



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Análisis y evaluación de los procesos de carga y transporte en el área
minera para libre aprovechamiento La Virginia, cantón Paute - provincia
del Azuay”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del grado académico de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

BUÑAY GUALPA ARMANDO VINICIO

LOJÁN ARÉVALO EMERSON DANIEL

Director:

ING. LEONARDO ANÍBAL NÚÑEZ RODAS

CUENCA, ECUADOR

2026

Armando Vinicio Bunñay Gualpa

Emerson Daniel Loján Arévalo

Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Mayo 2026

Titulo:

“Análisis y evaluación de los procesos de carga y transporte en el área minera para libre aprovechamiento La Virginia, cantón Paute - provincia del Azuay”

DEDICATORIA

Agradezco profundamente con mucho cariño a mi madre Paula Otilia Arévalo Acaro y a mi padre que en paz descansa el cual desde el cielo sé que me está apoyando y siempre me apoyará en la toma de mis decisiones, mi madre quien han sido mi pilar fundamental durante esta etapa universitaria siendo un apoyo incondicional, quien con su esfuerzo y valores me ha demostrado lo valioso de cumplir una meta y siendo ellos un motor necesario en mi vida.

Dedico este trabajo de tesis, así como todo mi proceso de formación universitaria, a Dios, por ser guía constante en mi vida. Su fortaleza, sabiduría y compañía me han sostenido en los momentos de incertidumbre y me han permitido avanzar con firmeza hacia mis metas.

Con profundo amor y gratitud, dedico este logro a mis padres Vinicio Buñay y Alexandra Gualpa, quienes con su esfuerzo, apoyo incondicional y valores han sido el pilar fundamental de mi crecimiento personal y académico. Gracias por creer en mí, impulsarme y enseñarme a luchar con perseverancia.

Extiendo esta dedicatoria a mis abuelitos Flaberto y Georgina, cuya presencia, cariño y ejemplo han sido siempre una luz en mi vida. Su sabiduría y apoyo han acompañado cada uno de mis pasos.

De manera muy especial, dedico también este logro a mi abuelita Mami Tesha, quien ha sido como una segunda madre para mí. Su amor, cuidado y fortaleza han marcado profundamente mi vida, convirtiéndose en un sostén invaluable en mi formación.

Asimismo, dedico este logro a Anthu, quien fue una persona muy especial en mi vida y me acompañó con su amor y apoyo a lo largo de mi carrera. Aunque hoy ya no está físicamente conmigo, su recuerdo y todo lo que compartimos permanecerán siempre en mi corazón. Este logro también es suyo.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Ingeniería en Minas de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, la cual nos acogió durante nuestra formación académica, y donde contamos con todos los medios para el aprendizaje.

Al Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas, quien ha sido nuestro director de tesis que nos supo guiar durante todo el trabajo, además de brindarnos su apoyo incondicional, de igual manera al Ing. Patricio Feijoo, Ing. Fernando Valencia y Ing. Eduardo Luna, por sus conocimientos impartidos a lo largo de nuestra vida universitaria.

A la prefectura del Azuay, en especial al Ing. Julio Castro y al Ing. Mateo Carpio, por habernos brindado la apertura de realizar nuestro proyecto de tesis, además de facilitarnos la información necesaria para el desarrollo del mismo.

A nuestros compañeros y amigos más cercanos, con los cuales compartimos experiencias y muy buenos momentos inolvidables dentro y fuera de las aulas a lo largo de estos años.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo analizar y evaluar los procesos de carga y transporte en el área de libre aprovechamiento La Virginia. La investigación se estructuró en dos fases: una fase investigativa, orientada a la revisión documental, análisis técnico y modelamiento de los ciclos operativos; y una fase práctica, enfocada en la toma de datos en campo, la evaluación del rendimiento real de la maquinaria y la validación de los indicadores obtenidos.

Los resultados evidenciaron deficiencias principalmente en los ciclos de acarreo y tiempos de carguío, donde se registraron demoras y periodos improductivos que afectaron la productividad. Asimismo, se identificaron oportunidades de mejora en la planificación de rutas de transporte, en la gestión de la flota de volquetes y en la reducción de tiempos muertos.

Como estrategia principal, se planteó la optimización de rutas y mantenimiento preventivo de equipos, lo que nos permitió proyectar una reducción de costos operativos y un incremento en la eficiencia de los ciclos. En conclusión, este estudio nos aportó lineamientos técnicos que favorecen una operación minera más sostenible, eficiente y acorde con la normativa vigente.

Palabras clave: carguío, transporte, productividad, optimización, sostenibilidad.

Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Director de Trabajo de Titulación

ABSTRACT

The objective of this thesis was to analyze and evaluate the loading and transport processes in the La Virginia open-access area. The research was structured in two phases: a research phase, focused on literature review, technical analysis, and modeling of operational cycles; and a practical phase, focused on field data collection, evaluation of actual machinery performance, and validation of the obtained indicators.

The results revealed deficiencies primarily in haulage cycles and loading times, where delays and unproductive periods were recorded that affected productivity. Additionally, opportunities for improvement were identified in transport route planning, dump truck fleet management, and the reduction of downtime.

As the main strategy, route optimization and preventive equipment maintenance were proposed, allowing us to project a reduction in operating costs and an increase in cycle efficiency. In conclusion, this study provided us with technical guidelines that promote a more sustainable and efficient mining operation in compliance with current regulations.

Keywords: loading, transportation, productivity, optimization, sustainability.

Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Thesis Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Título:	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1.1. Antecedentes del estudio	3
1.2. Marco legal y normativo	5
1.3 Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio.....	8
1.4. Geomorfología.....	9
1.5. Aspectos sociales y ambientales	11
1.6. Marco Teórico.....	12
1.6.1. Minería a cielo abierto y libre aprovechamiento	12
1.6.2. Método de explotación en canteras	13
1.6.3. Clasificación de materiales que produce La Virginia	13
1.6.4. Importancia de los áridos y pétreos para la infraestructura vial	15
1.6.5. Procesos de carguío y transporte en minería a cielo abierto.....	16
1.6.6. Equipos de carga.....	16
1.6.7. Volquetes.....	17
1.6.8. Cargadora frontal	18
1.6.9. Excavadora de orugas	18
1.6.10. Productividad minera y tiempos de ciclo	19
1.6.11. Costos operativos en minería de áridos	21
1.6.12. Gestión ambiental y sostenibilidad.....	21
CAPÍTULO 2	23
2.1. Evaluación del rendimiento de maquinaria	23

2.2. Cálculo de tiempos de ciclo y productividad.....	26
2.2.1. Producción.....	26
2.2.2. Procesamiento interno	27
2.2.3. Acarreo hacia el frente de trabajo.....	27
2.2.4. Los tiempos promedio registrados fueron de dos tipos de volquetes.....	30
2.2.5. Síntesis de los ciclos operativos:	36
2.3. Determinación de costos operativos y análisis económico	37
2.4. Identificación de limitantes técnicos y logísticos	39
CAPÍTULO 3.....	40
3.1. Estrategias de mejora operativa.....	40
3.1.1. Optimización de rutas de transporte	40
3.1.2. Planificación eficiente de la flota	41
3.1.3. Control y reducción de tiempos muertos.....	42
3.1.4. Capacitación de operadores.....	42
3.1.5. Mantenimiento preventivo y predictivo de equipos	43
3.1.6. Incorporación de herramientas tecnológicas	43
3.1.7. Mejora en la gestión operativa integral	44
3.2. Modelamiento de escenarios de optimización.....	44
3.2.1. Escenario actual (condición base)	45
3.2.2. Escenario optimizado 1 (reducción del 10 % en tiempo de transporte).....	45
3.2.3. Escenario optimizado 2 (reducción del 20 % en tiempo de transporte).....	46
3.2.4. Análisis comparativo de escenarios.....	47
3.2.5. Interpretación técnica del modelamiento.....	47
3.3. Evaluación económica de la propuesta.....	48
3.4. Beneficios técnicos, ambientales y sociales	50
3.4.1. Beneficios técnicos.....	50
3.4.2. Beneficios ambientales.....	51
3.4.3. Beneficios sociales	52
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	56

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXOS	62

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa geológico de La Virginia.....	9
Figura 2. Mapa geomorfológico de La Virginia	10
Figura 3. Ciclos de carga y transporte en La Virginia	29
Figura 4. Promedios de los ciclos operativos	31
Figura 5. Promedios de los ciclos operativos	35

Índice de Tablas

Tabla 1. Materiales explotados en La Virginia	14
Tabla 2. Características de Cargadora Frontal	18
Tabla 3. Características de la Excavadora de Orugas	19
Tabla 4. Datos recolectados (Volquetes 8 metros Cúbicos).....	30
Tabla 5. Resultados obtenidos	31
Tabla 6. Datos obtenidos volquetes de 12 metros cúbicos	33
Tabla 7. Resultados obtenidos(Volquete de 12 metros cúbicos).....	34
Tabla 8. Costos de la cargadora frontal	37
Tabla 9. Costos horarios de volquetes (8 m ³)	38
Tabla 10. Costos horario por volquete (12 m ³).....	38

INTRODUCCIÓN

El área de libre aprovechamiento La Virginia, ubicada en la parroquia Dug-Dug del cantón Paute, constituye una de las principales fuentes de materiales áridos y pétreos utilizados para el mantenimiento y construcción de infraestructura vial en la provincia del Azuay.

Debido a su relevancia estratégica, la eficiencia de los procesos de carga y transporte se convierte en un factor determinante para garantizar la continuidad de obras públicas y la disponibilidad de los agregados en los cantones Gualaceo y Paute. Sin embargo, en los últimos años se han evidenciado limitaciones técnicas y logísticas relacionadas con la planificación operativa, la selección de maquinaria, la inexistencia de indicadores de rendimiento y la presencia de tiempos improductivos que elevan los costos de operación. La clausura temporal de la mina en 2022 refuerza la necesidad de contar con estudios técnicos que permitan mejorar la gestión de estas actividades.

El proceso de carga y transporte constituye una de las etapas más costosas dentro de las operaciones de minería a cielo abierto, representando hasta el 60 % del costo total de la explotación. Su correcta evaluación requiere considerar aspectos geológicos, geomorfológicos, ambientales, sociales y normativos, entre ellos las especificaciones MOP-001-F-2002, las Normas Ecuatorianas Viales NEVI-12 y el Reglamento Ambiental para Actividades Mineras del MAATE. Asimismo, la transferencia de competencias a los Gobiernos Autónomos Descentralizados ha establecido nuevos lineamientos para la gestión del recurso y el control de la actividad extractiva a nivel municipal (Ecuador A. N., 2009)

Los lineamientos son:

- Regulación directa de la actividad minera local
- Emisión de ordenanzas municipales
- Control y fiscalización de las operaciones
- Gestión ambiental local
- Planificación territorial minera
- Coordinación con entidades nacionales
- Responsabilidad social y desarrollo local

En este contexto, la presente investigación tuvo como propósito evaluar el ciclo de carguío y transporte del área de libre aprovechamiento La Virginia mediante un enfoque cuantitativo y descriptivo, acompañado de levantamientos de campo, modelamiento de tiempos de ciclo y análisis comparativos de productividad. El estudio permitió identificar las principales limitaciones operativas, estimar los costos relacionados con el acarreo y la capacidad de la maquinaria, además de determinar la eficiencia real de los procesos actualmente implementados. Con base en estos resultados, se desarrolló una propuesta de optimización orientada a reducir tiempos improductivos (Tiempos muertos), mejorar la seguridad operativa, disminuir costos y consolidar un esquema de explotación más eficiente y sostenible para el aprovechamiento del recurso.

