados en el Capítulo III, Tabla 9 [4][7].

Adicionalmente, se analizaron dos escenarios de abastecimiento. El primero consideró la planta de Cemento Chimborazo, ubicada en Riobamba, por ser una de las fábricas más cercanas a la zona de estudio, mientras que el segundo escenario contempló la planta de Holcim en Latacunga ya que actualmente es la instalación más cercana que produce cemento tipo MH.

La evaluación de todas las alternativas permitió analizar la influencia tanto de la dosificación como de la distancia de transporte sobre la huella de carbono total del proceso constructivo.

Por lo que en la Tabla 17 con el propósito de evaluar la influencia de la dosificación del cemento y la procedencia del material sobre la huella de carbono generada durante la estabilización de subrasante mediante una aplicación mecanizada, se analizaron distintos escenarios para las vías de Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo Bocatoma.

Se presenta la huella de carbono generada en cada subproceso constructivo (Tabla 17), expresada en Kg CO₂ / m², permitiendo con ello identificar cual es la actividad con mayor incidencia en las emisiones totales de CO₂ y el efecto de las diferentes dosificaciones analizadas.

Tabla 17

Análisis de la Huella de CO₂ para un sub – proceso mecanizado con dosificaciones diferentes en base a la estabilización de suelo con cemento.

PROCESO - MECANIZADO	Huella de CO ₂ por unidad de rubro ((kg C02/m ²) -									
	ALAO – PUNGALA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA		ALAO – PUNGALA DOSIFICACIÓN 4%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 2%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 4%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 6%	
	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA
Transporte de maquinaria	0,06783	0,06783	0,06783	0,06783	0,05735	0,05735	0,05735	0,05735	0,05735	0,05735
1. Replanteo y preparación de la subrasante	0,03195	0,03195	0,03195	0,03195	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951
2. Escarificación y nivelación del suelo existente	0,07959	0,07959	0,07959	0,07959	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958
3. Humectación y Compactación primaria	0,12856	0,12856	0,12856	0,12856	0,08172	0,08172	0,08172	0,08172	0,08172	0,08172
4. Distribución del cemento sobre la subrasante	4,54864	4,84228	7,11937	7,57206	4,00294	4,15961	7,96831	8,27452	11,9337	12,3894

5. Mezclado suelo–cemento (en seco)	0,00917	0,00917	0,00917	0,00917	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916
6. Adición de agua y mezclado húmedo	0,03131	0,03131	0,03131	0,03131	0,01334	0,01334	0,01334	0,01334	0,01334	0,01334
7. Conformación y perfilado de la capa estabilizada	0,02770	0,02770	0,02770	0,02770	0,02708	0,02708	0,02708	0,02708	0,02708	0,02708
8. Compactación de la capa estabilizada	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249
9. Curado y protección	0,04969	0,04969	0,04969	0,04969	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112
TOTAL, Kg CO₂ / m²	5,01695	5,31059	7,58767	8,04037	4,41430	4,56860	8,37967	8,68652	12,3450	12,80079
TOTAL, Toneladas CO₂	415,4032	439,7167	628.2593	665,7426	397,2873	411,17378	754,1700	781,78711	1111.0526	1152,0712

En la Tabla 17 se puede observar que la distribución del cemento sobre la subrasante constituye el subproceso con mayor incidencia en la huella de carbono total de todos los escenarios analizados. Mientras que actividades como el transporte de la maquinaria, replanteo y preparación de la subrasante, escarificación, humectación, mezclado, perfilado, compactación y curado registran valores que no superan los 0.13 Kg CO₂ /m², el subproceso denominado distribución del cemento presenta valores comprendidos entre los 4,00 y 12.39 Kg de CO₂ /m², representando aproximadamente el 90% de las emisiones totales generadas durante la estabilización. Dicho comportamiento evidencia que el consumo de cemento es el principal responsable de la huella de carbono en el proceso constructivo analizado.

Para la vía de Alao – Pungalá, la aplicación de la dosificación óptima genera una huella de carbono total de 5.02 Kg de CO₂ / m² para el escenario de abastecimiento desde la fábrica de cemento Chimborazo, y de 5.31 Kg de CO₂ / m² para la fábrica de Holcim desde Latacunga. Por el contrario, al utilizar una dosificación uniforme del 4% las emisiones aumentan a 7.59 Kg de CO₂ / m² y 8.04 Kg CO₂ / m² respectivamente representando un incremento de hasta el 51%.

De manera similar, en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma se observa una relación directa entre el incremento de la dosificación de cemento con el aumento de la huella de carbono. Para el escenario de abastecimiento desde Riobamba, las emisiones pasan de 4.41 Kg de CO₂ / m² con una dosificación del 2% a 12.35 Kg CO₂ / m² con una dosificación del 6%. Para el abastecimiento desde la ciudad de Latacunga se registra el mismo comportamiento obteniéndose valores de 4.57 Kg de CO₂ / m² y 12.80 Kg de CO₂ / m² para las dosificaciones del 2% y 6% respectivamente. Por lo que diremos que los resultados presentados en la Tabla 17 evidencian que el aumento de contenido de cemento produce incrementos a gran escala en las emisiones de CO₂, alcanzando variaciones superiores al 180% entre dosificaciones.

Respecto a la procedencia del material, se observa que los escenarios abastecidos desde Latacunga generan mayores emisiones de CO₂ que aquellos que son abastecidos desde Riobamba. Sin embargo, las diferencias obtenidas oscilan entre aproximadamente 3% y 6%, valores considerablemente menores a los incrementos observados por la variación de la dosificación de cemento. Esto demuestra que, aunque la distancia de transporte influye en la huella de carbono total, su impacto pasaría a ser secundario frente al efecto generado por la producción de cemento que se va a incorporar al suelo.

Los resultados obtenidos de la Tabla 17 permiten observar que la huella de carbono de la estabilización mecanizada se ve influenciada principalmente por la cantidad de cemento dosificada, mientras que la procedencia del material actúa como uno de los factores complementarios asociado principalmente a las emisiones por transporte de material. Por lo tanto, se puede decir que la optimización de las dosificaciones mediante estudios geotécnicos detallados y una buena selección de fuentes de abastecimiento cercanas a la zona de trabajo, representa una estrategia efectiva para disminuir con ello el impacto ambiental de este tipo de intervenciones viales.

4.2.3. Aplicación manual de cemento - Transporte desde las fábricas de Cotopaxi (Latacunga) y Chimborazo (Riobamba)

La aplicación manual del cemento constituye una alternativa constructiva ampliamente utilizada cuando no se dispone de equipos mecanizados para la distribución del material. Bajo dicho enfoque, resulta indispensable analizar cómo la dosificación del cemento, la procedencia del material y la aplicación del mismo influyen sobre la huella de carbono total del proceso, así como identificar los subprocesos con mayor aporte a las emisiones generadas durante todo el proceso de estabilización.

Tabla 18

Análisis de la Huella de CO₂ para un sub – proceso manual con dosificaciones diferentes en base a la estabilización de suelo con cemento.

PROCESO - MANUAL	Huella de CO ₂ por unidad de rubro ((kg C02/m²) -									
	ALAO – PUNGALA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA		ALAO – PUNGALA DOSIFICACIÓN 4%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 2%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 4%		CASCADA DE PUELAZO - BOCATOMA DOSIFICACIÓN 6%	
	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA	RIOBAMBA	LATACUNGA
Transporte de maquinaria	0,05148	0,05148	0,05148	0,05148	0,04361	0,04361	0,04361	0,04361	0,04361	0,04361
1. Replanteo y preparación de la subrasante	0,03195	0,03195	0,03195	0,03195	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951	0,02951
2. Escarificación y nivelación del suelo existente	0,07959	0,07959	0,07959	0,07959	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958	0,07958
3. Humectación y Compactación primaria	0,12856	0,12856	0,12856	0,12856	0,08171	0,08171	0,08171	0,08171	0,08171	0,08171
4. Distribución del cemento sobre la subrasante	4,98498	5,75786	7,80597	9,01275	4,41731	4,83953	8,80797	9,65241	13,19259	14,45532
5. Mezclado suelo–cemento (en seco)	0,00917	0,00917	0,00917	0,00917	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916	0,00916
6. Adición de agua y mezclado húmedo	0,03131	0,03131	0,03131	0,03131	0,01338	0,01338	0,01338	0,01338	0,01338	0,01338

7. Conformación y perfilado de la capa estabilizada	0,02770	0,02770	0,02770	0,02770	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201	0,00201
8. Compactación de la capa estabilizada	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249	0,04249
9. Curado y protección	0,04969	0,04969	0,04969	0,04969	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112	0,07112
TOTAL, Kg CO₂ / m²	5,43694	6,20981	8,25792	9,46470	4,81558	5,21211	9,18054	10,02499	13,56517	14,82789
TOTAL, Toneladas CO₂	450,1782	514,1726	683,7559	783,6771	433,4017	469,09004	826,24901	902,2493	1220,8651	1334,5104

En la Tabla 18 se observa que la distribución del cemento sobre la subrasante constituye nuevamente el subproceso con mayor incidencia en la huella de carbono total de todos los escenarios analizados. Mientras que el resto de las actividades registran emisiones inferiores a 0.13 kg CO₂ / m², la distribución manual del cemento presenta valores comprendidos entre 4.42 y 14.46 Kg de CO₂ / m², representando la mayor parte de las emisiones generadas durante el proceso de estabilización con cemento. Este comportamiento confirma que el consumo de cemento constituye el principal factor responsable de la huella de carbono asociada a la estabilización manual.

