

Evaluación a nivel de prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali (tramo Yumbo–Palmira) mediante la integración de información en un entorno BIM



**WILMER ALBERTO ALAPE PEÑUELA - 1103628
JOHAN CAMILO MERCHAN ROMERO - 1103658**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR

Ing. Luz Piedad Gallego Osorio

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA

GRANADA FACULTAD DE

INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C., FEBRERO DE 2026

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

Bogotá D. C., mes de 2019

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de grado, en primer lugar, a nuestras familias, quienes han sido el soporte fundamental a lo largo de todo nuestro proceso de formación profesional. Su acompañamiento constante, su comprensión frente a las exigencias académicas y su apoyo incondicional en los momentos de mayor dificultad nos brindaron la fortaleza necesaria para perseverar y culminar satisfactoriamente nuestros estudios universitarios. Cada esfuerzo realizado y cada sacrificio asumido por ellos se ve reflejado en este logro académico.

De manera muy especial, dedicamos este proyecto a nuestros padres, quienes con su ejemplo de responsabilidad, disciplina, honestidad y perseverancia nos inculcaron valores esenciales para la vida personal y profesional. Su confianza permanente en nuestras capacidades fue un impulso determinante para afrontar con compromiso cada etapa de la carrera de Ingeniería Civil, incluso en aquellos momentos marcados por la carga académica, la presión del tiempo y los retos técnicos propios de la formación universitaria.

Asimismo, dedicamos este trabajo a nuestros familiares y seres queridos, quienes, con palabras de aliento, consejos oportunos y apoyo emocional, contribuyeron a fortalecer nuestra motivación y nuestro crecimiento integral. Su presencia constante fue fundamental para mantener el equilibrio personal necesario durante el desarrollo del proyecto de grado.

De igual forma, dedicamos este trabajo a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, aportaron a nuestro crecimiento intelectual y humano, despertando en nosotros el interés por el estudio de la infraestructura de transporte como un pilar estratégico para el desarrollo económico, la integración territorial y la competitividad del país.

Finalmente, este trabajo está dedicado al fortalecimiento del transporte ferroviario en Colombia, con la convicción de que el conocimiento técnico, la planificación rigurosa y la aplicación de metodologías modernas como Building Information Modeling (BIM) pueden contribuir de manera significativa a la formulación de proyectos sostenibles, eficientes y orientados al desarrollo integral del territorio nacional.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Militar Nueva Granada por brindarle una formación académica integral, basada en principios éticos, técnicos y científicos, así como por proporcionar los espacios y recursos necesarios para el desarrollo del pensamiento crítico y analítico que fundamentan el ejercicio profesional de la ingeniería civil. La educación recibida a lo largo del programa constituyó la base esencial para la estructuración y el desarrollo de este trabajo de grado.

De manera especial, el autor agradece al director(a) del trabajo de grado por su acompañamiento permanente, orientación académica y valiosos aportes técnicos y metodológicos. Su experiencia, disposición y exigencia académica fueron determinantes para fortalecer el enfoque del estudio, garantizar la coherencia entre los objetivos planteados, la metodología aplicada y los resultados obtenidos, y elevar la calidad del trabajo desarrollado.

Asimismo, el autor expresa su agradecimiento a los docentes del área de transporte, infraestructura y gestión de proyectos, cuyos conocimientos, enseñanzas y experiencias profesionales aportaron herramientas fundamentales para la comprensión del sistema ferroviario, la planificación logística y la evaluación integral de proyectos de infraestructura. Sus aportes académicos contribuyeron significativamente a la consolidación del marco conceptual y metodológico de esta investigación.

El autor agradece igualmente a las entidades del sector transporte, a las instituciones públicas y académicas, y a las diversas fuentes de información técnica, normativa y científica consultadas, las cuales permitieron sustentar el análisis del sistema ferroviario Buenaventura–Cali y, en particular, del tramo Yumbo–Palmira. La información recopilada fue clave para la evaluación de la prefactibilidad técnica, económica y ambiental del proyecto.

Finalmente, el autor agradece a todas las personas que lo acompañaron durante este proceso académico, brindándole apoyo moral, motivación y confianza a lo largo del desarrollo del trabajo de grado. Su respaldo fue fundamental para culminar satisfactoriamente esta etapa de formación profesional y alcanzar uno de los objetivos más importantes de su vida universitaria.