El aporte central de este trabajo radica en proporcionar un modelo técnico replicable para la evaluación de los procesos de carguío y transporte en áreas del libre aprovechamiento, contribuyendo al fortalecimiento de la infraestructura vial y al manejo responsable de materiales pétreos en el marco de la normativa vigente.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CONTEXTUAL

1.1. Antecedentes del estudio

El área de libre aprovechamiento La Virginia, ubicada en la parroquia Dug-Dug del cantón Paute, constituye una zona estratégica para el abastecimiento de materiales áridos y pétreos destinados principalmente a obras de infraestructura vial en los cantones Gualaceo y Paute. Históricamente, esta área ha sido una de las principales fuentes de agregados para la Prefectura del Azuay, debido a la calidad de sus depósitos, su ubicación geográfica y su accesibilidad operativa. No obstante, su explotación ha experimentado limitaciones y cierres temporales que han evidenciado la necesidad de realizar evaluaciones técnicas que permitan garantizar su sostenibilidad y continuidad operacional.

En el año 2022, la Prefectura del Azuay informó sobre la clausura temporal de las actividades en la mina La Virginia debido al incumplimiento de requisitos administrativos y técnicos, lo que afectó directamente la disponibilidad de material para obras públicas y generó retrasos en los programas de mantenimiento vial. Este evento puso en evidencia la importancia de contar con estudios actualizados sobre las condiciones de operación, la eficiencia de la maquinaria y la planificación del proceso de carguío y transporte. Asimismo, resaltó la necesidad de establecer mecanismos de control y mejora continua que permitan optimizar la capacidad productiva del área. (Prefectura del Azuay, 2022)

Los procesos de carga y transporte representan uno de los componentes más significativos dentro del ciclo productivo minero. De acuerdo con la literatura técnica, estas

operaciones pueden llegar a representar hasta el 60 % de los costos operativos de un proyecto de minería a cielo abierto, lo que convierte su análisis en un factor determinante para la rentabilidad y sostenibilidad de la explotación. La ineficiencia en los ciclos de carga y acarreo, la falta de planificación de rutas, la incorrecta selección de maquinaria y los periodos de inactividad influyen directamente en la productividad y en los costos unitarios del material transportado. (Galaz, 2020)

En el contexto ecuatoriano, la explotación de áridos y pétreos se encuentra regulada por un marco legal específico que incluye la Ley de Minería, el Reglamento Ambiental para Actividades Mineras del MAATE (2024), las Especificaciones MOP-001-F-2002 y las Normas Ecuatorianas Viales NEVI-12. Además, desde la transferencia de competencias realizada por el Consejo Nacional de Competencias en 2014, los Gobiernos Autónomos Descentralizados municipales tienen la responsabilidad de autorizar, regular y controlar las actividades extractivas en sus jurisdicciones, dentro de un enfoque de sostenibilidad y uso responsable del recurso. En este marco, La Virginia se ha convertido en un caso representativo de la necesidad de integrar la gestión técnica con la normativa vigente para garantizar la continuidad de la explotación. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2009).

Por otra parte, estudios previos realizados en otras zonas de libre aprovechamiento de la provincia del Azuay han evidenciado que la falta de indicadores operativos, la ausencia de herramientas de simulación de procesos y la variabilidad de las condiciones geotécnicas afectan la productividad. Como consecuencia, existe un creciente interés en aplicar metodologías de análisis técnico, simulación de tiempos de ciclo y modelamiento logístico para mejorar la eficiencia operativa y disminuir los costos asociados al transporte y manejo de materiales.

Por eso, la presente investigación surge como una respuesta a la necesidad de analizar las condiciones operativas actuales de La Virginia, evaluar el ciclo de carguío y transporte y proponer alternativas de optimización técnica. Su desarrollo pretende aportar un modelo metodológico replicable para otras zonas de libre aprovechamiento en el cantón Paute y en la provincia del Azuay, fortaleciendo la gestión de operaciones mineras de pequeña escala bajo criterios de eficiencia, seguridad y sostenibilidad ambiental.

(Prefectura del Azuay, 2022)

1.2. Marco legal y normativo

La explotación de áridos y pétreos en el Ecuador, incluyendo las actividades realizadas en el área de libre aprovechamiento La Virginia, se encuentra regulada por un marco legal amplio que establece los requisitos técnicos, ambientales y administrativos necesarios para garantizar una explotación sostenible y bajo control estatal. Este marco normativo determina las responsabilidades de los diferentes niveles de gobierno, así como los parámetros técnicos obligatorios para las operaciones mineras en canteras y graveras.

(Ministerio del Ambiente, 2024)

En primer lugar, la Ley de Minería y su Reglamento General constituyen la base jurídica que regula las fases de prospección, exploración, explotación, beneficio y cierre de actividades mineras en el país. La normativa establece que toda explotación de materiales no metálicos debe estar acompañada de estudios técnicos que incluyan la caracterización geológica, el diseño del plan de explotación, la evaluación de impactos ambientales y la implementación de mecanismos de control y restauración. Además, se exige el

cumplimiento de requisitos operativos y de seguridad para minimizar riesgos en el proceso extractivo. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2009).

A nivel territorial, el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD) otorga a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) municipales la competencia exclusiva para autorizar, regular y controlar la explotación de áridos y pétreos dentro de su jurisdicción. Esta transferencia de competencias fue oficializada mediante la Resolución CNC-2014-0004 del Consejo Nacional de Competencias, que dispuso que los municipios administren estos recursos bajo criterios de sostenibilidad y uso responsable. De esta manera, el GAD Municipal de Paute es la autoridad encargada de supervisar las actividades extractivas en La Virginia, verificando el cumplimiento de los parámetros técnicos, ambientales y sociales exigidos por la ley. (303, 2010)

En el ámbito ambiental, el Reglamento Ambiental para Actividades Mineras del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2024) establece las obligaciones relacionadas con la prevención, mitigación, compensación y restauración de impactos generados por la explotación minera. La normativa específica que, incluso en áreas de libre aprovechamiento, debe existir un Plan de Manejo Ambiental que contemple acciones como control de emisiones, manejo de desechos, estabilidad de taludes, monitoreo ambiental y medidas de compensación social. Asimismo, el reglamento exige que se mantengan estándares de seguridad ocupacional y gestión adecuada del recurso.

Por otro lado, el marco técnico operativo para la explotación de materiales de construcción está regulado por las Especificaciones Generales MOP-001-F-2002, emitidas

por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE). Estas especificaciones definen los parámetros de calidad que deben cumplir los agregados destinados a la construcción de vías y obras de infraestructura. Incluyen requisitos de granulometría, densidad, resistencia mecánica, durabilidad, límites de desgaste, características fisicoquímicas y metodologías de ensayo. La correcta aplicación de estas especificaciones garantiza que los materiales extraídos de La Virginia sean aptos para proyectos viales en Gualaceo y Paute. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas [MTOPE], 2012)

Además, la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Infraestructura Vial y de Transporte Terrestre (MTOPE, 2022) establece lineamientos para asegurar que las fuentes de materiales utilizados en obras públicas cumplan condiciones de eficiencia, sostenibilidad y calidad técnica. Esta ley refuerza la necesidad de que los proyectos de libre aprovechamiento cuenten con una planificación adecuada del recurso, optimizando la disponibilidad de materiales para la red vial y reduciendo riesgos de desabastecimiento.

Finalmente, el estudio se enmarca también en normativas técnicas como las Normas Ecuatorianas Viales (NEVI-12), que regulan el uso y la calidad de los agregados en carreteras, estableciendo criterios para subbases, bases y capas estructurales. Su cumplimiento es indispensable para garantizar que los áridos extraídos cumplan los estándares requeridos para obras de importancia regional. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas [MTOPE], 2012)

Por lo tanto, este marco legal y normativo establece un sistema integral de gestión que regula la actividad minera en La Virginia, orientado a garantizar una explotación eficiente, segura y ambientalmente responsable. El cumplimiento de estas regulaciones

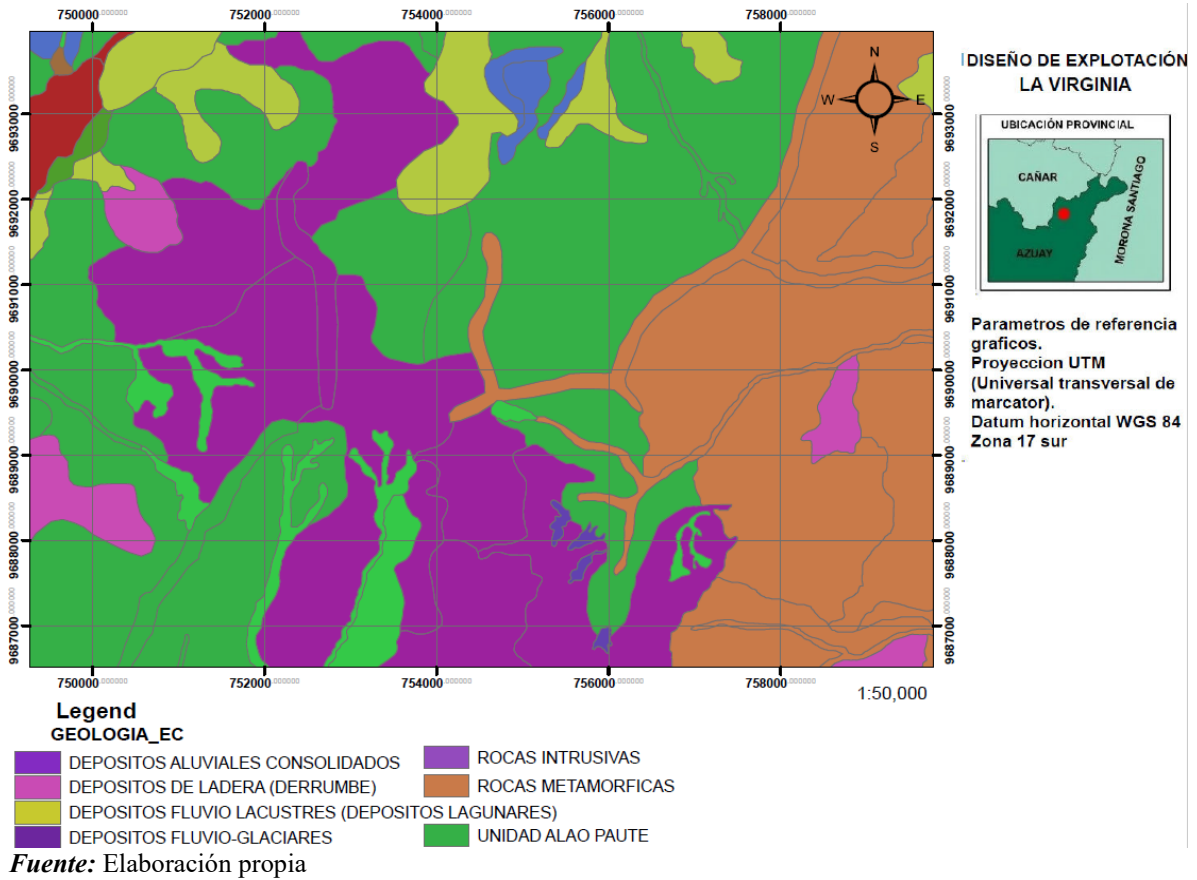
constituye un requisito fundamental para el desarrollo del presente estudio y para asegurar la sostenibilidad del recurso en beneficio de la infraestructura vial de la provincia del Azuay.