Para la vía Alao – Pungalá, la aplicación de una dosificación óptima genera una huella de carbono total de 5.44 Kg de CO₂ / m² para el abastecimiento desde Riobamba y de 6.21 Kg de CO₂/m² para el abastecimiento desde Latacunga, por el contrario, al emplear una dosificación uniforme del 4%, las emisiones de CO₂ aumentan a 8.26 Kg de CO₂ / m² y 9.46 Kg de CO₂ /m², representando con ello incrementos superiores al 50%. De manera similar, en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma se observa que las emisiones aumentan de 4.82 Kg de CO₂ / m² a 13.57 Kg de CO₂ / m² para el abastecimiento de material desde Riobamba con dosificaciones de 2% y 6% respectivamente, y de 5.21 Kg de CO₂ a 14.83 Kg de CO₂ para un abastecimiento desde Latacunga, al pasar de una dosificación del 2% al 6%.

Respecto a la procedencia del material, los escenarios abastecidos desde la Holcim de Latacunga presentan mayores emisiones que aquellos abastecidos desde La Cemento Chimborazo de Riobamba, esto debido al incremento de las distancias de transporte, Sin embargo, las diferencias que se observan son relativamente menores a las generadas por las variaciones en la dosificación de cemento. De igual manera al caso anterior se observa que el cemento es un factor influyente en la huella de carbono generada.

4.3. Proyección de la huella de carbono del método de lastrado a 10 años

Para la proyección de emisiones acumuladas se consideró una frecuencia de cuatro intervenciones de mantenimiento por año, es decir intervenciones trimestrales, este criterio se fundamenta en que los caminos no pavimentados requieren actividades periódicas de perfilado y conservación para mantener niveles aceptables para el tránsito vehicular. El modelo HDM – III del Banco Mundial señala que el mantenimiento de caminos de lastre mediante perfilado se realiza de forma estacional o con una frecuencia suficiente para mantener la rugosidad dentro de límites tolerables, considerando que la frecuencia de mantenimiento constituye una de las principales variables que influyen dentro del deterioro de estas vías. [42]

De igual forma, los manuales de conservación vial establecen que las actividades de mantenimiento rutinario en vías no pavimentadas pueden realizarse varias veces al año, dependiendo de las condiciones climáticas, del tránsito vehicular y del estado de la vía, teniendo en cuenta que las vías analizadas corresponden a vías de tercer orden y que están expuestas a precipitaciones y pérdida progresiva del material granular, la frecuencia de intervención adaptada cumple con las necesidades de dichas vías. [43]

A continuación, se presenta la proyección de emisiones de CO₂ del método de lastrado para un periodo de 10 años, considerando espesores de capa de 10, 15 y 20 cm, en la Tabla 19 se muestran tanto las emisiones anuales estimadas como las emisiones acumuladas generadas durante 10 años de análisis.

Tabla 19
Análisis de las emisiones de CO₂ acumuladas de la vía para 10 años con el método de lastre

Espesor (cm)	Año	Vía Alao - Pungalá		Vía Cascada de Puelazo - Bocatoma	
		Emisión (T)	Emisión acumulativa (T)	Emisión (T)	Emisión acumulativa (T)
10	1		452.268253		166.5810252
	2		904.5365059		333.1620504
	3		1356.804759		499.7430756
	4		1809.073012		666.3241008
	5	452.2682	2261.341265	166.58102	832.905126
	6		2713.609518		999.4861512
	7		3165.877771		1166.067176
	8		3618.146024		1332.648202
	9		4070.414277		1499.229227
	10		4522.68253		1665.810252
15	1		652.2748694		221.8435325
	2		1304.549739		443.6870649
	3		1956.824608		665.5305974
	4		2609.099478		887.3741299
	5	652.274869	3261.374347	221.84353	1109.217662
	6		3913.649217		1331.061195
	7		4565.924086		1552.904727
	8		5218.198956		1774.74826
	9		5870.473825		1996.591792
	10		6522.748694		2218.435325
20	1		854.102197		277.0544888
	2		1708.204394		554.1089776
	3		2562.306591		831.1634664
	4		3416.408788		1108.217955
	5	854.102197	4270.510985	277.05448	1385.272444
	6		5124.613182		1662.326933
	7		5978.715379		1939.381422
	8		6832.817576		2216.43591
	9		7686.919773		2493.490399
	10		8541.02197		2770.544888

Los resultados presentados en la Tabla 19 muestran que la frecuencia de mantenimiento constituye uno de los factores más influyentes en la huella de carbono total del método de lastrado. A pesar de que las emisiones generadas en una sola intervención se pueden considerar bajas, la necesidad de ejecutar mantenimientos periódicos provoca un crecimiento continuo de las emisiones acumuladas al largo del tiempo.

Al comparar ambas vías, se evidencia que la vía Alao – Pungalá presenta valores superiores para todos los espesores analizados, teniendo así para el espesor de 20 cm, la proyección acumulada de 8541.02 toneladas de CO₂ en el año 10, mientras que en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma, se registran 2770.54 toneladas de CO₂ con el mismo espesor, esta diferencia como anteriormente se menciona, se debe a las condiciones de abastecimiento del material granular.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo expuesto por Jara Páez [4] y Parra Merino [15], que identificaron que las vías rurales de la zona requieren intervenciones periódicas constantes para conservar las condiciones de servicio debido a las características geotécnicas de los suelos a ya las condiciones de operación e las vías, a pesar que los autores mencionados no evaluaron las emisiones de carbono, sus investigaciones permiten comprender que la recurrencia de los trabajos de mantenimiento constituyen una característica inherente de este tipo de infraestructura.

Por lo tanto, el análisis principal de la proyección realizada no corresponde únicamente al incremento de emisiones por el efecto de espesor de capa de lastre, sino a la influencia que tiene la recurrencia de intervenciones, lo que sugiere que, dentro de una evaluación de sostenibilidad, resulta indispensable considerar el comportamiento del método durante toda su vida útil y no únicamente a las emisiones generadas durante una intervención aislada.

4.4. Proyección de la huella de carbono del método de estabilización con cemento a 10 años.

Debido a que la estabilización de subrasante con cemento presenta una vida aproximada de hasta 5 años según recomendaciones realizadas por la Holcim [44], es de vital importancia analizar el comportamiento de las emisiones de CO₂ a lo largo del tiempo considerando las intervenciones requeridas durante el periodo de servicio de la vía estabilizada. Con dicho enfoque, la proyección de la huella de carbono acumulada permite evaluar la influencia de la dosificación del cemento, la procedencia del material y el método de aplicación sobre las emisiones generadas durante un horizonte de análisis de 10 años, identificando así los escenarios que presentan el mayor y menor impacto ambiental, por lo que en la Tabla 20 se realiza un análisis de emisiones de CO₂ acumuladas para las dos vías puestas en análisis.

Tabla 20

Análisis de las emisiones de CO₂ acumuladas de la vía para 10 años con el método de estabilización con cemento

Vía analizada	Dosificación %	Fábrica de cemento	Método aplicado	Año	Emisión (T)	Emisión acumulativa (T)
Alao – Pungalá	Óptimo (T1 = 3%, T2 = 2%, T3 = 4% y T4 = 2%)	Latacunga	Aplicación mecanizada	1 – 5	439,7167	439,7167
	Estandarizado (4%)	Latacunga		6 - 10		879,43336
				1 – 5	665,7426	665,74259