CONTENIDO

1. PROBLEMA.....	12
1.1 IDENTIFICACION	12
1.2 DESCRIPCIÓN	12
1.3 PLANTEAMIENTO	13
2. DELIMITACIÓN	13
2.1 CONCEPTUAL	14
2.2 GEOGRÁFICA.....	15
2.3 CRONOLÓGICA.....	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.3 ANTECEDENTES	16
4. JUSTIFICACIÓN	18
5. MARCO REFERENCIAL	19
5.1 MARCO TEÓRICO.....	19
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	26
5.3 MARCO INSTITUCIONAL	27
5.4 MARCO LEGAL.....	29
5.5 MARCO HISTÓRICO	30
5.6 MARCO AMBIENTAL.....	31
6. METODOLOGÍA.....	33
6.1 METODOLOGIA TECNICA.....	34
6.2 METODOLOGIA ECONOMICA	35
6.3 METODOLOGIA AMBIENTAL	36
6.4 METODOLOGIA BIM.....	38
7. RESULTADOS	39
7.1 RESULTADOS TECNICA	39
7.2 RESULTADOS ECONOMICA.....	48
7.3 RESULTADOS AMBIENTAL.....	71
7.4 RESULTADOS BIM.....	113
CONCLUSIONES	118
BIBLIOGRAFIA.....	119
ANEXOS	122

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Ferrocarril del Pacifico	30
Ilustración 2. Via ferrea	40
Ilustración 3. Localizacion de Guanabanal.....	42
Ilustración 4. Imágenes actuales de la vía férrea.....	43
Ilustración 5. Estaciones de la via ferrea	47
Ilustración 6. Tipologias de las estaciones.....	47
Ilustración 7. Corredor La Dorada-Chiriguana	49
Ilustración 8. Regiotram de occidente.....	49
Ilustración 9. Metro de Bogota	49
Ilustración 10. Analisis de sostenibilidad y descarbonizacion	97

Lista de tablas

Tabla 1. Variables ambientales consideradas.....	32
Tabla 2. Clasificación de predios	42
Tabla 3. Criterios de localización de estaciones	46
Tabla 4. Componentes de los estudios y diseños.....	52
Tabla 5. Tamaño de población del área de influencia.....	56
Tabla 6. Criterios para la definición tarifaria.....	61
Tabla 7. Valor propuesto del pasaje	62
Tabla 8. Consolidación de costos de mantenimiento y operación.....	68
Tabla 9. Principales usos del suelo en el corredor Yumbo-Palmira.....	72
Tabla 10. Funciones del sistema hídrico.....	74
Tabla 11. Mamíferos	81
Tabla 12. Aves.....	82
Tabla 13. Reptiles y anfibios.....	82
Tabla 14. Afectaciones sobre la fauna y la biodiversidad	82
Tabla 15. Medidas de conservación propuestas.....	83
Tabla 16. Impactos sobre el recurso hídrico	84
Tabla 17. Impactos sobre el aire.....	84
Tabla 18. Impactos sobre la flora y fauna.....	85
Tabla 19. Impactos sobre el entorno social	85
Tabla 20. Impactos ambientales del transporte ferroviario y carretero.....	96
Tabla 21. Reducción de emisiones y eficiencia energética.....	99
Tabla 22. Protección de ecosistemas y biodiversidad.....	100
Tabla 23. Calidad del aire y ruido	101

GLOSARIO

Análisis de prefactibilidad:

Evaluación preliminar que permite determinar la viabilidad de un proyecto desde diferentes enfoques (técnico, económico y ambiental), sin llegar al nivel de detalle de los estudios de factibilidad o diseño definitivo.

BIM (Building Information Modeling):

Metodología de trabajo colaborativa basada en modelos digitales que integra información geométrica, técnica, económica y ambiental de un proyecto, facilitando su análisis, planificación y gestión a lo largo de su ciclo de vida.

Capacidad operativa:

Cantidad máxima de carga o número de operaciones que puede soportar un sistema de transporte en condiciones específicas, sin afectar su nivel de servicio.

Corredor logístico:

Espacio geográfico que articula diferentes modos de transporte y facilita el movimiento eficiente de bienes y servicios entre puntos estratégicos, como puertos, centros industriales y zonas de consumo.

Diagnóstico del corredor:

Proceso de evaluación de las condiciones actuales de la infraestructura, operación, demanda y entorno de un corredor de transporte, con el fin de identificar problemáticas y oportunidades de mejora.

Infraestructura ferroviaria:

Conjunto de elementos físicos que permiten la operación del sistema ferroviario, incluyendo la vía férrea, durmientes, balasto, señalización, estaciones y obras complementarias.