1.3 Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio

Como menciona el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico en el año 2017 afirma que la subducción de la placa Nazca bajo la sudamericana ha generado en el Ecuador 3 zonas morfoestructurales coincidentes con las regiones del territorio continental como lo son: Costa, Sierra, Oriente. La Costa corresponde una plataforma ante arco, la Sierra está formada por las cordilleras Occidental y Real, mientras que el oriente lo conforman el levantamiento Napo y la cuenca Amazónica.

El área de libre aprovechamiento La Virginia se encuentra en la cordillera Real geológicamente está conformada por varios cinturones paralelos de roca metamórfica de bajo grado como las pizarras y los esquistos a alto grado de edad paleozoica a pre-cretácica. El cantón Paute se ubica en la Cordillera Real de los Andes, caracterizada por un relieve montañoso y quebrado, con presencia de rocas ígneas y metamórficas, así como depósitos aluviales en zonas bajas. En la zona de La Virginia se han identificado formaciones rocosas aptas para la producción de áridos y gravas, utilizadas principalmente en la construcción vial (Gobierno Provincial del Azuay, 2022).

Figura 1, Mapa geológico de La Virginia

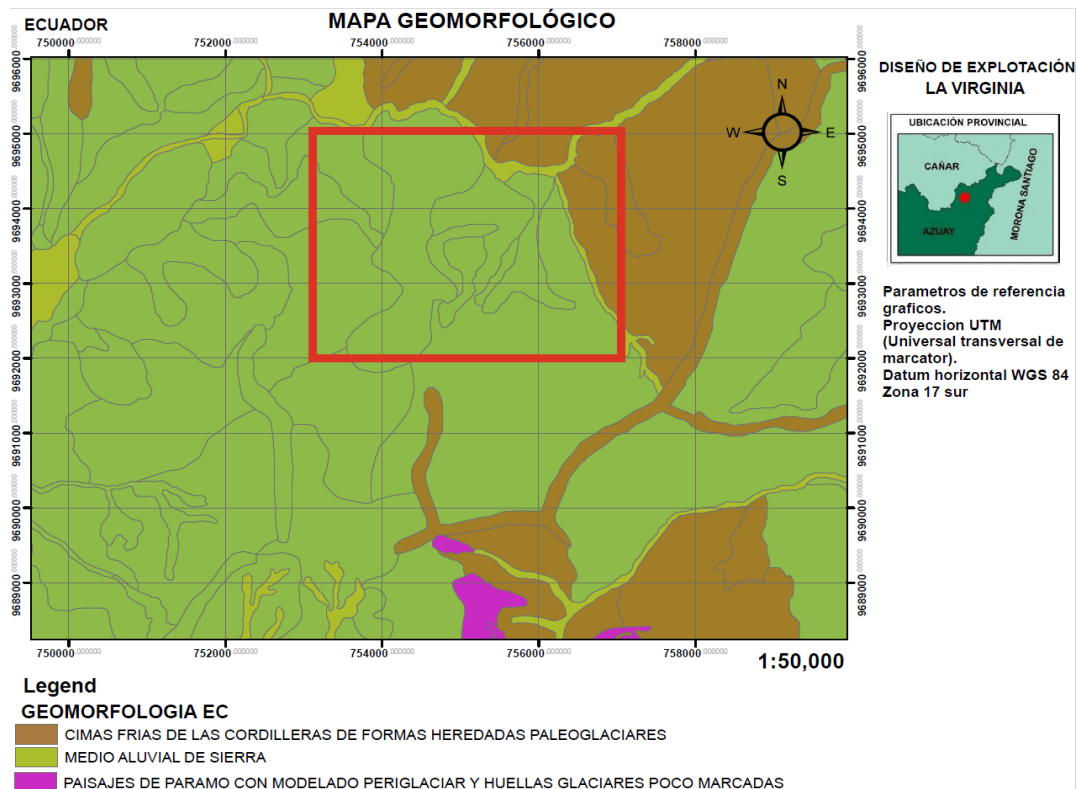


1.4. Geomorfología

En la provincia del Azuay, el área de estudio se caracteriza por ser predominantemente rural. Desde el punto de vista geomorfológico, se identifican diversas unidades litográficas, entre las que destacan vertientes externas,, climas fríos de las cordilleras, medio aluvial, pie de monte y relieves interandinos. El cantón Paute presenta una combinación de relieves interandinos, zonas de pie de monte andino y medios aluviales. Estas características están directamente relacionadas con su ubicación dentro de la cuenca del río Paute y la influencia de sus afluentes.

Geomorfológicamente, el área de libre aprovechamiento La Virginia presenta pendientes pronunciadas, suelos con susceptibilidad a erosión y un régimen de precipitaciones elevado, factores que influyen directamente en la estabilidad de los taludes y en la planificación de rutas de acarreo. En este sentido, la evaluación de la capacidad portante del terreno, la granulometría del material y su resistencia mecánica son requisitos indispensables para asegurar la viabilidad técnica de la explotación. (Prefectura del Azuay, 2022)

Figura 2. Mapa geomorfológico de La Virginia



Fuente: Elaboración propia

1.5. Aspectos sociales y ambientales

La dimensión social en proyectos de libre aprovechamiento es determinante para su viabilidad. En La Virginia, como en otros proyectos similares en la provincia del Azuay, se identifican predios privados dentro del área de influencia directa, lo que exige establecer acuerdos con los propietarios y la comunidad local. La aceptación social es fundamental para garantizar la continuidad de la operación y evitar conflictos relacionados con el acceso al libre aprovechamiento, uso del suelo, tránsito de maquinaria y posibles afectaciones por polvo y ruido.

El proyecto también puede convertirse en un motor de desarrollo local, generando empleo, ayudando con aportes voluntarios al desarrollo comunitario, apoyo logístico y operativo, dinamizando la economía y fortaleciendo la infraestructura vial de la región. Para ello, es necesario articular procesos de participación comunitaria, consultas previas (cuando corresponda) y mecanismos de compensación que aseguren beneficios tangibles para la población. Según el MAATE (2024), toda actividad minera debe incluir un Plan de Manejo Ambiental que contemple medidas de mitigación y compensación ambiental, así como indicadores de impacto social.

La gestión social y ambiental adecuada permite no solo cumplir con la normativa vigente, sino también alcanzar la denominada “licencia social para operar”, indispensable en proyectos mineros de pequeña escala. Esto refuerza la importancia de integrar el componente comunitario en la planificación técnica y económica de la explotación.

1.6. Marco Teórico

La explotación de áridos y pétreos constituye una actividad fundamental dentro del desarrollo de infraestructura vial y proyectos de construcción. En el contexto minero, el proceso inicia con la identificación del recurso, seguido por la extracción, tratamiento y transporte del material hacia puntos de consumo o transformación. Cada etapa está influenciada por parámetros técnicos, geológicos y operativos que condicionan la productividad y sostenibilidad de la operación.

1.6.1. Minería a cielo abierto y libre aprovechamiento

La minería a cielo abierto es un método extractivo empleado comúnmente para materiales no metálicos debido a la accesibilidad del recurso y bajos costos de operación en comparación con la minería subterránea. Consiste en la remoción superficial del material, mediante cortes y bancos, permitiendo el uso directo de maquinaria pesada para carguío y transporte. En Ecuador, la categoría de libre aprovechamiento autoriza la extracción de materiales pétreos destinados principalmente a obras de interés público, siempre que exista permiso emitido por la autoridad competente y un plan de manejo ambiental. (Urbina, 2016)

Para garantizar una operación eficiente, la planificación minera considera elementos como diseño de taludes, estabilidad geotécnica, accesos, pendientes operativas y distancias de acarreo. Una inadecuada gestión de estos factores incrementa los tiempos improductivos y el desgaste mecánico, generando mayores costos por tonelada movida.

1.6.2. Método de explotación en canteras

Bancos descendentes: La explotación se debe realizar en forma descendente, conformando bancos de acuerdo con las dimensiones establecidas según el diseño. El ancho debe ser suficiente para que el equipo de carga y el de transporte, puedan laborar libremente.

No se trabaja un banco único, por cuestiones de estabilidad, ya que los bancos múltiples garantizan una mayor seguridad en la labor de explotación, tanto para los equipos como para los empleados. En la parte más baja de la mina se construye un sumidero, cuya función principal es recoger todas las aguas provenientes de los bancos de explotación, con el fin de evacuarlas, por medio de bombas, a un sitio fuera del área de explotación (Morales, 2014)

1.6.3. Clasificación de materiales que produce La Virginia

Los áridos son materiales granulares producto de la desintegración natural o trituración mecánica de rocas. Los materiales pétreos provienen de un peñasco, de una roca o de una piedra, que se localiza en forma de unidades, losetas o cascajos de diversos cuerpos que con el paso del tiempo pudieron haberse desgastado por efectos naturales en su mismo ambiente. Su importancia radica en su aplicación en subbases, bases viales, hormigones y mezclas asfálticas. Para su utilización, deben cumplir requisitos de calidad establecidos por las Normas Ecuatorianas Viales (NEVI-12) y las Especificaciones MOP-001-F-2002, que regulan parámetros como granulometría, desgaste, fricción interna, plasticidad y contenido de finos.

La calidad del árido influye directamente en la durabilidad y desempeño estructural de la infraestructura vial. Por ello, el proceso de trituración y clasificación es esencial para obtener producto homogéneo y dentro de estándares técnicos.

Tabla 1. Materiales explotados en La Virginia

Categorías	Elementos	Utilización principal
Materiales finos de mejoramiento	Mejoramiento triturado Tres cuartos	Su utilización se da para el mejoramiento de la capacidad portante del terreno natural. Son materiales granulares, su tamaño va de medio a fino (arenas y grabas trituradas). Y el material conocido como tres cuartos, (3/4) como su nombre lo dice es su tamaño, y su utilización en este caso sería para el relleno y bases del pavimento,
Bases y subbases	Base-subbase-lastre	Su utilización mayormente se da para la estabilización de vías no pavimentadas, la subbase es la primera capa para el terreno mejorado, la base va encima y debe de ser más resistente. El lastre es un material granular grueso y se usa comúnmente como la subbase o como un relleno estabilizador de vías.
Materiales gruesos/ de protección	Escollera – Pedraplén	Estas son rocas o piedras de gran tamaño, comúnmente se usa como protección contra erosiones de taludes. El pedraplén es casi lo mismo, son piedras grandes que sirven mayormente para la estabilidad en zonas blandas o con agua.

Fuente: (Prefectura del Azuay, 2026)

1.6.4. Importancia de los áridos y pétreos para la infraestructura vial

Los materiales áridos y pétreos se han convertido en una de las soluciones más prácticas para conservar y mejorar las carreteras, sobre todo en zonas con alto tránsito y condiciones climáticas exigentes. Su desempeño depende directamente de los materiales explotados por zonas de libre aprovechamiento, que son la base de su resistencia y durabilidad. Estos agregados permiten que la superficie mantenga una buena fricción, reduciendo accidentes y aumentando la seguridad de los usuarios.