		Aplicación mecaniza	6 - 10		1331,4852
	Óptimo (T1 = 3%, T2 = 2%, T3 = 4% y T4 = 2%)	Aplicación mecanizada	1 – 5 6 - 10	415,4032	415,4032 830,8064
	Estandarizado (4%)	Aplicación mecaniza	1 – 5 6 - 10	628,2593	628,2593 1256,5186
	Óptimo (T1 = 3%, T2 = 2%, T3 = 4% y T4 = 2%)	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	514,1727	514,1727 1028,3453
	Estandarizado (4%)	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	783,6770	783,6770 1567,3541
	Óptimo (T1 = 3%, T2 = 2%, T3 = 4% y T4 = 2%)	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	450,1782	450,1782 900,3565
	Estandarizado (4%)	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	683,7559	683,7559 1367,5119
Cascada de Puelazo – Bocatoma	2%	Aplicación mecanizada	1 – 5 6 - 10	411,1737787	411,1737787 822,3475574
	4%	Aplicación mecaniza	1 – 5 6 - 10	781,7871087	781,7871087 1563,574217
	6%	Aplicación mecaniza	1 – 5 6 - 10	1152,071172	1152,071172 2304,142343
	2%	Aplicación mecanizada	1 – 5 6 - 10	397,28739	397,28739 794,5747868
	4%	Aplicación mecaniza	1 – 5 6 - 10	754,1699881	754,1699881 1508,339976
	6%	Aplicación mecaniza	1 – 5 6 - 10	1111,052583	1111,052583 2222,105165
	2%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	469,0900388	469,0900388 938,1800776
	4%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	902,2492952	902,2492952 1804,49859
	6%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	1334,51041	1334,51041 2669,02082
	2%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	433,4017881	433,4017881 866,8035763
	4%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	826,2490144	826,2490144 1652,498029
	6%	Aplicación manual	1 – 5 6 - 10	1220,86513	1220,86513 2441,73026

Los resultados presentados en la Tabla 20 evidencian que la huella de carbono acumulada permanece constante durante los primeros cinco años de servicio debido a que la estabilización con cemento no requiere de intervenciones adicionales dentro de dicho periodo. Sin embargo, al considerar una nueva intervención al sexto año, las emisiones acumuladas se incrementan de manera proporcional como consecuencia de una segunda estabilización, duplicando así los valores registrados en el primer ciclo de vida.

De forma general, se puede observar que la dosificación de cemento constituye el factor con mayor influencia sobre las emisiones acumuladas. En la vía Alao – Pungalá, los escenarios con dosificación óptima presentan emisiones acumuladas a los 10 años comprendidas entre los 830.31 y 1028.35 T CO₂ (los valores salen considerando todas las simulaciones con un porcentaje de dosificación óptima). Mientras que las alternativas con dosificación uniforme del 4% alcanzan valores entre 1256.52 y 1567.35 T CO₂ (los valores salen considerando todas las simulaciones con un porcentaje de dosificación estandarizada 4%). Estos resultados evidencian que la optimización de la dosificación mediante estudios geotécnicos específicos permite reducir en gran parte las emisiones de CO₂ generadas durante la vida útil del proyecto.

Por otro lado, en la vía de Cascada de Puelazo – Bocatoma se identifica una tendencia similar, observándose así que las emisiones acumuladas aumentan progresivamente conforme se incrementa el contenido de cemento. Los escenarios con dosificación del 2% presentan valores comprendidos entre 794,57 y 938,18 T CO₂, mientras que al analizar una dosificación del 6% dichas emisiones oscilan entre los 2222,105165 y 2669,02 T CO₂ al final del periodo de análisis (10 años). Este resultado evidencia que el aplicar dosificaciones superiores a las óptimas puede superar hasta en un 180% la emisión de CO₂.

Si bien la distancia influye en las emisiones de CO₂, se observa que la diferencia entre las huellas obtenidas de los abastos de Latacunga y Riobamba infieren en 3.5% y 14.3%, en comparación al 51% y 184% que incide la dosificación de cemento, confirmando así que el consumo de cemento es el principal factor para el aumento de la huella de carbono total.

El escenario que presenta una mejor huella de carbono corresponde a la vía de Cascada de Puelazo – Bocatoma con una aplicación mecanizada, dosificación al 2% y abastecimiento desde la Cemento Chimborazo, registrando un valor de 794,57 T CO₂ en todo el proceso de estabilización, esto debido a que tiene el menor porcentaje de dosificación y a su vez la distancia de transporte del material es menor que en los otros escenarios.

En contraste, la mayor huella de CO₂ corresponde a la misma vía, con aplicación manual, dosificación al 6% y abastecimiento desde la fábrica Holcim de Latacunga, alcanzando un valor acumulado de 2669,02 T CO₂, esto debiéndose a un porcentaje de dosificación alto, y mayor distancia de transporte del agente estabilizante.

Por lo que, los resultados expuestos en la Tabla 20 permiten concluir que la optimización de las dosificaciones, la mecanización del proceso constructivo y la selección de fuentes de abastecimiento cercanas constituyen las estrategias más efectivas para reducir la huella de CO₂ asociado a la estabilización de subrasante con cemento durante su vida útil.

4.5.Comparación de métodos constructivos

A continuación, se presentan las emisiones de CO₂ asociadas a equipo y maquinaria, mano de obra, herramienta menor y materiales para las dos vías analizadas de Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2). Debido al número de simulaciones evaluadas, se empleó una representación gráfica mediante colores para diferenciar cada alternativa de estabilización analizada. Por ello, en la Figura 10 se presenta el esquema de identificación utilizado para facilitar la interpretación de los resultados mostrados en las gráficas posteriores.

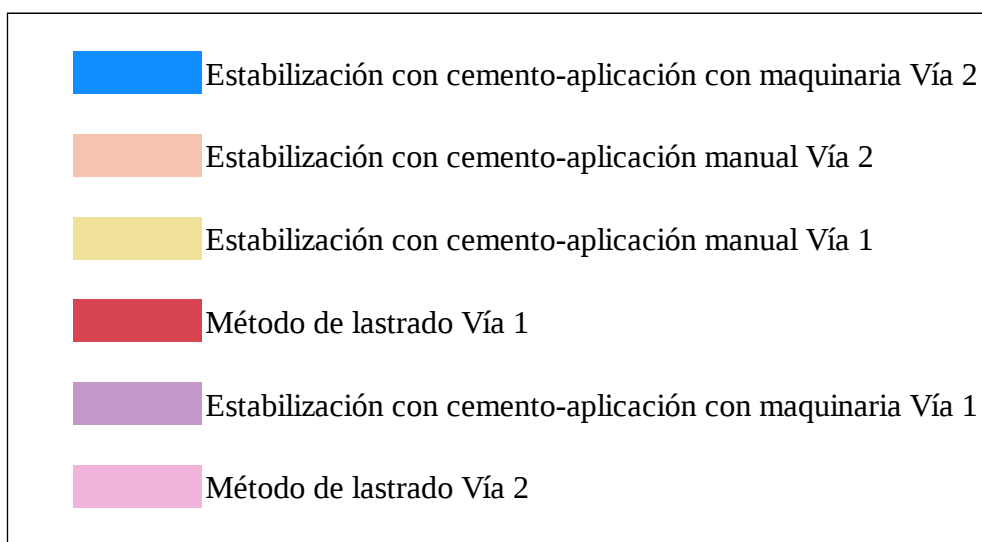


Figura 10. Representación gráfica de las simulaciones evaluadas para las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)

- **Equipo**

Con el propósito de identificar la incidencia de la maquinaria y equipo dentro de la huella de carbono total, a continuación, se comparan las emisiones de CO₂ generas por el uso y fabricación de estos recursos en las distintas simulaciones del método de lastrado y estabilización con cemento para las vías estudiadas de Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma.

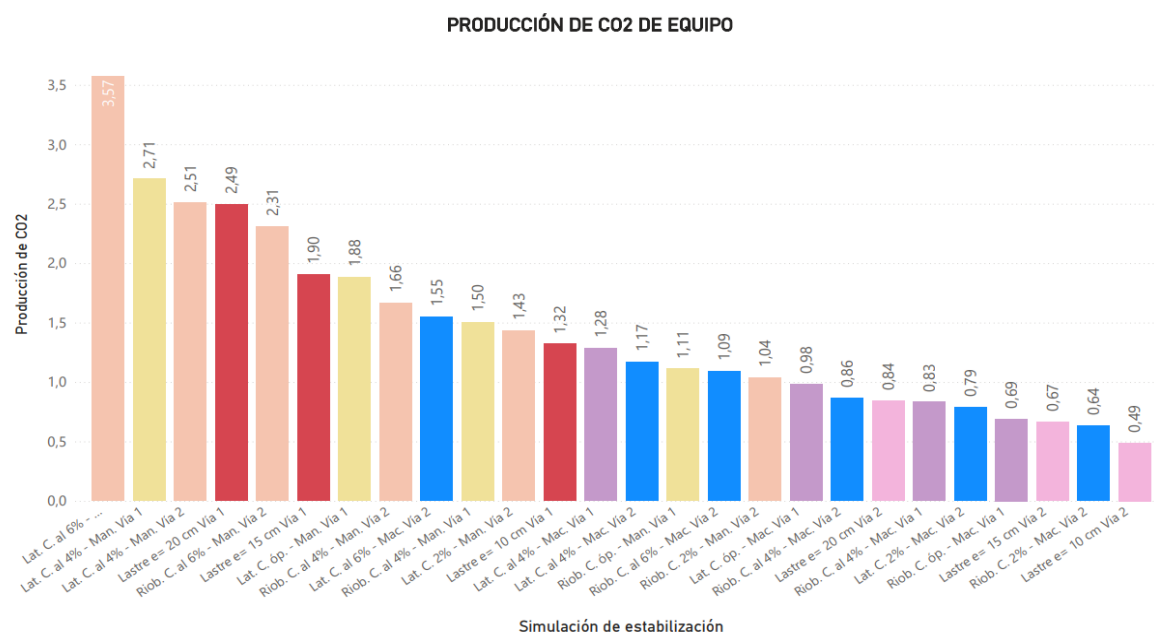


Figura 11. Emisiones de CO₂ generadas por uso y fabricación de equipo y maquinaria en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)

La comparación de emisiones generadas por la maquinaria utilizada en los diferentes métodos constructivos permite identificar la influencia que tienen los recursos operativos dentro de la huella de carbono total de los métodos evaluados, los resultados presentados en la Figura 11 muestran que las mayores emisiones corresponden a las simulaciones de estabilización con cemento que consideran abastecimiento de material desde la planta de Latacunga y mayores dosificaciones de cemento, alcanzando valores de hasta 2.71 kg de CO₂/m² en la vía Alao – Pungalá (Vía 1) y 3.57 kg de CO₂/m² en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2).