Intermodalidad:

Integración de diferentes modos de transporte (carretero, ferroviario, marítimo, entre otros) dentro de una misma cadena logística, con el fin de optimizar tiempos, costos y eficiencia.

Logística de transporte:

Conjunto de procesos asociados a la planificación, gestión y ejecución del movimiento de mercancías desde su origen hasta su destino final.

Modelo digital:

Representación virtual de un sistema o proyecto que permite simular, analizar y visualizar sus características y comportamiento bajo diferentes condiciones.

RESUMEN

El presente documento desarrolla una evaluación de prefactibilidad del sistema ferroviario en el corredor Buenaventura–Cali, con énfasis en el tramo Yumbo–Palmira, abordando de manera integral los componentes técnico, económico y ambiental. Este análisis surge a partir de la problemática asociada a la alta dependencia del transporte carretero en el corredor, la cual ha generado efectos negativos como la congestión vial, el incremento en los costos logísticos, mayores tiempos de desplazamiento, aumento de emisiones contaminantes y el deterioro progresivo de la infraestructura vial. En este contexto, se plantea la necesidad de analizar alternativas de transporte más eficientes, siendo el modo ferroviario una opción estratégica para fortalecer la competitividad y sostenibilidad del sistema logístico.

El objetivo del estudio se centra en evaluar la viabilidad del sistema ferroviario a nivel de prefactibilidad, mediante la integración de información en un entorno BIM (Building Information Modeling), el cual permite estructurar, organizar y analizar datos provenientes de distintas fuentes en un modelo digital unificado. El alcance del análisis corresponde a una fase conceptual, orientada a la generación de insumos preliminares que faciliten la toma de decisiones en etapas posteriores, sin contemplar el desarrollo de diseños de ingeniería de detalle ni estudios especializados como geotecnia o topografía avanzada.

La metodología adoptada se estructura en cuatro componentes principales. En el componente técnico, se analiza el estado actual de la infraestructura ferroviaria, su capacidad operativa y las condiciones generales del corredor. En el componente económico, se realizan estimaciones preliminares de costos y se comparan escenarios logísticos frente al transporte carretero. En el componente ambiental, se identifican y evalúan los posibles impactos asociados al proyecto, considerando variables como emisiones, consumo energético y afectaciones al entorno.

El marco teórico destaca la relevancia del transporte ferroviario como un modo eficiente en términos de costos y sostenibilidad, ampliamente utilizado a nivel internacional para la movilización de carga. No obstante, en el contexto colombiano, este sistema ha sido históricamente subutilizado debido a la falta de inversión, el deterioro de la infraestructura existente y la priorización del transporte por carretera, lo que ha limitado su desarrollo e integración dentro del sistema de transporte nacional.

Finalmente, se concluye que la reactivación del sistema ferroviario en el tramo Yumbo–Palmira presenta condiciones favorables a nivel de prefactibilidad, constituyéndose como una alternativa viable para mejorar el desempeño del sistema de transporte en el corredor. No obstante, se recomienda avanzar hacia estudios de factibilidad y diseños detallados que permitan validar los resultados obtenidos y definir con mayor precisión las condiciones de implementación del proyecto.

INTRODUCCIÓN

El transporte ferroviario constituye uno de los modos de transporte más eficientes para la movilización masiva de carga en corredores estratégicos, los cuales logran conectar puertos con centros industriales, tal y como lo indican los organismos internacionales, son los ferrocarriles quienes presentan un menor costo tonelada-kilometro y una reducción considerable de emisiones de CO_2 por unidad transportada al compararse con sistemas de transporte carretero (Word Bank, 2024; International Energy Agency [IEA], 2023).

En Colombia, sin embargo, el sistema ferroviario ha experimentado una pérdida progresiva de protagonismo dentro de la matriz nacional de transporte. Según el Plan Maestro de Transporte Intermodal, la red férrea presenta bajos niveles de operación lo cual limita la articulación multimodal en contraste con el transporte de carretera que concentra la mayor parte del movimiento de mercancías del país (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2023). Factores como el abandono institucional, la limitada inversión sostenida y la priorización histórica de la infraestructura vial han derivado en una red férrea con bajos niveles de operación, deterioro de su infraestructura y escasa integración con otros modos de transporte. Esta situación ha incrementado la dependencia del transporte por carretera, generando efectos negativos sobre los costos logísticos, la congestión vial y el impacto ambiental asociado al transporte de carga.