La correcta selección y granulometría de los áridos ayuda a recuperar deformaciones en la vía y a resistir el desgaste producido por los neumáticos. Además, cuando existe compatibilidad entre los áridos y la emulsión asfáltica, se evita el desprendimiento de la capa de rodadura, lo que prolonga la vida útil del pavimento. (Prefectura del Azuay, 2022)

Otro aspecto clave es la disponibilidad local de los materiales, ya que contar con fuentes cercanas reduce costos de transporte y facilita la ejecución de proyectos. Esto es especialmente relevante en provincias como Azuay, donde gran parte de la red vial presenta condiciones regulares o deficientes. Allí, el uso de micro pavimentos con áridos locales representa una alternativa económica y eficiente para mejorar el servicio de las vías.

En conclusión, los materiales áridos y pétreos no son simples componentes, sino el elemento decisivo que asegura que las carreteras sean más seguras, resistentes y sostenibles. Su adecuada utilización permite que los gobiernos locales, aun con recursos limitados, puedan ofrecer vías de mejor calidad y con mayor tiempo de servicio.

1.6.5. Procesos de carguío y transporte en minería a cielo abierto

El carguío es la fase donde el material previamente fragmentado es recogido por maquinaria como excavadoras o cargadores frontales. Su eficiencia se mide en función del volumen por ciclo, tiempo de llenado del balde, capacidad del cucharón y sincronización con los equipos de transporte. El transporte corresponde al desplazamiento del material hacia puntos de acopio, trituración o construcción mientras que las volquetes y bañeras son los equipos más utilizados en La Virginia, debido a su versatilidad y acceso en terreno irregular. (Prefectura del Azuay, 2022)

Según Morales & Villavicencio (2020), las operaciones de carguío y acarreo pueden representar más del 60 % del costo total de producción en minería a cielo abierto, motivo por el cual el análisis detallado del ciclo es esencial para la optimización operativa.

Esta labor del transporte de material para infraestructura vial se realizará de forma mecánica por medio de volquetes de 8 y de 12 m³ de capacidad, las cuales se transportarán desde el frente de explotación hasta el patio de acopio, ubicado a 22.47 km de la vía, donde se almacenará el material para su posterior comercialización; o dependiendo de los requerimientos se transportará de forma directa hasta el lugar que lo demande.

1.6.6. Equipos de carga

Los equipos de carguío pueden separarse en unidades discretas de carguío, como es el caso de palas cargadoras. En el caso del transporte de los materiales extraídos de las canteras o graveras a la planta de tratamiento, se realiza mediante el empleo de grandes

camiones (*dumpers o volquetes*) o cintas transportadoras en ocasiones blindadas (León, 2008) y son operados por personal especializado en el manejo de este tipo de maquinaria.

1.6.7. Volquetes

Los volquetes, también llamados volquetes, son mucho más que simples vehículos de carga pesada, es la maquinaria indispensable en la obra y la minería. Es vehículo robusto, diseñado para cargar toneladas de material como tierra, arena, grava o escombros, de la misma manera que puede transitar por vías deterioradas y erosionadas, y también es bueno mencionar que gracias a un sistema hidráulico puede levantar su tolva y descargar todo el material cargado en su balde en cuestión de segundos, sin esfuerzo humano. Esa eficiencia los convierte en una maquinaria clave para mantener el ritmo de grandes obras y labores mineras, incluso por vías con pendientes pronunciadas.

Para el transporte de material destinado a la infraestructura vial en el área de libre aprovechamiento La Virginia, a cargo de la Prefectura del Azuay, se emplean volquetes de alquiler con capacidades de 8, 12 y 24 m³.

En la operación actual, se utilizan principalmente volquetes de 8 m³ y 12 m³, conformando una flota aproximada de 3 volquetes de 8 m³ y 5 volquetes de 12 m³. Estas unidades corresponden a diferentes marcas y años de fabricación, lo que no influye significativamente en su desempeño operativo.

La capacidad de transporte disponible resulta suficiente para movilizar el material desde la mina hasta el frente de trabajo, considerando que las rutas de circulación presentan tráfico vehicular variado, debido al transporte de material para base de asfalto (Prefectura del Azuay, 2022).

1.6.8. Cargadora frontal

El Cargador de Ruedas Cat 928Hz lidera la industria en cuanto a comodidad del operador y rendimiento. La potencia, el tamaño y el rendimiento hacen de esta máquina un modelo ideal para realizar una amplia gama de trabajos. Los tiempos de ciclo más cortos con que cuenta este modelo permiten mover más material. El diseño del cargador o cuchara frontal proporciona resistencia y durabilidad con un manejo eficiente, para poder mover grandes masas de material pétreo en muy poco tiempo. (Caterpillar, 2025)

Tabla 2. Características de Cargadora Frontal

Categoría	Dato principal	Valor / Observación
Motor	Modelo	Cat® C6.6
Motor	Potencia neta nominal	149 hp
Cucharón	Capacidad	2,0 – 2,3 m ³ (2,6 – 3,0 yd ³)
Neumáticos	Tamaño	20.5 R25 L3 XHA
Neumáticos	Ancho de banda	8.42 pies
Carga límite	(Dato faltante en fichas)	Necesitamos confirmar en la documentación del equipo

Fuente: (Caterpillar, 2025)

1.6.9. Excavadora de orugas

Una excavadora de orugas es una máquina de construcción versátil, diseñada para el movimiento de grandes volúmenes de material, especialmente en actividades relacionadas con la excavación y carga de materiales pétreos. Este equipo es autopropulsado y funciona mediante un motor diésel que suministra energía a un sistema hidráulico encargado de accionar el brazo, la pluma y el balde.

Además, cuenta con un tren de rodaje de orugas que le proporciona estabilidad y capacidad de desplazamiento en terrenos irregulares o de baja capacidad portante. La estructura superior, compuesta por la cabina, el brazo y el balde, puede girar independientemente del tren de rodaje, lo que facilita su operación en espacios reducidos.

La excavadora de orugas está diseñada para trabajar en condiciones exigentes y en suelos no consolidados. En contraste, para trabajos sobre superficies pavimentadas o en carreteras, se emplean preferentemente excavadoras sobre neumáticos, debido a su mayor movilidad y menor impacto sobre la superficie (Caterpillar, 2020).

Tabla 3. Características de la Excavadora de Orugas

Característica	Especificación
Marca	Caterpillar
Modelo	320
Peso operativo	≈ 22 600 kg
Motor	Cat C4.4 ACERT
Potencia neta	≈ 172 HP (128 kW)
Profundidad máxima de excavación	≈ 6.7 m
Alcance máximo horizontal	≈ 9.8 m
Altura máxima de carga	≈ 6.5 m
Velocidad de giro	≈ 11 rpm
Fuerza de arranque del balde	≈ 150 kN
Capacidad del tanque de combustible	≈ 345 L
Presión hidráulica máxima	≈ 35 000 kPa

Fuente: (Caterpillar, 2025)

1.6.10. Productividad minera y tiempos de ciclo

La productividad en minería se relaciona con la cantidad de material movido en un periodo de tiempo. Depende del rendimiento de la cargadora frontal (m³/h), capacidad de

los volquetes, distancia de acarreo, congestión en frentes de carga y tiempos muertos. El ciclo de transporte incluye:

1. Carguío
2. Desplazamiento en vacío
3. Desplazamiento cargado
4. Descarga
5. Tiempos de espera

Como punto inicial para llevar a cabo la investigación de los problemas o factores que afectan el ciclo de cargue y transporte del material para la infraestructura vial que está a cargo de la Prefectura del Azuay, se lleva a cabo una descripción del trabajo realizado dentro del ciclo y se analiza el tiempo empleado en cada ciclo. A continuación, se describen los dos ciclos de transporte de materiales (ida y vuelta), principales que se llevan a cabo en la cantera.

Ciclo de transporte de mejoramiento triturado, 3/4: El ciclo de transporte de este material es el más importante dentro de las operaciones de la cantera, ya que este es el material principal para la realización de mejoramiento vial debido a su dureza y a su tamaño granular que sería el adecuado para poder soportar el paso de todo tipo de vehículos.

El ciclo de transporte del mejoramiento se lleva a cabo actualmente desde los stocks de la cantera La Virginia hacia el frente de trabajo, Para el análisis, se consideraron datos correspondientes al cantón Gualaceo, específicamente en el sector “El Estadio”,

donde se desarrollan diversas actividades de mejoramiento vial orientadas a la colocación de concreto.

En esta zona se evidencia un estado deficiente de la infraestructura vial, asociado principalmente a la falta de mantenimiento periódico, lo que justifica la ejecución de estas intervenciones (Prefectura del Azuay, 2022).

1.6.11. Costos operativos en minería de áridos

El costo por tonelada transportada se compone de factores como consumo de combustible, mano de obra, mantenimiento, depreciación, neumáticos y lubricantes. La selección adecuada de equipos según distancia, pendiente y tipo de material reduce significativamente el costo final. Una flota sobredimensionada genera ociosidad, mientras que una flota insuficiente produce congestión en carguío. Por ello, la optimización entre número de camiones y capacidad de la máquina de carga es esencial para una operación equilibrada. (Galaz, 2020)

1.6.12. Gestión ambiental y sostenibilidad

Las operaciones de áridos deben incorporar medidas de mitigación ambiental orientadas al control de emisiones de polvo, ruidos, vibraciones, manejo de taludes y estabilidad de accesos. El MAATE (2024) exige Planes de Manejo Ambiental que incluyan monitoreo y rehabilitación progresiva del área intervenida. La sostenibilidad se fortalece

mediante planificación responsable del recurso, reduciendo transporte innecesario y mejorando la eficiencia energética de la operación.

CAPÍTULO 2

PARAMETROS PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO

2.1. Evaluación del rendimiento de maquinaria

El rendimiento de maquinaria pesada es un factor esencial en la construcción de infraestructuras viales, ya que influye directamente en la eficiencia, costos y tiempos de ejecución del proyecto. La correcta evaluación y aplicación del rendimiento permite perfeccionar el uso de los equipos, lo cual es clave en la planificación de grandes proyectos viales. El rendimiento de la maquinaria se evalúa considerando medidas como el tiempo de carga así mismo su capacidad, el tiempo de ciclo (ida y vuelta hacia el frente de trabajo), los cuales varían dependiendo del tipo de terreno, las condiciones climáticas y las rutas utilizadas (Sánchez, 2016).

En proyectos viales, la maquinaria pesada se utiliza para tareas como la excavación, nivelación de suelos, transporte de materiales pétreos y la compactación de caminos. La correcta selección de la maquinaria y la optimización de su rendimiento contribuyen a reducir los costos operativos y a asegurar el cumplimiento de los plazos establecidos (Gómez, 2017).

Durante el levantamiento de información en campo se evaluó detalladamente el rendimiento de la excavadora hidráulica, la cargadora frontal y las volquetes empleadas en el proceso de carga y transporte del área de libre aprovechamiento La Virginia hacia el frente de trabajo, en nuestro caso fue el cantón Gualaceo. La información fue obtenida mediante cronometraje directo de ciclos completos, medición de la distancia de cada ciclo

dependiendo la ruta (km), observación técnica en sitio y análisis comparativo con parámetros teóricos de operación.

El rendimiento teórico de la excavadora de orugas se calculó mediante la expresión:

$$R = \frac{3600 * Q * F * E * K}{Cm}$$

Donde R es el rendimiento en m³/h.

3600: número de segundos de una hora.

Q: Es la capacidad del cucharón.

F: Factor de conversión de suelos sueltos.

E: Eficiencia de la pala.

K: Factor de eficiencia del cucharón.