Este comportamiento se debe principalmente a las mayores distancias de transporte del cemento y al incremento de movilización de material requeridas durante el proceso de estabilización, lo que genera mayores tiempos de utilización de maquinaria y consumo de combustible, por lo contrario, las menores emisiones se presentan en las simulaciones con dosificaciones óptimas y abastecimiento desde fuentes más cercanas, evidenciando que la optimización logística constituye un factor determinante para reducir las emisiones asociadas a la maquinaria.

Además, se observa que en la vía Alao Pungalá (Vía 1), la simulación de lastrado con espesor de 15 cm genera 1.90 kg de CO₂/m², valor similar al obtenido en la estabilización con dosificación óptima de cemento con abastecimiento desde Latacunga con aplicación manual con un valor de 1.88 kg de CO₂/m², lo que evidencia que, bajo condiciones de transporte desfavorables para el cemento, ambas alternativas pueden presentar impactos ambientales comparables en términos de uso de maquinaria, sin embargo, cuando el abastecimiento se realiza desde una fuente más cercana, como Riobamba, las emisiones se reducen hasta 1.11 kg de CO₂/m² bajo las mismas condiciones, lo que representa una disminución de 40.96 % respecto a la simulación de abastecimiento en Latacunga, estos

resultados demuestran que la logística de abastecimiento tienen influencia directa sobre la huella de carbono y que una adecuada planificación puede permitir obtener beneficios estructurales de la estabilización con cemento sin incrementar significativamente las emisiones asociadas al uso de maquinaria.

De manera similar, en la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2), se identifican simulaciones de estabilización con cemento que presentan emisiones similares a las obtenidas mediante el método de lastrado con espesor de 20 cm que registra emisiones de 0.84 kg de CO₂/m², valor similar al obtenido en la simulación de estabilización con cemento al 2% con abastecimiento desde Latacunga y aplicación mecanizada de 0.79 kg de CO₂/m². Asimismo, el lastrado con espesor de 15 cm genera 0.67 kg de CO₂/m², resultado similar al obtenido en la estabilización con cemento al 2% desde Riobamba con aplicación mecanizada, que alcanza 0.64 kg de CO₂/m², lo que evidencia que la disponibilidad local de materiales constituye un factor determinante dentro de la huella de carbono total.

Al comparar ambos métodos constructivos, se observa que el lastrado presenta menores emisiones de CO₂ asociadas a maquinaria en la mayoría de simulaciones evaluadas, debido a que requieren menor cantidad de actividades complementarias y no incorpora procesos relacionados con transporte y manipulación de cemento, sin embargo, los resultados evidencian que las diferencias observadas dependen directamente de la procedencia de los materiales y de la planificación logística adoptada durante la ejecución de cada alternativa constructiva.

- **Mano de obra**

A continuación, se presenta la comparación de las emisiones de CO₂ asociadas a la mano de obra para las diferentes simulaciones de estabilización con cemento y método de lastrado evaluadas en las vías Alao – Pungalá (1) y Cascada de Puelazo - Bocatoma (2), este análisis permite identificar la incidencia del recurso humano dentro de la huella de carbono total y establecer su nivel de participación frente a otros componentes, como maquinaria y transporte.

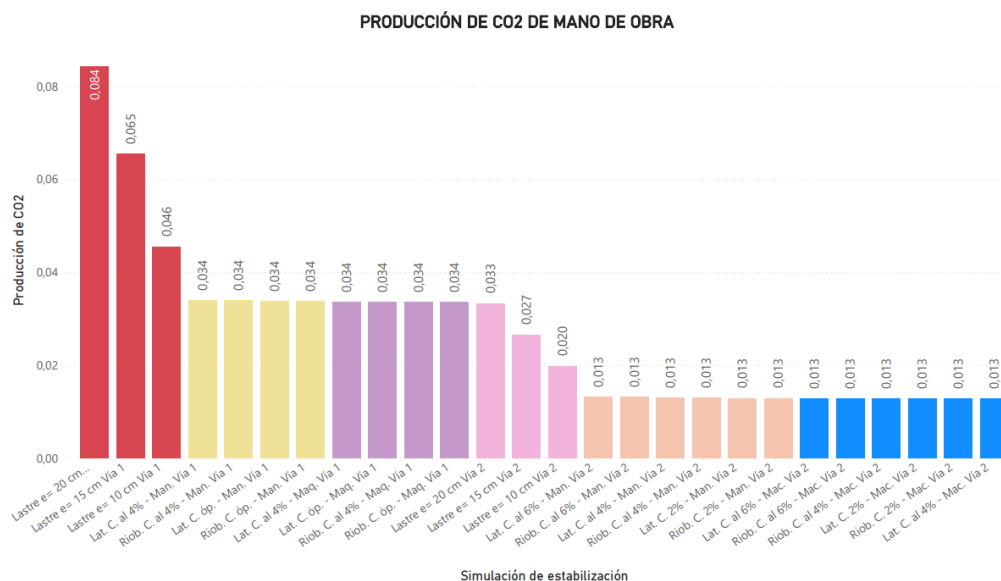


Figura 12 Emisiones de CO₂ generadas por mano de obra en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)

Aunque la mano de obra representa una menor contribución dentro de la huella de carbono total en comparación con otros componentes, su participación debe ser considerada debido a la intervención del personal durante las diferentes etapas de ejecución de los procesos constructivos.

Los resultados expuestos en la Figura 12 muestran que el método del lastrado presenta las mayores emisiones de CO₂ asociadas a la mano de obra, alcanzando un valor máximo de 0.084 kg de CO₂/m² para un espesor de estabilización de 20 cm en la vía Alao – Pungalá y 0.033 kg de CO₂/m² en la vía Cascada de Puelazo. Este comportamiento se debe al incremento del volumen de material colocado en la vía, puesto que al requerir una mayor cantidad de lastre aumenta el tiempo de ejecución de las actividades y por ende la permanencia del personal en obra.

Por lo contrario, la estabilización con cemento presenta valores menores de emisiones por mano de obra, en especial cuando se realiza la aplicación de forma mecanizada. Esto evidencia que la utilización de maquinaria especializada reduce la participación directa del personal durante las actividades de distribución, mezcla y conformación del material estabilizado.

Al comparar ambas vías, se observa que las diferencias en emisiones por mano de obra son bajas respecto a las variaciones registradas en maquinaria, en consecuencia los resultados permiten establecer que la contribución del recurso humano tiene una incidencia limitada dentro de la huella de carbono total, por lo que las diferencias ambientales entre los métodos evaluados se encuentran condicionadas principalmente por el uso de maquinaria, las distancias de transporte y los materiales requeridos para cada alternativa constructiva.

- **Herramienta menor**

Con el propósito de evaluar la incidencia de la herramienta menor dentro de la huella de carbono total, a continuación, se presenta la comparación de las emisiones de CO₂ asociadas a su fabricación y utilización para las diferentes simulaciones de estabilización con cemento y método de lastrado analizadas en las vías Alao – Pungalá (1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (2). Los resultados permiten identificar el nivel de participación de este componente respecto a los demás recursos empleados durante la ejecución de los procesos constructivos.