Dentro de este panorama, el corredor ferroviario Buenaventura–Cali adquiere especial relevancia por su papel estratégico en la conexión del principal puerto marítimo del país con el suroccidente colombiano. No obstante, el corredor presenta limitaciones técnicas y operativas asociadas al deterioro acumulado de su infraestructura y a la pérdida de continuidad en algunos tramos, como lo advierte la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI, 2024), lo cual ha restringido su funcionalidad como alternativa eficiente de transporte. En particular, el tramo Yumbo–Palmira concentra condiciones que incrementan la complejidad de una evaluación de una eventual reactivación, entre ellas el deterioro de la superestructura, deficiencias en los sistemas de drenaje y la ocupación del corredor férreo por usos no ferroviarios.

La toma de decisiones relacionadas con la rehabilitación o reactivación de infraestructura ferroviaria requiere, de manera previa, estudios que permitan evaluar de forma integral su viabilidad desde las dimensiones técnica, económica y ambiental. En este sentido, los estudios de prefactibilidad constituyen una etapa fundamental dentro de la estructuración de proyectos de transporte, ya que logran identificar restricciones, oportunidades y escenarios de intervención antes de avanzar hacia fases de mayor nivel de detalle, esto en coherencia con los lineamientos establecidos en la política de modernización de transporte férreo en Colombia (CONPES 3759, 2013). No obstante, en el contexto colombiano, la

disponibilidad de evaluaciones integradas y actualizadas para corredores ferroviarios estratégicos sigue siendo limitada, particularmente en tramos específicos como Yumbo–Palmira, lo que evidencia la necesidad de desarrollar análisis que articulen de manera sistemática las dimensiones técnicas, económicas y ambientales de los proyectos.

Paralelamente, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha adquirido creciente importancia como un enfoque para la gestión integrada de información en proyectos de infraestructura. Como lo menciona Sacks (2018), BIM no solo se limita a la modelación tridimensional, sino que constituye un sistema de gestión estructurada de datos que logra articular información geométrica y no geométrica a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Más allá de su aplicación en fases de diseño y construcción, BIM se ha consolidado como una herramienta muy útil en etapas tempranas de planificación, al permitir la integración de información técnica, económica y ambiental en entornos digitales colaborativos, facilitando el análisis de escenarios y la toma de decisiones basada en datos. En proyectos de infraestructura lineal y compleja, como los sistemas ferroviarios, este enfoque resulta especialmente pertinente para estructurar información dispersa y apoyar evaluaciones de viabilidad a nivel conceptual.

En este marco, el presente trabajo tiene como propósito evaluar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, mediante la aplicación de la metodología BIM como herramienta de apoyo para la integración y análisis estructurado de información. El estudio se desarrolla a nivel conceptual, por lo cual no contempla el diseño geométrico de la vía férrea, la ingeniería de detalle, sino que se orienta a generar insumos técnicos basados en el análisis comparativo de escenarios, que respalden la planificación del transporte y la toma de la toma de decisión estratégicas en el super ferroviario colombiano.

De esta manera, el estudio busca aportar un enfoque metodológico replicable para la evaluación integral de corredores ferroviarios en etapas tempranas de planeación. Con ello, se contribuye a reducir la brecha existente en la evaluación integral de corredores ferroviarios estratégicos en el contexto colombiano.

1. PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACION

El sistema de transporte de carga y pasajeros entre el puerto de Buenaventura y el área metropolitana de Cali constituye un eje estratégico para la competitividad económica del suroccidente colombiano, dado su papel en la articulación logística entre el principal puerto marítimo del país y los centros industriales regionales (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2023). No obstante, en la actualidad, la movilidad en este corredor se apoya de manera predominante en el transporte carretero, lo cual ha generado una serie de síntomas que evidencian una problemática asociada a la concentración modal y a la limitada diversificación del sistema de transporte.

Entre los principales síntomas identificados se encuentran: (i) congestión vial recurrente en los corredores Cali–Yumbo–Palmira, (ii) elevados tiempos de viaje y de operación logística, (iii) altos costos de transporte por tonelada movilizada, (iv) incremento en las emisiones contaminantes asociadas al transporte de carga pesada y (v) deterioro acelerado de la infraestructura vial debido al tránsito constante de vehículos de gran capacidad, condiciones que han sido señaladas en diagnósticos nacionales sobre la estructura modal del transporte en Colombia (Quintero González & Salomón Molano, 2023).

El estudio de estos síntomas y causas permite identificar variables asociadas al problema, las cuales pueden clasificarse en variables controlables, como la planificación del sistema ferroviario, la integración de información técnica y logística y la evaluación de escenarios de operación, y variables no controlables, como el crecimiento de la demanda, las condiciones macroeconómicas y las políticas nacionales de transporte.