Cm: Tiempo que dura el ciclo de cargado en segundos.

$$R = \frac{3600 * 2 * 1.25 * 0.8 * 1.8}{244} = 53.11 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Esta fórmula es un instrumento técnico desarrollado para facilitar términos en la ingeniería de maquinaria pesada. Su función y aplicación es estandarizar los cálculos del rendimiento de excavadoras de orugas y cargadoras frontales, y se encuentra en libros aplicados a la ingeniería civil y minera. (Caterpillar, 2020).

El rendimiento teórico de la cargadora frontal se calculó mediante la expresión:

$$CM = t_f + t_v$$

T_f: Tiempo fijo.

T_v: Tiempo variable.

Rendimiento

$$R = \frac{Q * F * E * 60}{C_m}$$

Q: Capacidad nominal del cucharón.

F: Factor de esponjamiento.

E: Eficiencia.

C_m: Tiempo de ciclo de trabajo.

$$R = \frac{2.3 * 1.5 * 1.2 * 60}{275} = 9.03 \text{ m}^3/\text{h}.$$

La cargadora frontal presentó una capacidad de balde de 2,3 m³, un factor de esponjamiento de 1,5; una eficiencia de 1,2 y un tiempo promedio de ciclo de 275 segundos, obteniéndose un rendimiento teórico aproximado de 9,03 m³/h. No obstante, su utilización fue menor debido a su función de apoyo en conformación y manejo auxiliar del material.

2.2. Cálculo de tiempos de ciclo y productividad

Para poder obtener estos resultados se realizó una exhaustiva recolección de datos, y se optó por medidas concretas las cuales fueron la obtención de tiempos de carga mediante cronómetros especiales que fueron los procesos en que la cargadora frontal cumple con el llenado de material “mejoramiento”, y de la misma manera con la recolección de datos de los ciclos de transporte de material pétreo hacia el frente de trabajo (Gualaceo). Aquí se logró recolectar un total de 50 ciclos, gracias a la ayuda de los operadores de los volquetes. La recolección de los ciclos de acarreo se obtuvieron mediante instrumentos de medición de tiempo y de distancia se logró la recolección de los mismos ya que han sido muy efectivos a la hora de la toma de decisiones, permitiéndonos actuar de manera segura y precisa de igual forma estar seguro con los datos que hemos tomado.

En el área de libre aprovechamiento La Virginia tiene ciertos ciclos de manejo de materia pétreo los cuales son:

2.2.1. Producción

Aquí es donde se logra la obtención de material suelto debido a:

1. **Perforación del talud:** Este paso es fundamental ya que aquí inicia el proceso de minado de un talud, perforando de manera estratégica en ciertos puntos de la peña en forma de una malla, con el objetivo de optimizar recursos como son los explosivos y nitratos.
2. **Carga de explosivos:** En este punto es muy importante que los huecos se encuentren de una forma adecuada (sin agua), para que el explosivo que se va a introducir no se deteriore y pueda cumplir su función de una manera correcta y se

logre una explosión adecuada sin ningún accidente y lograr una mayor proporción de material suelto para poder continuar con los siguientes ciclos.

Una vez que el material de la peña este suelto se procede con los siguientes ciclos.

2.2.2. Procesamiento interno

- 1. Acarreo interno:** En este ciclo es muy importante las excavadoras de orugas ya que son las encargadas de llenar a los volquetes con material de todo tipo de granulometría, para su posterior traslado hacia el siguiente ciclo.
- 2. Trituración:** Este sin duda es un ciclo fundamental ya que aquí los volquetes cargados por las excavadoras con el material pétreo llegan a la zona de trituración donde estas vacían el material hacia una trituradora primaria que es la encargada de moler y triturar el material que viene de la peña, dándole diferentes granulometrías de acorde a las que tenga la capacidad de producir, para su posterior almacenamiento en lugares específicos llamados “stocks”.

Una vez se triture el material y se le de diferentes granulometrías, este está listo para salir a los frentes de trabajo, y vienen los siguientes ciclos.

2.2.3. Acarreo hacia el frente de trabajo

- 1. Carga de material:** En este ciclo es donde empieza nuestro estudio ya que es sobre la carga y el transporte de material. Aquí la maquinaria encargada de cargar material a los volquetes es la cargadora frontal, esta cumple un papel importante ya que tiene que cargar de una manera correcta y rápida para que se puedan despachar más brevemente a los volquetes y así poder abastecer a los frentes de trabajo.

- 2. Transporte hacia el frente de trabajo:** Sin duda que en este ciclo de acareo de material el autor principal son los volquetes, ya que estos son los encargados de transportar el material pétreo hacia el frente de trabajo, de una forma segura cuidando su seguridad y así mismo a los demás vehículos que van cerca y de una manera breve para así poder abastecer a la zona donde estén haciendo labores de mantenimiento y mejoramiento de la vía.
- 3. Descarga:** En este ciclo que es la descarga el volquete ya ha llegado al frente de trabajo y procede a vaciar o levantar la tolva mediante un sistema hidráulico instalado en la misma. Aquí el material pétreo se almacena en un centro de acopio en la zona donde se están realizando las labores y se le llama stockpile, después de esto el material ya está listo para ser utilizado para las respectivas obras viales.
- 4. Retorno vacío:** Aquí el volquete tiene que regresar a la mina de una manera breve para así poder repetir el proceso, obviamente se debe tener cuidado ya que este es un vehículo pesado.

Una vez finalizado estos ciclos el volquete está listo para poder repetir el proceso a partir de la carga de material pétreo. El volquete tiene que actuar de una manera ágil debido a que el éxito del avance es que sea breve y de una manera correcta, con el fin de eliminar tiempos muertos y pérdidas de tiempo, satisfaciendo a la maquinaria que este realizando la construcción de las vías.

Figura 3. Ciclos de carga y transporte en La Virginia



(Prefectura del Azuay, 2022).

El ciclo completo de despacho de materia fue dividido en cinco etapas: carguío, transporte cargado, descarga, retorno en vacío y tiempo de espera.

2.2.4. Los tiempos promedio registrados fueron de dos tipos de volquetes
Volquetes de 8 metros cúbicos

Tabla 4. Datos recolectados (Volquetes 8 metros Cúbicos)

# Viajes	Tiempo de carga	Ciclo de viaje	Tiempo de descarga	Distancia en km	Duración del viaje	Metro cúbico
5	0:04:03	0:55:28	0:02:35	22.66	1:02:06	8
6	0:04:11	0:57:17	0:02:55	22.44	1:04:23	8
8	0:04:13	1:00:18	0:02:25	22.89	1:06:56	8
9	0:04:19	0:54:57	0:02:45	22.7	1:02:01	8
11	0:04:05	0:54:10	0:02:15	22.73	1:00:30	8
13	0:04:11	0:55:02	0:02:25	22.99	1:01:38	8
16	0:04:13	0:54:37	0:02:35	22.41	1:01:25	8
17	0:04:05	1:02:23	0:02:35	22.89	1:09:03	8
23	0:04:10	0:52:45	0:02:54	22.77	0:59:49	8
31	0:04:05	1:00:28	0:02:54	22.75	1:07:27	8
34	0:04:01	0:51:00	0:02:32	22.97	0:57:33	8
39	0:04:04	0:59:33	0:02:37	22.66	1:06:14	8
45	0:04:02	1:00:37	0:02:23	22.44	1:07:02	8
47	0:04:12	1:02:57	0:02:34	22.9	1:09:43	8
48	0:04:04	0:45:33	0:02:43	22.53	0:52:20	8

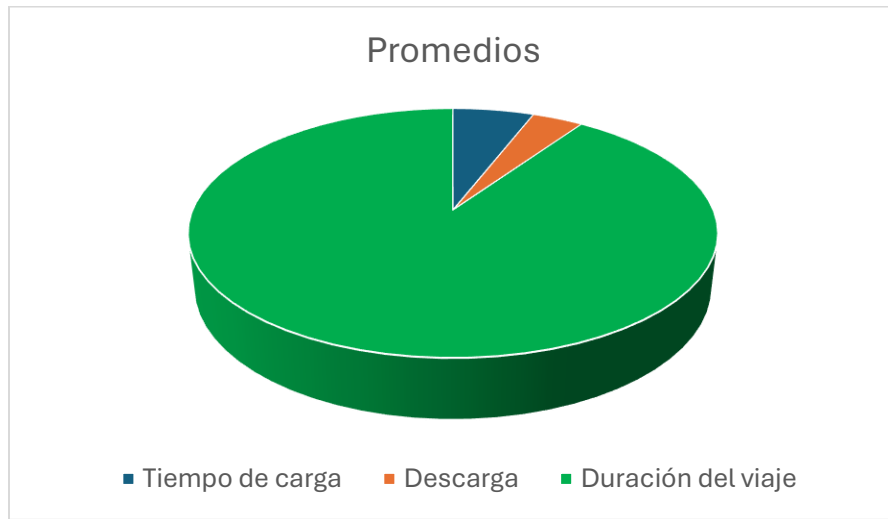
Fuente: Elaboración propia

Aquí se presentan los resultados:

Tabla 5. Resultados obtenidos

	Tiempo de carga	Descarga	Duración del viaje
Promedios	0:04:08	0:02:36	1:03:13

Figura 4. Promedios de los ciclos operativos



Fuente: Elaboración propia

Aquí observamos muy claramente que en el mayor tiempo en los ciclos de carga, descarga y transporte, el mayor tiempo tomado es el de la duración del viaje, dándonos a entender que aquí en este habría que hacerle más observaciones.

1. Convertir los tiempos a segundos

- **Tiempo de carga:** 0:04:08 → $4 * 60 + 8 = 248$ segundos

- **Descarga:** 0:02:36 $\rightarrow 2 * 60 + 36 = 156$ segundos
- **Duración del viaje:** 1:03:13 $\rightarrow 63 * 60 + 13 = 3793$ segundos

2. Calculo total

$248 + 156 + 3793 = 4197$ segundos

3. Porcentajes

Porcentaje = $(\text{Tiempo individual} / \text{Total}) * 100$

- **Carga:** $(248 / 4197) * 100 = 5.9 \%$
- **Descarga:** $(156 / 4197) * 100 = 3.7 \%$
- **Viaje:** $(3793 / 4197) * 100 = 90.4 \%$

Con esto ves claramente que el viaje domina el ciclo (más del 90%), mientras que carga y descarga son tiempos relativamente pequeños.