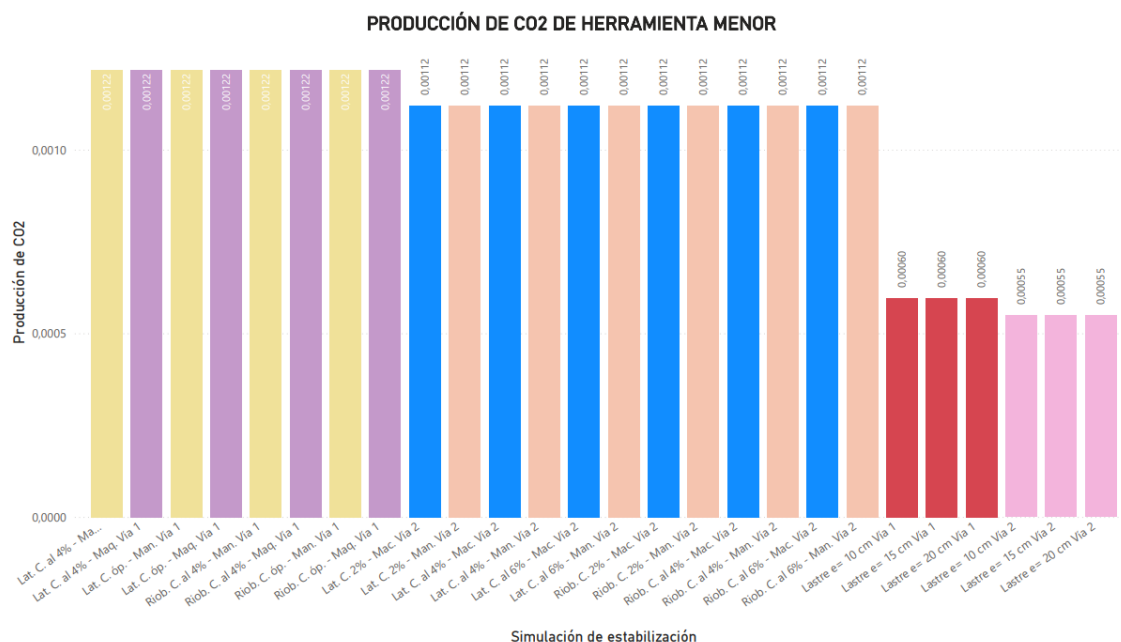


Figura 13. Emisiones de CO₂ generadas por herramienta menor en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)

Los resultados presentados en la Figura 13 muestran que las emisiones de CO₂ asociadas a la herramienta menos presentan valores muy pequeños en todas las simulaciones analizadas, con rangos comprendidos entre 0.00055 y 0.00120 kg de CO₂/m². Las mayores emisiones corresponden a las simulaciones de estabilización con cemento, mientras que los menores valores se registran en el método de lastrado para ambas vías de estudio.

Este comportamiento se relaciona con la utilización de herramientas adicionales durante las actividades de distribución, mezcla y control del material estabilizante, las cuales incrementan las emisiones asociadas a la fabricación y uso de herramienta menor, sin embargo, las diferencias observadas son mínimas debido a que este componente representa valores casi despreciables dentro de la huella de carbono total de los procesos constructivos evaluados.

Al comprar los resultados obtenidos en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2), se observa una tendencia similar en todas las simulaciones,

dejando en evidencia que la contribución de la herramienta menor permanece constando independientemente de la ubicación de la vía, la procedencia de los materiales o la dosificación de cemento empleada.

- Material**

A continuación, se presenta la comparación de las emisiones de CO₂ asociadas a los materiales utilizados en las diferentes simulaciones de estabilización con cemento y método de lastrado evaluadas en las vías Alao – Pungalá (1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (2). Este análisis permite identificar la incidencia que tiene la fabricación y suministro de los materiales sobre la huella de carbono total de cada alternativa constructiva, así como su influencia en las diferencias ambientales observadas entre ambos métodos.

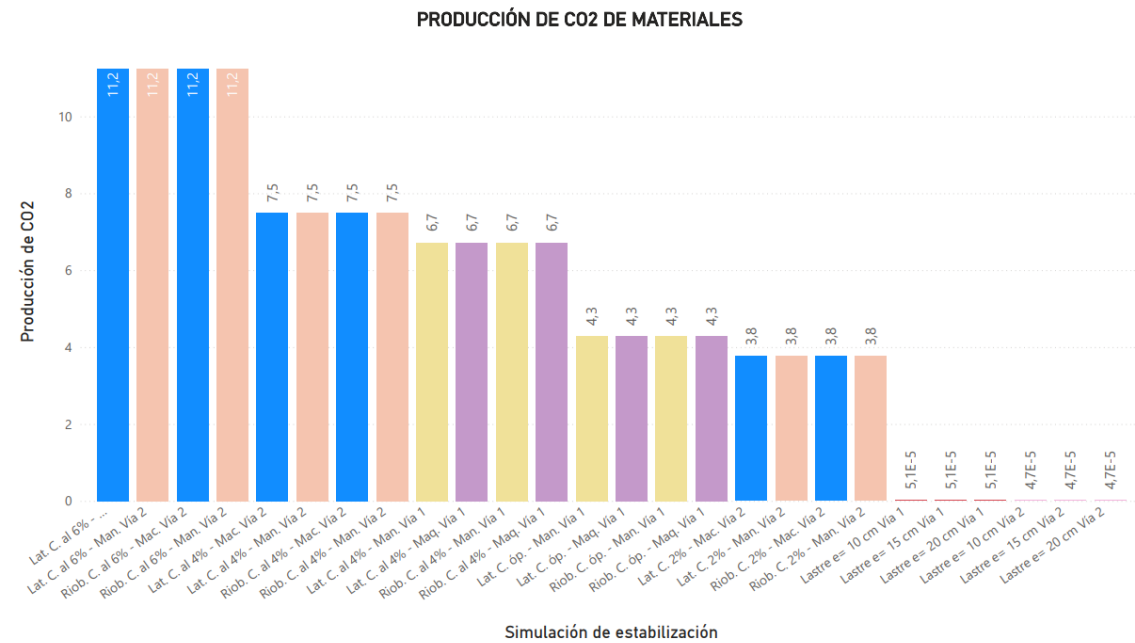


Figura 14. Emisiones de CO₂ generadas por materiales en las vías Alao – Pungalá (Vía 1) y Cascada de Puelazo – Bocatoma (Vía 2)

Dentro de los componentes evaluados, los materiales constituyen una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ en las simulaciones de estabilización con cemento, debido a que la fabricación del cemento Portland requiere elevados consumos energéticos y genera grandes emisiones durante el proceso de construcción. En contraste, para el método de lastrado no se contabilizan emisiones grandes asociadas a la fabricación del material, debido a que el material pétreo utilizado corresponde a un recurso natural obtenido mediante procesos de extracción.

Los resultados presentados en la Figura 14, evidencian que las emisiones asociadas a materiales aumentan directamente con la dosificación de cemento empleada, los mayores valores se registran en las simulaciones con dosificaciones de 6%, alcanzando valores de 11.2 kg de CO₂/m², seguidas por las dosificaciones del 4% con emisiones entre 6.7 y 7.5

% kg de CO₂/m², y las dosificaciones óptimas presentan valores comprendidos entre 3.8 y 4.3 kg de CO₂/m²m lo que demuestra que el contenido de cemento constituye la variable de mayor influencia sobre las emisiones asociadas a materiales, debido a que cualquier incremento en la dosificación implica un aumento proporcional de las emisiones generadas durante su fabricación, dichos resultados coinciden con lo señalado por Rivera et al. [9] y Holcim Ecuador [18], que indican que la producción de cemento representa uno de los procesos con mayor intensidad de emisiones dentro de las técnicas de estabilización de suelos.

Al comparar ambas vías de estudio, se observa que las diferencias asociadas a materiales no depende de las características geométricas o de la ubicación de la vía, por lo que, la utilización de dosificaciones óptimas permite reducir la huella de carbono sin comprometer las condiciones de mejoramiento de subrasante, para los suelos analizados, predominantemente arcillosos, los resultados evidencia que incrementos de dosificación superiores a los requerimiento técnicos generan grandes aumentos en las emisiones de CO₂ sin aportar beneficios proporcionales al desempeño esperado del proceso de estabilización.