Tiempos en volquetes de 12 metros cúbicos

Tabla 6. Datos obtenidos volquetes de 12 metros cúbicos

# Viajes	Tiempo de carga	Ciclo de viaje	Tiempo de descarga	Distancia en km	Duración del viaje	Metro cúbico
1	0:04:24	0:56:57	0:02:35	22.94	1:03:56	12
2	0:04:34	0:52:08	0:02:45	22.79	0:59:27	12
3	0:04:20	0:54:20	0:02:55	22.82	1:01:35	12
4	0:04:24	1:00:06	0:02:15	22.64	1:06:45	12
7	0:04:28	0:51:48	0:02:15	22.52	0:58:31	12
10	0:04:22	0:45:43	0:02:15	22.77	0:52:20	12
12	0:04:35	0:50:51	0:02:25	22.73	0:57:51	12
14	0:04:43	1:01:46	0:02:35	22.51	1:09:04	12
15	0:04:22	0:53:38	0:02:35	22.56	1:00:35	12
18	0:04:46	0:59:18	0:02:35	22.82	1:06:39	12
19	0:04:30	0:51:12	0:02:15	22.48	0:57:57	12
20	0:04:45	0:55:40	0:02:15	22.69	1:02:40	12
21	0:04:26	0:57:42	0:02:13	22.72	1:04:21	12
22	0:04:23	0:46:23	0:02:24	22.71	0:53:10	12
24	0:04:39	0:59:14	0:02:12	22.85	1:06:05	12
25	0:04:16	0:55:41	0:02:00	22.71	1:01:57	12
26	0:04:53	0:57:07	0:02:12	22.95	1:04:12	12
27	0:04:24	0:57:24	0:02:23	22.75	1:04:11	12
28	0:04:29	0:58:50	0:02:43	22.41	1:06:02	12

29	0:04:59	0:49:12	0:02:31	22.57	0:56:42	12
30	0:04:52	0:54:23	0:02:12	22.47	1:01:27	12
32	0:04:35	0:50:26	0:02:43	22.52	0:57:44	12
33	0:04:14	0:58:26	0:02:22	22.66	1:05:02	12
35	0:04:46	0:49:49	0:02:12	22.44	0:56:47	12
36	0:04:35	0:55:33	0:02:23	22.85	1:02:31	12
37	0:04:48	1:00:11	0:02:12	22.77	1:07:11	12
38	0:04:58	1:01:04	0:02:32	22.58	1:08:34	12
40	0:04:56	0:47:22	0:02:38	22.96	0:54:56	12
41	0:04:44	0:55:45	0:02:14	22.56	1:02:43	12
42	0:04:29	0:56:41	0:02:12	22.75	1:03:22	12
43	0:04:44	0:58:06	0:02:43	23	1:05:33	12
44	0:04:48	1:02:54	0:02:54	22.57	1:10:36	12
46	0:04:28	0:57:22	0:02:32	22.85	1:04:22	12
49	0:04:18	1:02:19	0:02:50	22.42	1:09:27	12
50	0:04:14	0:49:58	0:02:58	22.7	0:57:10	12

Fuente: Elaboración propia

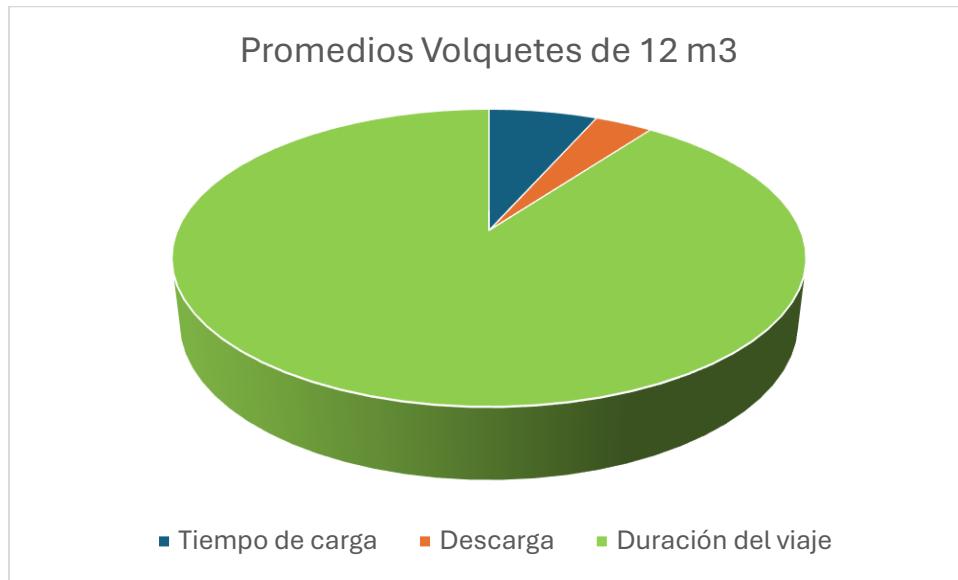
Aquí se presentan los resultados:

Tabla 7. Resultados obtenidos (Volquete de 12 metros cúbicos)

	Tiempo de carga	Descarga	Duración del viaje
Promedios	0:04:35	0:02:27	1:02:20

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Promedios de los ciclos operativos



Fuente: Elaboración propia

Aquí observamos muy claramente que el mayor tiempo en el ciclo de carga, descarga y transporte, el mayor tiempo es la duración del viaje, dándonos a entender que aquí en este habría que hacerle más observaciones.

1. Tiempos a segundos

- **Tiempo de carga:** 0:04:35 → $4 * 60 + 35 = 275$ segundos
- **Descarga:** 0:02:27 → $2 * 60 + 27 = 147$ segundos
- **Duración del viaje:** 1:02:20 → $62 * 60 + 20 = 3740$ segundos

2. Calculo total

$$275+147+3740=4162 = \text{segundos}$$

3. Porcentajes

- $\text{Porcentaje} = (\text{Tiempo individual} / \text{Total}) * 100$
- **Carga:** $(275 / 4162) * 100 = 6.6\%$
- **Descarga:** $(147 / 4162) * 100 = 3.5\%$
- **Viaje:** $(3740 / 4162) * 100 = 89.9\%$

Al igual que en el caso de los volquetes de 8 m³, el viaje sigue siendo el factor dominante (casi 90%), mientras que carga y descarga ocupan menos del 10% en conjunto.

2.2.5. Síntesis de los ciclos operativos:

En ambos casos, el ciclo de carga, descarga y transporte muestra un patrón muy claro: La duración del viaje es, con diferencia, el factor que más consume tiempo, representando alrededor del 90% del total. Tanto en los volquetes de 8 m³ como en los de 12 m³, las operaciones de carga y descarga apenas ocupan entre un 9% y 10% del ciclo, lo que significa que su impacto en la eficiencia global es mínimo frente al tiempo de traslado.

La diferencia entre ambos tamaños de volquete es marginal: el de 12 m³ dedica un poco más de tiempo a la carga (6.6% frente a 5.9%) y menos a la descarga (3.5% frente a 3.7%), pero en esencia el comportamiento es el mismo. Esto nos lleva a una conclusión práctica: si se busca optimizar el rendimiento de la operación, las observaciones y mejoras deben concentrarse en la etapa de transporte, ya que allí se encuentra la verdadera oportunidad de reducir tiempos y aumentar la productividad.

En los ciclos evaluados, las fases de carga y descarga apenas ocupan una fracción del tiempo total: la carga se mueve entre 5.9% y 6.6%, mientras que la descarga se mantiene entre 3.5% y 3.7%. En conjunto, estas operaciones representan solo alrededor de

9% a 10% del ciclo, lo que refleja que son procesos ágiles y bien controlados. La diferencia entre volquetes de 8 m³ y 12 m³ es mínima, con una ligera variación en la proporción de cada etapa. En términos prácticos, esto significa que su impacto en la productividad global es reducido. Por lo tanto, la atención para mejorar la eficiencia debe dirigirse principalmente al transporte, que concentra casi el 90% del tiempo.

2.3. Determinación de costos operativos y análisis económico

El análisis económico incluyó combustible, operador, mantenimiento, lubricantes, neumáticos y depreciación. Esta información se nos fue brindada por parte de la Prefectura del Azuay.

Costo horario cargadora frontal:

Tabla 8. Costos de la cargadora frontal

Cargadora frontal	
Concepto	Costo (USD/h)
Equipo	51.75
Operador	4.87
Total	56.62

(Prefectura del Azuay, 2022)

Costo horario por volquete (8 m³):

Tabla 9. Costos horarios de volquetes (8 m³)

Volquete 8 m ³		
Concepto	Costo (USD/h)	
Equipo	30	
Operador	6.38	
Total	36.38	
3 volquetes 8 m ³	Costo total	109.14

(Prefectura del Azuay, 2022).

Costo horario por volquete (12 m³):

Tabla 10. Costos horario por volquete (12 m³)

Volquete 12 m ³		
Concepto	Costo (USD/h)	
Equipo	39	
Operador	6.38	
Total	45.38	
5 volquetes 12 m ³	Costo total	226.9

(Prefectura del Azuay, 2022).

Se realizó un análisis de sensibilidad considerando un incremento del 10 % en combustible, obteniéndose un aumento estimado de 0,11 USD/m³, lo que demuestra la alta influencia del precio del diésel en el costo final.

2.4. Identificación de limitantes técnicos y logísticos

Se identificaron como principales limitantes técnicas: pendientes superiores al 10 %, terreno húmedo en época invernal, desgaste acelerado de neumáticos, fragmentación irregular del material y ausencia de monitoreo digital de flota.

Entre las limitantes logísticas se detectó falta de planificación dinámica de flota, congestión temporal en el frente de carga, variabilidad en distancias según banco activo y comunicación manual entre operadores.

Estas condiciones generan tiempos improductivos entre 15 % y 25 %, reducción de producción estimada de 15 a 20 m³/h e incremento del costo unitario entre 0,10 y 0,18 USD/m³.

El análisis integral confirma que el sistema presenta un desempeño adecuado para su escala de operación, pero con un potencial de optimización entre 10 % y 20 %, lo cual justifica el desarrollo de una propuesta técnica de mejora en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

3.1. Estrategias de mejora operativa

A partir del análisis desarrollado en el Capítulo 2, se determinó que el principal factor que limita la eficiencia del sistema de carga y transporte en el área de libre aprovechamiento La Virginia es el tiempo de desplazamiento de los volquetes, el cual representa aproximadamente el 90 % del ciclo total. Este comportamiento evidencia que la productividad del sistema depende principalmente de las condiciones de transporte más que del proceso de carguío o descarga. En función de este resultado, se plantean las siguientes estrategias de mejora operativa:

3.1.1. Optimización de rutas de transporte

Se propone realizar una evaluación técnica detallada de las rutas utilizadas, considerando variables como pendiente longitudinal, radio de curvatura, estado superficial de la vía, drenaje y distancia efectiva de acarreo. La presencia de pendientes elevadas y tramos en mal estado incrementa el tiempo de viaje, el consumo de combustible y el desgaste de neumáticos.

Como medida de mejora, se recomienda:

- Rehabilitación periódica de la vía mediante nivelación y compactación.
- Implementación de sistemas de drenaje para evitar deterioro en época invernal.
- Identificación de rutas alternativas que reduzcan la distancia o mejoren las condiciones de tránsito.

- Control de tráfico interno para evitar congestión en puntos críticos.

Estas acciones permitirían reducir tiempos de desplazamiento, mejorar la seguridad operativa y aumentar la vida útil de los equipos.

3.1.2. Planificación eficiente de la flota

La correcta relación entre equipos de carguío y transporte es fundamental para garantizar la continuidad del proceso productivo. Se identificó que una inadecuada planificación de la flota genera tiempos de espera en el frente de carga o subutilización de la maquinaria.

Se propone:

- Determinar el número óptimo de volquetes en función del tiempo de ciclo y la capacidad de la cargadora frontal.
- Aplicar un sistema de despacho controlado que evite la acumulación de volquetes en el frente de carga.
- Establecer horarios de operación coordinados entre equipos.
- Analizar la posibilidad de estandarizar la flota (mismo tipo de volquetes) para facilitar la gestión operativa.

Una adecuada planificación permite equilibrar el sistema, reducir tiempos muertos y maximizar la productividad.

3.1.3. Control y reducción de tiempos muertos

Durante el análisis se identificaron tiempos improductivos asociados a esperas, retrasos en descarga, maniobras innecesarias y falta de coordinación operativa. Estos tiempos afectan directamente la eficiencia global del sistema.

Se recomienda:

- Implementar registros diarios de operación (bitácoras de tiempos de ciclo).
- Clasificar los tiempos en productivos e improductivos para su análisis.
- Aplicar indicadores de gestión como:
 - Factor de utilización
 - Disponibilidad mecánica
 - Eficiencia operativa
- Establecer supervisión en campo para detectar desviaciones en tiempo real.

El control de estos tiempos permite tomar decisiones correctivas inmediatas y mejorar el desempeño del sistema.

3.1.4. Capacitación de operadores

El factor humano es determinante en la eficiencia del proceso. Un operador con experiencia y capacitación adecuada puede reducir tiempos de ciclo, optimizar el consumo de combustible y mejorar la seguridad.

Se propone implementar programas de capacitación enfocados en:

- Técnicas de conducción eficiente en terrenos variables.

- Optimización de ciclos de carga y descarga.
- Manejo adecuado de maquinaria pesada.
- Seguridad industrial y prevención de riesgos.

Además, se recomienda evaluar periódicamente el desempeño de los operadores mediante indicadores de productividad.

3.1.5. Mantenimiento preventivo y predictivo de equipos

El mantenimiento de la maquinaria influye directamente en la continuidad operativa. Fallas mecánicas no planificadas generan tiempos de parada que afectan la producción y aumentan los costos.

Se recomienda:

- Establecer un plan de mantenimiento preventivo basado en horas de operación.
- Realizar inspecciones periódicas de componentes críticos (motor, sistema hidráulico, neumáticos).
- Implementar mantenimiento predictivo mediante control de parámetros operativos.
- Llevar registros históricos de fallas para anticipar problemas recurrentes.

Un mantenimiento adecuado reduce tiempos de inactividad, prolonga la vida útil de los equipos y mejora la confiabilidad del sistema.

3.1.6. Incorporación de herramientas tecnológicas

Como estrategia complementaria, se propone la implementación de tecnologías de control y monitoreo, tales como:

- Sistemas GPS para seguimiento de rutas y tiempos de ciclo.

- Software de gestión de flotas.
- Sensores para control de consumo de combustible.

Estas herramientas permiten mejorar la toma de decisiones, optimizar recursos y tener un control más preciso de la operación.

3.1.7. Mejora en la gestión operativa integral

Finalmente, se recomienda fortalecer la planificación general del proceso mediante:

- Programación diaria de actividades.
- Coordinación entre áreas (operación, mantenimiento y logística).
- Evaluación continua de indicadores de desempeño.

La integración de estas estrategias permitirá mejorar la eficiencia del sistema de carga y transporte, reducir costos operativos y garantizar una operación más sostenible en el área de libre aprovechamiento La Virginia.

3.2. Modelamiento de escenarios de optimización

Con el objetivo de cuantificar el impacto de las estrategias planteadas en el apartado anterior, se desarrolló un modelamiento de escenarios basado en la variación del tiempo de transporte, identificado como el componente dominante dentro del ciclo operativo. Este análisis permitió simular diferentes condiciones de operación y evaluar su efecto en la productividad, los costos y la eficiencia global del sistema.

Para el modelamiento se tomó como referencia el tiempo de ciclo promedio obtenido en campo, el cual fue aproximadamente de 4200 segundos por viaje, considerando todas las etapas del proceso (carguío, transporte cargado, descarga, retorno en vacío y

tiempos de espera). A partir de este valor base, se generaron escenarios de mejora progresiva mediante la reducción del tiempo de transporte.

3.2.1. Escenario actual (condición base)

Este escenario representa las condiciones reales observadas durante el levantamiento de información.

- Tiempo de ciclo promedio: 4200 s
- Participación del transporte: 90 % del ciclo total
- Tiempo de carga y descarga: 10 % del ciclo
- Producción condicionada por la duración del viaje

En este contexto, el sistema presenta una dependencia directa del tiempo de desplazamiento, lo que significa que cualquier mejora en esta fase tendrá un impacto significativo en la productividad. Además, se evidenció que los equipos de carga operan de manera eficiente, pero permanecen limitados por la disponibilidad de volquetes debido a los largos tiempos de retorno.

3.2.2. Escenario optimizado 1 (reducción del 10 % en tiempo de transporte)

En este escenario se consideró una mejora moderada en las condiciones de operación, lograda mediante acciones como mantenimiento de vías, optimización de rutas y mejor coordinación operativa.

Supuestos aplicados:

- Reducción del 10 % en el tiempo de transporte
- Mantenimiento constante de los tiempos de carga y descarga

Resultados estimados

- Disminución del tiempo total de ciclo a aproximadamente 3800 – 3900 segundos
- Incremento de la frecuencia de viajes por unidad de tiempo
- Aumento de la productividad entre un 8 % y 12 %
- Reducción del consumo de combustible por ciclo, debido a menor tiempo de operación

Este escenario demuestra que incluso mejoras operativas relativamente simples pueden generar beneficios importantes sin necesidad de inversión en nueva maquinaria.

3.2.3. Escenario optimizado 2 (reducción del 20 % en tiempo de transporte)

Este escenario representa una condición más eficiente del sistema, alcanzable mediante una combinación de mejoras estructurales y operativas.

Supuestos aplicados:

- Reducción del 20 % en el tiempo de transporte
- Implementación de rutas optimizadas y control de tráfico interno
- Mejora en la planificación de flota

Resultados estimados

- Reducción del tiempo total de ciclo a aproximadamente 3400 – 3500 segundos
- Incremento significativo en el número de viajes por jornada
- Mejora notable en la rotación de volquetes

- Disminución del costo unitario por metro cúbico transportado
- Mayor aprovechamiento de la maquinaria disponible

En este escenario, el sistema alcanza un nivel de eficiencia considerablemente superior, permitiendo incrementar la producción sin aumentar el número de equipos.

3.2.4. Análisis comparativo de escenarios

El análisis de los escenarios evidencia una relación directa entre el tiempo de transporte y la productividad del sistema. A medida que se reduce el tiempo de desplazamiento, se incrementa la cantidad de ciclos completados por unidad de tiempo, lo que se traduce en mayor volumen de material transportado.

Además, se identificó que:

- La reducción del tiempo de transporte impacta directamente en los costos operativos, especialmente en el consumo de combustible.
- La mejora en la rotación de volquetes disminuye los tiempos de espera en el frente de carga.
- El sistema se vuelve más equilibrado, evitando cuellos de botella operativos.

3.2.5. Interpretación técnica del modelamiento

Los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema de carga y transporte presenta un alto potencial de optimización, principalmente porque su desempeño está condicionado por una única variable dominante: el tiempo de viaje.

Esto implica que:

- No es necesario modificar el sistema de carguío para mejorar la productividad.

- Las acciones deben enfocarse en la fase de transporte.
- Las mejoras operativas tienen un impacto proporcionalmente mayor que en otros procesos.

En términos prácticos, el modelamiento demuestra que pequeñas reducciones en el tiempo de transporte pueden generar incrementos significativos en la eficiencia global del sistema, lo cual valida la viabilidad de las estrategias propuestas.

3.3. Evaluación económica de la propuesta

La evaluación económica de la propuesta de optimización se fundamentó en los costos operativos determinados en el Capítulo 2, los cuales incluyen consumo de combustible, costos de operación de maquinaria, mantenimiento, lubricantes, neumáticos y mano de obra. A partir de estos parámetros, se realizó un análisis comparativo entre la condición actual del sistema y los escenarios optimizados planteados en el modelamiento.

El análisis evidenció que el principal factor que incide en el costo unitario del material transportado es el tiempo de ciclo, particularmente el tiempo de transporte, el cual representa aproximadamente el 90 % del ciclo total. En este sentido, la reducción de los tiempos de desplazamiento genera un impacto directo en la disminución de costos operativos.

En términos cuantitativos, los resultados esperados de la implementación de la propuesta son los siguientes:

- **Reducción del costo unitario** estimada entre **0,10 y 0,20 USD/m³**, producto de una mayor eficiencia en los ciclos de transporte.

- **Disminución del consumo de combustible**, debido a la reducción del tiempo de operación por ciclo y a la mejora en las condiciones de las vías de acarreo.
- **Optimización del uso de la maquinaria existente**, evitando la necesidad de inversión en nuevos equipos, lo cual representa un beneficio económico significativo en términos de CAPEX. (Capital Expenditures, es decir, gastos de inversión en activos fijos como maquinaria o infraestructura).

Adicionalmente, desde una perspectiva de productividad y eficiencia económica, la optimización del sistema permite:

- **Incrementar la producción diaria**, al aumentar el número de ciclos completados por jornada laboral.
- **Mejorar la rentabilidad del proyecto**, mediante la reducción del costo por unidad de material transportado y el incremento del volumen producido.
- **Reducir el desgaste de neumáticos y componentes mecánicos**, lo que disminuye los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil de los equipos.

Desde el punto de vista del análisis de sensibilidad, se determinó que el costo operativo es altamente dependiente del consumo de combustible, por lo que cualquier mejora en la eficiencia del transporte contribuye a mitigar el impacto de posibles variaciones en el precio del diésel. Asimismo, la reducción de tiempos improductivos permite mejorar indicadores clave como la eficiencia operativa, la disponibilidad mecánica y el factor de utilización de los equipos.

Así la propuesta de optimización no solo resulta viable desde el punto de vista técnico, sino también económicamente conveniente, ya que permite obtener beneficios

significativos sin requerir inversiones adicionales. Esto la convierte en una alternativa sostenible para mejorar la gestión del sistema de carga y transporte en el área de libre aprovechamiento La Virginia, fortaleciendo su competitividad y garantizando un uso más eficiente de los recursos disponibles.

3.4. Beneficios técnicos, ambientales y sociales

La implementación de la propuesta de optimización del sistema de carga y transporte en el área de libre aprovechamiento La Virginia genera una serie de beneficios integrales que abarcan los ámbitos técnico, ambiental y social. Estos beneficios se derivan principalmente de la mejora en la eficiencia operativa, la reducción de tiempos improductivos y el uso más racional de los recursos disponibles.

3.4.1. Beneficios técnicos

Desde el punto de vista técnico, la optimización del sistema permite mejorar significativamente el desempeño operativo de la cantera. Al reducir el tiempo de transporte identificado como el componente dominante del ciclo operativo se logra un incremento en la eficiencia global del sistema.

Entre los principales beneficios técnicos se destacan:

- **Incremento de la productividad del sistema**, debido al aumento en la cantidad de ciclos completados por unidad de tiempo, lo que se traduce en un mayor volumen de material transportado diariamente.
- **Reducción de tiempos improductivos**, especialmente aquellos asociados a esperas, descoordinación de flota y condiciones deficientes de las vías de acarreo.

- **Mejor coordinación entre equipos de carga y transporte**, logrando un balance adecuado entre la capacidad de la maquinaria y la cantidad de volquetes disponibles.
- **Optimización del rendimiento de la maquinaria**, mediante una utilización más eficiente de los equipos existentes, evitando periodos de inactividad o sobrecarga operativa.
- **Mayor control operativo**, gracias a la implementación de indicadores de gestión que permiten monitorear y evaluar continuamente el desempeño del sistema.

En conjunto, estos beneficios contribuyen a consolidar una operación más eficiente, estable y técnicamente sostenible.

3.4.2. Beneficios ambientales

En el ámbito ambiental, la optimización del sistema de transporte tiene un impacto positivo directo, principalmente relacionado con la reducción del consumo energético y la disminución de emisiones contaminantes.