4.6. Comparación global de resultados

- Alao – Pungalá

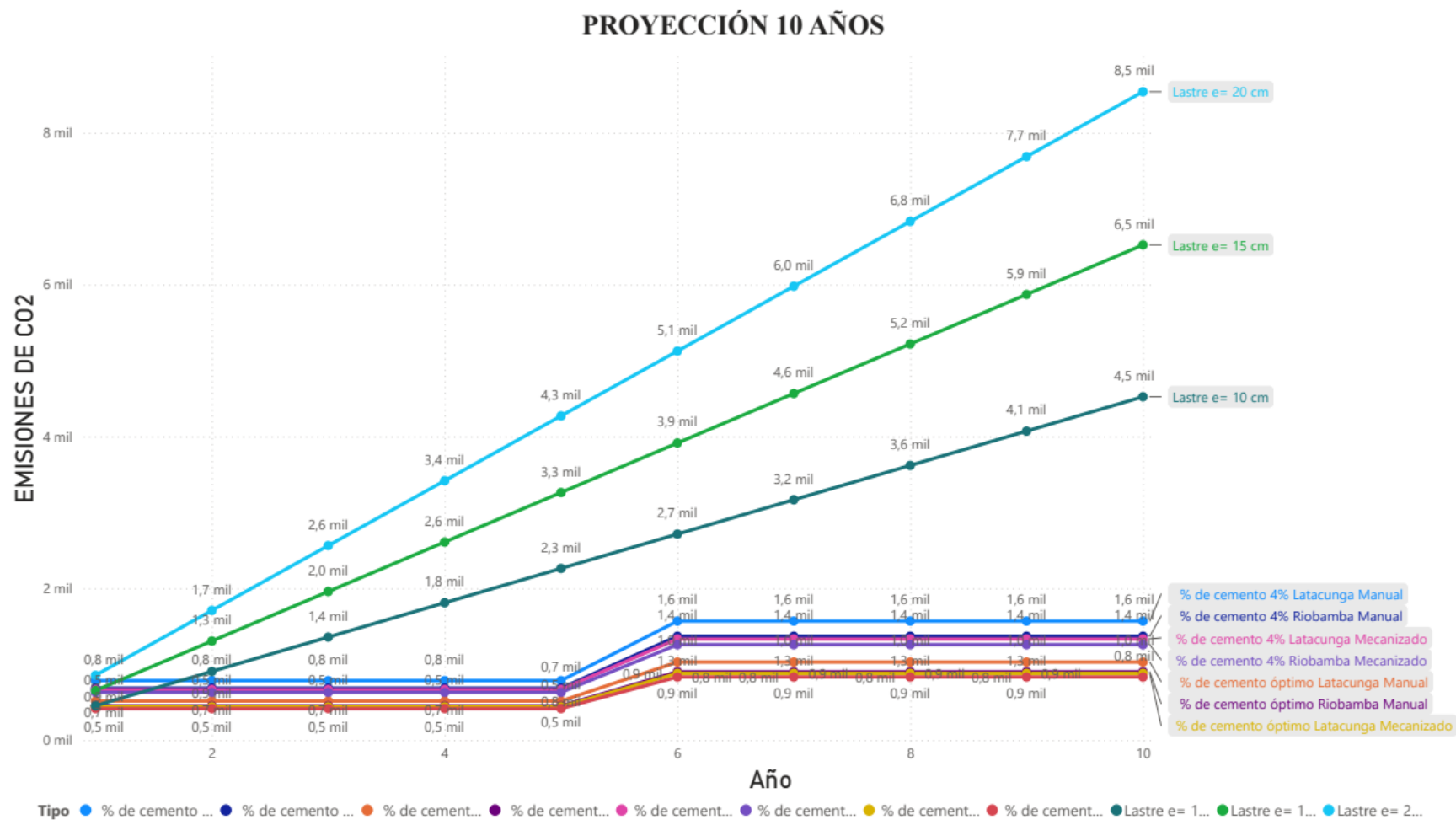


Figura 15. Proyección de la huella de carbono del método de lastrado y método de estabilización con cemento a 10 años en la vía Alao - Pungalá

Al analizar la Figura 15, correspondiente a la proyección de la huella de carbono durante un periodo de 10 años en la vía Alao – Pungalá, se puede evidenciar una alta diferencia en la emisión de CO₂ de los métodos constructivos antes mencionados. El método de lastrado presenta un incremento progresivo de emisiones de CO₂ debido a la necesidad de intervenciones periódicas durante su vida útil, alcanzando el escenario más crítico con un espesor de 20 cm y una emisión acumulada de aproximadamente 8500 Toneladas de CO₂.

Por otro lado, la estabilización con cemento genera una mayor emisión de CO₂ inicial que está asociada principalmente a la fabricación del material, sin embargo, debido a su mayor durabilidad, requiere de un número mucho menor de intervenciones a través del tiempo, manteniendo con ello valores acumulados inferiores al método del lastrado.

Los escenarios con dosificación óptima y aplicación mecanizada de cemento presentan el mejor desempeño ambiental, demostrando con ello que la reducción del contenido de cemento y la optimización del proceso constructivo permite disminuir en un porcentaje alto la huella de carbono.

En conclusión, aunque el lastre puede presentar menores emisiones durante la intervención inicial, su mantenimiento frecuente genera un incremento acumulativo considerable. Por esta razón, bajo un análisis a largo plazo, la estabilización con cemento representa una alternativa más eficiente ambientalmente para la conservación de vías de tercer orden.

- **Cascada de Puelazo - Bocatoma**

A continuación, se presenta la proyección a 10 años de la vía Cascada de Puelazo – Bocatoma.

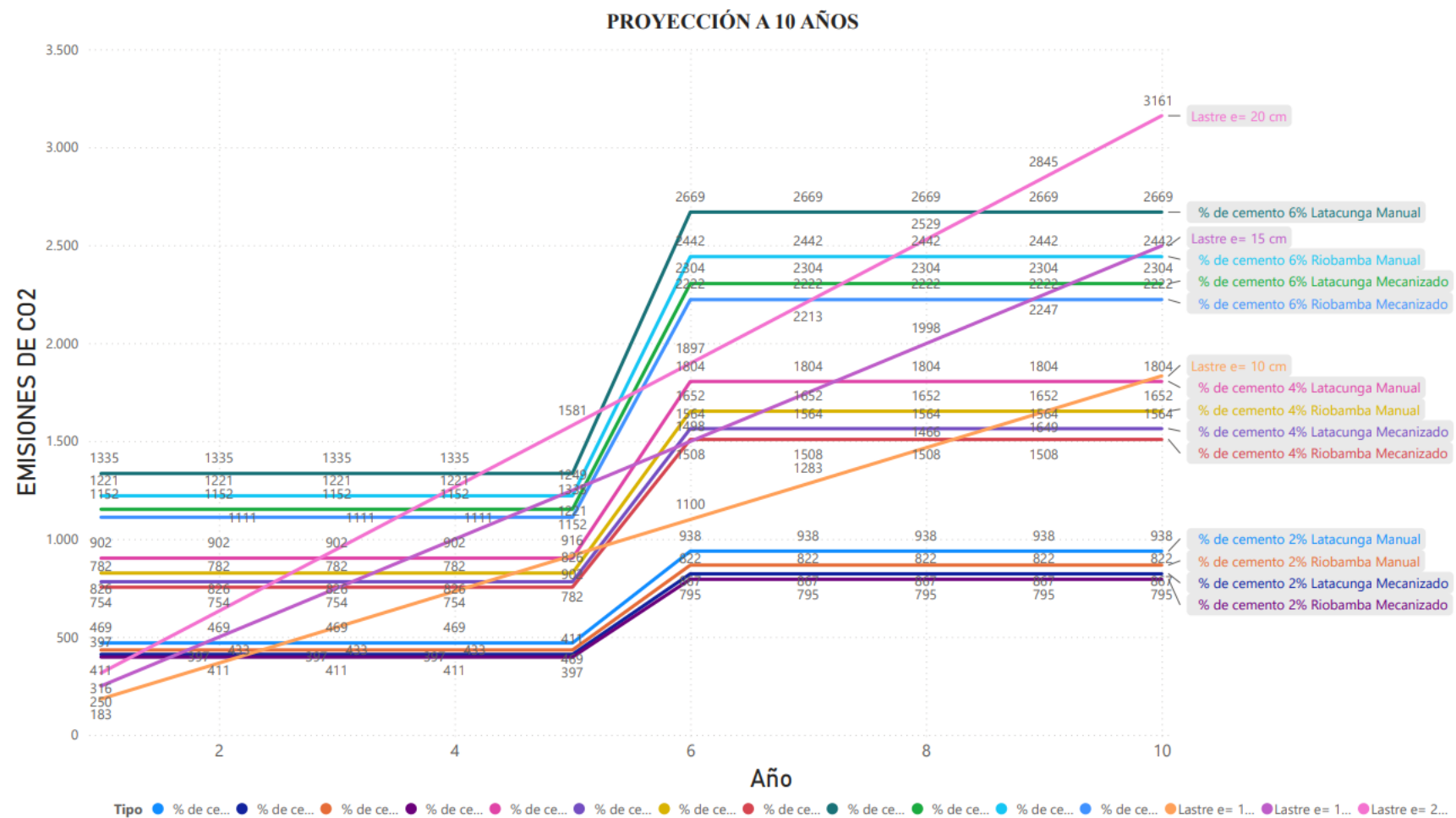


Figura 16. Proyección de la huella de carbono del método de lastrado y método de estabilización con cemento a 10 años en la vía Cascada de Puelazo - Bocatoma

La Figura 16 muestra la proyección de emisiones acumuladas de CO₂, durante un periodo de 10 años para las distintas simulaciones del método de lastrado y el método de estabilización con cemento, el eje “x” representa los años de análisis y el eje “y” las emisiones acumuladas de CO₂ expresadas en toneladas.

Uno de los aspectos relevantes que se observaron es que la diferencia entre el método de lastrado y la estabilización con cemento es considerablemente menor que la obtenida en la vía Alao – Pungalá, este comportamiento se debe a que, en la vía Cascada Puelazo – Bocatoma, el material de lastre se encuentra disponible dentro del mismo tramo de intervención, lo que elimina la necesidad de transporte desde canteras externas. Como consecuencia, se reducen las emisiones asociadas al cargado, acarreo y movilización del material granular, que constituyen una de las principales fuentes de emisión dentro del método de lastrado.

Sin embargo, esta similitud se presenta principalmente al comparar el lastrado con simulaciones que emplean dosificaciones de cemento de 4% y 6%, las cuales incrementan las emisiones debido al mayor consumo del material estabilizante, por lo contrario, la dosificación del 2% mantiene una gran diferencia respecto al método de lastrado y presenta menores valores de huella de carbono dentro de las simulaciones de estabilización analizados, cabe recalcar que dentro de las simulaciones de estabilización con cemento, se identifica que la dosificación del 2% presenta el comportamiento más eficiente, debido a que genera menores emisiones de CO₂ y permite mejorar las características de la subrasante sin incrementar innecesariamente el consumo de cemento.

Considerando que los suelos analizados corresponden principalmente a suelos arenosos, el aumento de dosificación por encima de este porcentaje no representa una alternativa ambientalmente favorable, ya que no genera beneficio proporcional frente al incremento del material estabilizante empleado.

Adicionalmente, el análisis demuestra que las emisiones generadas por el método de lastrado continúan incrementándose durante el periodo evaluado debido a la necesidad de realizar mantenimientos periódicos, en contraste, la estabilización con cemento presenta una mayor emisión inicial, pero requiere menos intervenciones a lo largo del tiempo, lo que permite mantener las emisiones acumuladas después de cada ciclo de mantenimiento.

Debido a esto, la evaluación ambiental no debe ser limitada únicamente a las emisiones iniciales durante la construcción, sino que, además, se debe considerar la frecuencia de intervenciones, durabilidad de cada método estabilizante y el comportamiento funcional a lo largo del tiempo, por lo que, el método con menor impacto inicial no necesariamente es la alternativa más eficiente.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La comparación de la huella de carbono teórica entre el método de lastrado y la estabilización de subrasante con cemento permitió determinar que la alternativa ambientalmente más favorable corresponde a la estabilización con cemento cuando se emplean dosificaciones técnicamente optimizadas. Aunque este método presenta mayores emisiones iniciales asociadas principalmente a la fabricación del cemento Portland, su mayor durabilidad y menor frecuencia de intervención permiten reducir significativamente las emisiones acumuladas durante la vida útil analizada. En ambas vías de estudio, la estabilización con cemento presentó menores emisiones acumuladas en un plazo de 10 años en comparación con el método de lastrado, evidenciando que la evaluación ambiental de alternativas viales debe considerar no solo las emisiones generadas durante la construcción inicial, sino también el comportamiento de cada solución a largo plazo.

Se definieron los procesos constructivos correspondientes a las actividades de mantenimiento vial mediante el método de lastrado y la estabilización de subrasante con cemento para las vías Alao – Pungalá y Cascada de Puelazo – Bocatoma, lo que permitió identificar las actividades, maquinaria, materiales, recursos y tiempos de ejecución requeridos en cada alternativa, constituyendo la base para la posterior estimación de consumos y emisiones de CO₂ asociados a cada método.

Las mayores emisiones de CO₂ asociadas al método de estabilización con cemento se generan durante la fabricación del cemento Portland, debido al elevado consumo energético y a los procesos industriales requeridos para su producción, por otra parte, en el método de lastrado, las principales fuentes de emisión corresponden al transporte del material granular, la operación continua de maquinaria y a la movilización recurrente de recursos durante las actividades de mantenimiento.

La evaluación de emisiones de CO₂ por proceso constructivo y por intervención total, evidencia que el impacto ambiental de ambos métodos no depende únicamente del material que se emplea, sino que además de factores operativos como distancias de acarreo, disponibilidad de recursos en el sitio, recurrencia de mantenimientos, y condiciones geométricas de las vías. Por esto, las características de cada tramo influyen directamente en los resultados obtenidos, demostrando así que la selección de un método no se debe basar únicamente en criterios económicos o estructurales, sino que además en variables operativas y ambientales.

La proyección de emisiones en un periodo de 10 años demuestra que la frecuencia de mantenimiento constituye uno de los factores más influyentes en la huella de carbono de las vías de tercer orden. En la vía Alao – Pungalá, el método de lastrado con espesor de 20 cm alcanzó una emisión acumulada de 8541.029 toneladas de CO₂, mientras que la estabilización con cemento con la dosificación óptima (T1= 3%, T2= 2%, T3=4% y T4= 2%) registró 830.81 toneladas de CO₂, equivalente a una reducción del 90.27 %, de igual manera, en la vía Cascada Puelazo – Bocatoma, el lastrado con espesor de 20 cm generó

2770.545 toneladas de CO₂, mientras que la estabilización con cemento al 2% generó 794.57 toneladas de CO₂, representando una reducción aproximada del 71.32% , estos resultados evidencian que, aunque el lastrado pueda presentar menores emisiones de durante una intervención individual, la necesidad de realizar mantenimiento recurrentes incrementa su impacto ambiental acumulado a largo plazo.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda priorizar la estabilización con cemento en proyectos a largo plazo, puesto que esto va a reducir las emisiones de CO₂ acumuladas por mantenimientos recurrentes.
- Se recomienda utilizar el método de lastrado en vías que presenten canteras cerca de la zona para con ello reducir la huella de carbono por transporte.
- Se recomienda establecer centros de acopio o campamentos de STOK intermedios para la maquinaria, pues el traslado desde la zona de stock ESPOCH genera traslados de maquinaria innecesarios.
- Se recomienda realizar ensayos de laboratorio (clasificación SUCS/AASHTO y CBR) para determinar la compatibilidad del suelo con el agente estabilizante, con el objetivo de evitar emplear métodos constructivos ineficientes.
- Se recomienda renovar y controlar el estado mecánico de la flota vehicular con la que se va a trabajar y darles su respectivo mantenimiento para con ello tener una eficiencia en la combustión del combustible.
- Se recomienda intervenir y mejorar las vías y rutas de acceso que conectan las plantas de producción de cemento y las canteras con frentes de obra, pues el mantener la capa de rodadura en buen estado superficial disminuye la resistencia al rodamiento de los vehículos de carga pesada logrando con ello optimizar el rendimiento del combustible y reducir las emisiones de CO₂.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, “Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 – Volumen 1: Procedimientos para proyectos viales,” Quito, 2013.
- [2] C. L. Orellana Quezada and L. F. Tenesaca Calle, “Uso de materiales pétreos modificados para mejorar la estructura de vías urbanas en el último cantón de Cuenca,” Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2023. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/5b48e025-9a53-44ff-babe-ff7f946e2d71>
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009157926.
- [4] E. A. Jara Páez, “Reducción en tiempos de mantenimiento vial de las vías de tercer orden del cantón Riobamba mediante estabilización de subrasante,” Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12490>
- [5] Google LLC, “Google Maps,” Google LLC. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>
- [6] Esri, “World Imagery.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>
- [7] Mejía Gallegos, “Relación costo beneficio en el mantenimiento de carreteras de segundo orden estabilizando la subrasante con cal o cemento,” Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2025. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12691>
- [8] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Estructura poblacional del Ecuador: Censo de Población y Vivienda 2022,” Quito, 2023. Accessed: May 31, 2026. [Online]. Available: <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/>
- [9] J. F. Rivera, A. Aguirre-Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez, and A. Orobio, “Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión),” *Informador Técnico*, vol. 84, no. 2, pp. 202–226, Mar. 2020, doi: 10.23850/22565035.2530.