Los beneficios ambientales más relevantes son:

- **Reducción del consumo de combustible**, como consecuencia de la disminución del tiempo de operación de los equipos, lo que implica una menor emisión de gases contaminantes como CO₂ y material particulado.
- **Disminución de la generación de polvo**, debido a la reducción de recorridos innecesarios y a la mejora en las condiciones de las vías de transporte, lo que contribuye a minimizar la afectación al entorno y a las comunidades cercanas.

- **Uso más eficiente del recurso natural**, al optimizar los procesos de extracción y transporte, evitando pérdidas innecesarias de material y promoviendo una explotación más racional.
- **Menor impacto sobre el suelo y la infraestructura vial**, al reducir la frecuencia de tránsito innecesario y mejorar la planificación de rutas de acarreo.

Estos aspectos permiten al proyecto alinearse con los principios de sostenibilidad establecidos en la normativa ambiental vigente, fortaleciendo la gestión responsable del recurso.

3.4.3. Beneficios sociales

Desde la perspectiva social, la optimización del sistema contribuye al desarrollo local y al mejoramiento de la calidad de vida de la población en la zona de influencia del proyecto.

Entre los principales beneficios sociales se encuentran:

- **Mayor disponibilidad de material pétreo para obras viales**, lo que garantiza la continuidad de proyectos de mantenimiento y construcción de infraestructura en los cantones Gualaceo y Paute.
- **Generación de empleo directo e indirecto**, asociado a la operación, mantenimiento y gestión del proyecto, promoviendo estabilidad económica en la zona.
- **Mejora en la infraestructura vial**, lo que facilita la conectividad, reduce tiempos de desplazamiento y fortalece el desarrollo económico regional.

- **Reducción de impactos negativos hacia la comunidad**, como polvo, ruido y congestión, debido a una operación más organizada y eficiente.
- **Fortalecimiento de la relación con la comunidad**, al evidenciar una gestión técnica responsable y orientada al desarrollo sostenible.

Esta propuesta de optimización no solo mejora el desempeño técnico y económico del sistema, sino que también contribuye de manera significativa al desarrollo ambientalmente responsable y socialmente sostenible del área de libre aprovechamiento La Virginia.

CONCLUSIONES

- El análisis del sistema de carga y transporte permitió determinar que el proceso presenta un desempeño operativo aceptable para la escala de explotación evaluada; sin embargo, se identificaron importantes oportunidades de mejora, especialmente en la etapa de transporte, la cual condiciona el rendimiento global del sistema.
- Se evidenció que el tiempo de desplazamiento de los volquetes constituye el principal factor limitante, representando aproximadamente el 90 % del ciclo total. Esta condición genera una dependencia directa entre el tiempo de transporte y la productividad, afectando tanto la cantidad de material movilizado como los costos operativos asociados.
- La evaluación de la maquinaria determinó que los equipos utilizados (excavadora, cargadora frontal y volquetes) son técnicamente adecuados para las condiciones del proyecto; no obstante, su eficiencia se ve reducida por factores externos como el estado de las vías, pendientes elevadas, condiciones climáticas adversas y variabilidad en las rutas de acarreo.
- El análisis económico confirmó que los costos operativos están altamente influenciados por el consumo de combustible y la duración de los ciclos de transporte, lo que evidencia que cualquier mejora en la eficiencia del acarreo tiene un impacto directo en la reducción del costo unitario por metro cúbico.
- Las limitantes técnicas y logísticas identificadas, tales como la falta de planificación dinámica de flota, ausencia de sistemas de monitoreo en tiempo real y deficiencias

en la coordinación operativa, generan pérdidas de eficiencia que pueden alcanzar valores cercanos al 20 %, afectando la rentabilidad del sistema.

- El modelamiento de escenarios permitió demostrar que la reducción del tiempo de transporte entre un 10 % y 20 % genera incrementos significativos en la productividad y mejoras en la rotación de equipos, lo que valida la importancia de enfocar las estrategias de optimización en esta etapa del proceso.
- La propuesta de optimización planteada demuestra que es posible mejorar el rendimiento del sistema sin necesidad de realizar inversiones significativas en maquinaria, mediante la implementación de estrategias operativas, mejoras en la planificación y fortalecimiento de la gestión técnica.
- Finalmente, se concluye que la optimización del sistema de carga y transporte no solo mejora los indicadores técnicos y económicos del proyecto, sino que también contribuye a una explotación más eficiente, sostenible y alineada con las necesidades de abastecimiento de material para la infraestructura vial de la región.

RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema de monitoreo continuo de tiempos de ciclo, mediante registros operativos diarios, que permita identificar desviaciones, evaluar el desempeño de los equipos y tomar decisiones correctivas oportunas.
- Realizar un mantenimiento periódico y mejoramiento de las vías de acarreo, incluyendo nivelación, compactación y sistemas de drenaje, con el fin de reducir los tiempos de transporte y así mismo minimizar el consumo de combustible y mejorar la seguridad operativa.
- Ajustar la cantidad de volquetes en función de la capacidad real de carguío, aplicando criterios técnicos de balance de flota, para evitar tanto la congestión en el frente de carga como los tiempos muertos por falta de equipos.
- Fortalecer la capacitación del personal operativo, enfocándose en técnicas de conducción eficiente, optimización de ciclos de trabajo, manejo adecuado de maquinaria pesada y cumplimiento de normas de seguridad.
- Evaluar la implementación de herramientas tecnológicas, como sistemas GPS, software de gestión de flotas y sensores de control de consumo, que permitan mejorar la planificación, el seguimiento y la toma de decisiones en tiempo real.
- Establecer indicadores de gestión operativa, tales como eficiencia, disponibilidad mecánica y factor de utilización, que permitan medir el desempeño del sistema y promover la mejora continua.

- Considerar la integración de criterios ambientales y sociales en la planificación operativa, con el fin de garantizar una explotación sostenible, minimizar impactos negativos y fortalecer la aceptación del proyecto en la comunidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberto, C. o. C. (2024, 1 octubre). *Evaluación del rendimiento de maquinaria pesada en movimiento de tierras para infraestructura vial del Distrito de San Miguel en el año 2024.*

<https://repositorio.uanev.edu.pe/items/a11710c8-333d-4b95-b1ec-c62e6bff1eb0>

Andrés Soto, M., Galaz. (2019). *EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ALTERNATIVOS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO* (1.ª ed., Vol. 1). Santiago de

chile. *Carga y transporte | Komatsu.* (s. f.). <https://www.komatsu.com/es-mx/tecnolog%C3%ADa/miner%C3%ADa-inteligente/carga-y-transporte>

Caterpillar Inc. (2001). *Manual de rendimiento Caterpillar* (31.ª ed.). Caterpillar Inc.

CODIGO ORGANICO DE ORGANIZACION TERRITORIAL, COOTAD (Registro Oficial Suplemento 303 de 19-oct.2010). (2015). PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR.

Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001-F-2002).

(2001). Gobierno del Ecuador (Ministerio de Obras Públicas).

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ALTERNATIVOS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO. (2018). Santiago de Chile.

Janet, H. V., & Coyani, Q. S. C. B. (2019). *Método de extracción por bancos descendentes para optimizar la producción de agregados en la Cantera La Tuna Blanca, Santa Cruz - Cajamarca.*

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_ee77e3d5a1d4f417658d3d9a2fcb16b3

Ley de Minería. (2009). *Suplemento del Registro Oficial No. 517, 29 de enero 2009, 35.*

López, D. (2010). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical And Subtropical Agroecosystems, 14.*

Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (ACUERDO Nro. MAATE-MAATE-2025-0036-A). (2025).

Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12. (2013). En *Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE).

Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Universidad Politécnica de Madrid.

Plan de desarrollo y ordenamiento territorial. (2024). Prefectura del Azuay.

Salazar Sigüenza, M. L. (2020). *Análisis de costos y gastos en la minería de áridos primaria y secundaria en el sector privado en la provincia del Azuay*. Universidad del Azuay.

Alberto, C. o. C. (2024, 1 octubre). Evaluación del rendimiento de maquinaria pesada en movimiento de tierras para infraestructura vial del Distrito de San Miguel en el año 2024. <https://repositorio.uancv.edu.pe/items/a11710c8-333d-4b95-b1ec-c62e6bff1eb0>

Andrés Soto, M., Galaz. (2019). EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ALTERNATIVOS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO (1.a ed., Vol. 1). Santiago de Chile.

Carga y transporte | Komatsu. (s. f.). <https://www.komatsu.com/es-mx/tecnolog%C3%ADa/miner%C3%ADa-inteligente/carga-y-transporte>

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE ALTERNATIVOS PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO. (2018). Santiago de Chile.

Janet, H. V., & Coyani, Q. S. C. B. (2019). Método de extracción por bancos descendentes para optimizar la producción de agregados en la Cantera La Tuna Blanca, Santa Cruz - Cajamarca.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_ee77e3d5a1d4f417658d3d9a2fcb16b3

López, D. (2010). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical And Subtropical Agroecosystems, 14.

Plan de desarrollo y ordenamiento territorial. (2024). Prefectura del Azuay.

Salazar Sigüenza, M. L. (2020). Análisis de costos y gastos en la minería de áridos primaria y secundaria en el sector privado en la provincia del Azuay. Universidad del Azuay.

ANEXOS

ANEXO 1



Figura A1.

Condiciones del frente de trabajo.

Nota. Fotografía tomada durante la inspección del área de libre aprovechamiento La Virginia.

Elaboración propia, 2026.



Figura A2.

Vía de acceso en mantenimiento.

Nota. Fotografía del tramo vial intervenido para el transporte de material pétreo.

Elaboración propia, 2026.

ANEXO 2



Figura A3.

Vista general de la mina desde la parte superior.

Nota. Fotografía panorámica del área de explotación La Virginia. **Elaboración propia, 2026.**



Figura A4.

Cargadora frontal utilizada en las operaciones de carguío.

Nota. Equipo empleado para la carga de material pétreo en la cantera. **Elaboración propia, 2026.**

ANEXO 3



Figura A5.

Ciclo de carga de volquete.

Nota. Registro fotográfico del proceso de carguío de material triturado. **Elaboración propia, 2026.**



Figura A6.

Maquinaria empleada en el frente de explotación.

Nota. Excavadora hidráulica utilizada para la extracción y manejo del material. **Elaboración propia, 2026.**

ANEXO 4



Figura A7.

Zona de descarga del material pétreo.

Nota. Frente de trabajo donde se deposita el material para mejoramiento vial. **Elaboración propia, 2026.**

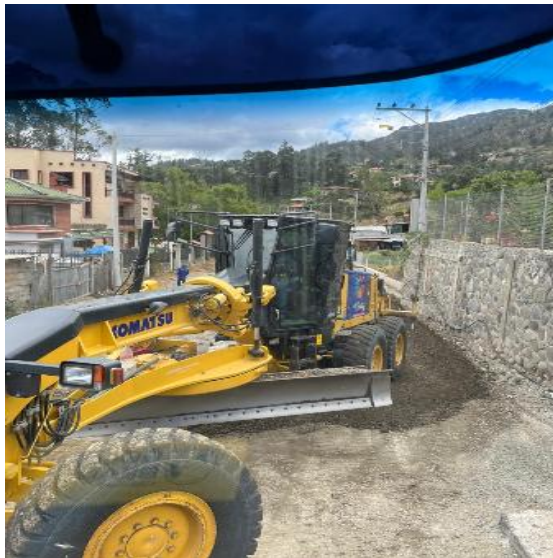


Figura A8.

Mantenimiento vial en el cantón Gualaceo.

Nota. Distribución y conformación del material transportado desde La Virginia. **Elaboración propia, 2026.**