- [10] M. A. Sánchez Albán, “Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector de Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí,” Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2014. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e1c8a587-00a3-41f3-a113-c8a380f9baed/content>
- [11] C. Jurado and D. Clavijo, “Estabilización de suelos con cemento tipo MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PLMQ, sector Quitumbe,” Disertación de pregrado para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2016.
- [12] C. I. Zamora Chávez and E. H. Ortiz Hernández, “Estabilización de la subrasante mediante cal y cemento para una obra vial, ubicada en Rocafuerte – Tosagua sector El Junco,” *Polo del Conocimiento*, vol. 8, no. 11, 2023.
- [13] A. León-Velez and V. Guillén-Mena, “Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador,” *Ambiente Construido*, vol. 20, no. 3, pp. 611–625, Jul. 2020, doi: 10.1590/s1678-86212020000300448.
- [14] T. Watari, Z. Cao, A. C. Serrenho, and J. Cullen, “Growing role of concrete in sand and climate crises,” *iScience*, vol. 26, no. 5, p. 106782, May 2023, doi: 10.1016/j.isci.2023.106782.
- [15] C. J. Parra Merino, “Estabilización del suelo empleando el reciclaje de pavimento en la vía de tercer orden Alao – Pungalá,” Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/14383>
- [16] P. A. Iñiguez Delgado, “Análisis comparativo de costos y rendimiento entre la estabilización suelo cemento y el método convencional para el asfaltado vial,” Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, 2024. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/974e330a-3b2a-4ef9-995d-fd4e4a7946fb>
- [17] M. G. Fratelli, *Suelos, fundaciones y muros*. Caracas: Imprenta Bonalde, 1993.
- [18] Holcim Ecuador, “Estabilización de suelos en Ingapirca,” Holcim Ecuador. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.holcim.com.ec/estabilizacion-de-suelos-en-ingapirca>

- [19] Holcim Ecuador, “Boletín 2: Aplicación metodología TCP,” Holcim Ecuador. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.holcim.com.ec/boletin-2-aplicacion-metodologia-tcp>
- [20] Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, “Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002,” Quito, 2002. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.obraspublicas.gob.ec>
- [21] Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP), “Ficha técnica: Servicio de mantenimiento rutinario de red vial lastrada,” Quito, 2017.
- [22] ASOBANCA, BID Invest, FMO, and Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recursos, “Guía de minas y canteras de material pétreo,” Ecuador, 2022.
- [23] ASTM International, “ASTM C150/C150M-24: Standard Specification for Portland Cement,” West Conshohocken, PA, 2024. Accessed: May 29, 2026.
- [24] ASTM International, “ASTM C1157/C1157M-23: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement,” West Conshohocken, PA, 2023. Accessed: May 29, 2026.
- [25] E. J. Lluminga Cumbajín, “Guayabal, San Pedro de la Bendita reconfiguración y colocación de la carpeta asfáltica (km 0+000 hasta 7+552.76),” Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Perito Geomensor, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2015. Accessed: May 29, 2026.
- [26] B. E. Melgar Sett, “Comparación de resultados del ensayo Proctor modificado en diferentes laboratorios de mecánica de suelos,” Trabajo de graduación para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2024.
- [27] Mamut Andino, “Transporte de Graneles.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.mamutandino.com/transporte-graneles>
- [28] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6th ed. México D.F.: McGraw-Hill Education, 2014.
- [29] J. Rico Rodríguez and A. Del Castillo, *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*, vol. 1. México, D.F.: Limusa, 2005.
- [30] M. E. Amaya Navarrete, “Estabilización de suelos superficiales del NAICM con óxido de calcio (CaO),” Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2017.

- [31] Eveligh Prado-Carpio and Cristhian Jover Castro Armijos, “Intensidad energética del Ecuador y estimación de la huella de carbono,” 2017.
- [32] A. y T. E. (MAATE) Ministerio del Ambiente, “Documento del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador 2024,” Quito , 2024.
- [33] Worldometer, “Emisiones de CO₂ de Ecuador,” Worldometer.
- [34] M. D. Freire Ramón, “Estimación de la huella de carbono del acero estructural de los métodos constructivos tradicionales de Galápagos,” Trabajo de fin de carrera para la obtención del título de Licenciatura en Gestión Ambiental, Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2022.
- [35] E. Wu, Q. Wang, L. Ke, and G. Zhang, “Study on Carbon Emission Characteristics and Emission Reduction Measures of Lime Production—A Case of Enterprise in the Yangtze River Basin,” *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10185, Jun. 2023, doi: 10.3390/su151310185.
- [36] A. S. Yunga Silva, “Mejora de la capacidad portante de la subrasante aplicando cal en vías de segundo orden del cantón Alausí,” Trabajo de titulación de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2022. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10846>
- [37] J. Krithika and G. B. Ramesh Kumar, “Influence of fly ash on concrete – A systematic review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 906–911, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.425.
- [38] P. de la R. Ecuador, *Reglamento a la Ley de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial*. Ecuador: Registro Oficial Suplemento 731, 2012. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Decreto-Ejecutivo-No.-1196-de-11-06-2012-REGLAMENTO-A-LA-LEY-DE-TRANSPORTE-TERRESTRE-TRANSITO-Y-SEGURIDAD-VIA.pdf>
- [39] C. A. Ruiz Ávila, “Rendimiento y costos en la maquinaria de compactación,” Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2002. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmfcir934r/doc/bmfcir934r.pdf>
- [40] L. G. Farfán Gómez, “Estabilización de subrasante en suelo arcilloso aplicando cemento en la Av. Los Naranjos Unidad Vecinal Cehuarpampa, provincia Andahuaylas – Apurímac 2022,” Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Lima, 2022. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/96705>

- [41] E. G. Gavilanes Bayas, “Estabilización y mejoramiento de sub-rasante mediante cal y cemento para una obra vial en el sector de Santos Pamba barrio Colinas del Sur,” Trabajo de titulación, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, 2015. Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2191>
- [42] World Bank, “The Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM-III): Description of the HDM-III Model,” Washington, D.C., 1997. Accessed: Jun. 15, 2026. [Online]. Available: https://documents1.worldbank.org/curated/en/129721468326428758/pdf/multi_page.pdf
- [43] J. R. Menéndez, *Mantenimiento Rutinario de Caminos con Microempresas*, 1st edition. Lima, Perú: Oficina Internacional del Trabajo (OIT). Accessed: Jun. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/258763545_Routine_Maintenance_of_Roads_with_Small_Contractors_Tecnical_Manual_in_spanish
- [44] Holcim Ecuador S.A., “Boletín #8: Estabilizaciones de suelo con Cemento Tipo MH INEN 2380,” Guayaquil, Ecuador, 2024. Accessed: Jun. 01, 2026. [Online]. Available: https://www.holcim.com.ec/sites/ecuador/files/2024-03/boletin_estabilizaciones_8.pdf
- [45] United Nations Environment Programme (UNEP), “2023 Global Status Report for Buildings and Construction,” Nairobi, 2023.
- [46] Komatsu Ltd., “Motoniveladora GD535-5,” 2019. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://khsamgwebpro.blob.core.windows.net/wp-content/uploads/2019/07/26143728/Cat%C3%A1logo-Motoniveladora-GD535-5-KLTD-espa%C3%B1ol-digital.pdf>
- [47] René Eduardo Lema Aguilar, “Determinación del rendimiento de una motoniveladora Komatsu GD 5553 de 160 HP para el extendido y nivelación de una subbase,” Universidad Técnica de Machala, 2017. Accessed: Jun. 09, 2026.
- [48] Carlos Iván Zamora Chávez and Eduardo Humberto Ortiz Hernández, “Estabilización de la subrasante mediante cal y cemento para una obra vial, ubicada en Rocafuerte-Tosagua sector El Junco,” *Polo del Conocimiento*, vol. 8, no. 11, 2023, doi: 10.23857/pc.v8i11.6244.
- [49] Universidad Politécnica de Madrid, “Movimiento de Tierras.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://oa.upm.es/67524/1/movimiento_tierras.pdf

- [50] Streumaster, “Esparcidores de Ligante Serie TC/MC.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o253819v77_TCMC-Series_Brochure_Datasheet_esES.pdf
- [51] Erik Fernando García Vallejo, “Huella de carbono en proceso de construcción vial, caso de estudio Vía San Alfonso – Santo Domingo,” Universidad Nacional de Chimborazo, 2024. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/13744/1/Garc%C3%ADa%20Vallejo%2C%20Erik%20%282024%29.%20Huella%20de%20Carbono%20en%20proceso%20de%20construcci%C3%B3n%20vial%2C%20caso%20de%20estudio%20V%C3%ADa%20San%20Alfonso%20%E2%80%93%20Santo%20Domingo..pdf>
- [52] European Rental Association, “Carbon Footprint of Construction Equipment,” 2019. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://erarental.org/wp-content/uploads/2026/04/Carbon-Footprint-of-Construction-Equipment-report.pdf>
- [53] Caterpillar Inc., “2024 Sustainability Report.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/caterpillar-inc_we-have-released-our-2024-sustainability-activity-7328072288665321473-V8P-
- [54] Ángel Andrés Celi Macías, José Pablo Mendoza Alcívar, and Edison Tejada Piusseaut, “Mejoramiento de subrasante mediante la estabilización con cemento en obras viales del cantón Portoviejo,” *Dominio de las Ciencias*, vol. 9, pp. 1–15, 2023, Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3184/7383>
- [55] Cristian Alejandro Ruiz Ávila, “Rendimiento y costos en la maquinaria de compactación,” Universidad Austral de Chile, 2002. Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmfcir934r/doc/bmfcir934r.pdf>
- [56] Jesús Iván Aguilar Galván, “Rendimiento de Rodillos,” 2023.
- [57] Caterpillar Inc., “Vibratory Soil Compactors.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/compactors/vibratory-soil-compactors.html
- [58] Barmesa Pumps, “Autocebantes Diésel.” Accessed: Jun. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.barmesapumps.com/CO/productos/autocebantes_diesel.html

- [59] Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, “Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002,” 2002.

ANEXOS