1.2 DESCRIPCIÓN

La situación actual del corredor Buenaventura–Cali, específicamente en el tramo Yumbo–Palmira, se caracteriza por una alta presión sobre la infraestructura vial existente, asociada al crecimiento del comercio exterior y la concentración del transporte de carga en el modo carretero, situación que ha sido reconocida en la Política Nacional Logística como un factor determinante en el incremento de costos y reducción de eficiencia del sistema de transporte (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2008): Bajo esta condición se han derivado ineficiencias operativas, sobrecostos logísticos y efectos ambientales negativos que afectan la competitividad regional y la sostenibilidad del sistema de transporte.

La situación ideal corresponde a un sistema de transporte multimodal eficiente, en el cual el modo ferroviario actúe como complemento estratégico al transporte carretero, permitiendo movilizar grandes volúmenes de carga y pasajeros con menores costos unitarios, menores tiempos de operación y menores impactos ambientales en coherencia con los enfoques de integración modal promovidos por la competitividad logística internacional (Word Bank, 2023). En este escenario ideal, las decisiones de planificación se soportan en información integrada, confiable y trazable, que permita evaluar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental de las alternativas de manera anticipada.

El problema se define, por tanto, como la brecha existente entre la situación actual, caracterizada por la dependencia del transporte carretero y la falta una evaluación integral del sistema ferroviario, y la situación ideal, en la que se dispone un sistema multimodal planificado con criterios técnicos, económicos y ambientales, conforme a los estudios enfocados en la formulación de proyectos de infraestructura (Ley 1682, 2013), por tanto esta brecha evidencia la necesidad de desarrollar herramientas que permitan integrar como el Building Information Modeling (BIM).

1.3 PLANTEAMIENTO

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo estructurar, mediante Building Information Modeling (BIM), una evaluación integral de prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario en el tramo Yumbo–Palmira dentro del corredor Buenaventura – Cali, ¿que permita comparar escenarios y apoyar la toma de decisiones en la planificación del transporte regional?

2. DELIMITACIÓN

Para el desarrollo del presente proyecto se consideran únicamente las variables controlables asociadas a la situación problemática objeto de estudio, entendidas como aquellas que pueden ser analizadas, organizadas y evaluadas dentro del marco académico y metodológico del trabajo de grado. En este sentido, la delimitación tiene como finalidad definir de manera clara, precisa y explícita el alcance del proyecto, evitando ambigüedades y garantizando coherencia entre el problema planteado, los objetivos formulados y la metodología a aplicar.

El proyecto se enmarca en un nivel de prefactibilidad, por lo cual su alcance se limita al análisis preliminar del sistema ferroviario desde una perspectiva técnica, económica y ambiental. No se contemplan actividades propias de etapas posteriores como factibilidad detallada, diseño de ingeniería, gestión predial,

licenciamiento ambiental, construcción u operación del sistema ferroviario. La delimitación, por tanto, permite concentrar el estudio en la generación de insumos analíticos que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en procesos de planificación del transporte.

2.1 CONCEPTUAL

Desde el punto de vista conceptual, el proyecto se circunscribe al análisis de prefactibilidad del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira. El estudio se enfoca en el análisis de variables controlables relacionadas con la planificación del transporte ferroviario, tales como la organización y estructuración de información técnica general del sistema, la evaluación preliminar de alternativas de operación y la comparación de escenarios logísticos a nivel agregado.

En el componente técnico, la delimitación conceptual incluye el análisis general de las características funcionales del sistema ferroviario, su capacidad potencial de transporte, condiciones de operación y su articulación con otros modos de transporte presentes en el corredor. Dicho análisis se realiza a un nivel descriptivo y comparativo, sin desarrollar cálculos de diseño, modelaciones detalladas ni especificaciones técnicas de infraestructura.

En el ámbito económico, el proyecto considera la estimación preliminar de costos asociados al sistema ferroviario y la evaluación comparativa de escenarios de transporte, orientada a identificar tendencias y órdenes de magnitud que permitan valorar la conveniencia del modo ferroviario frente a otras alternativas. No se incluyen análisis financieros detallados, estudios de rentabilidad, flujos de caja, tasas internas de retorno ni evaluaciones económicas a nivel de proyecto ejecutable.

Desde la dimensión ambiental, la delimitación conceptual contempla la identificación y valoración preliminar de variables ambientales relevantes, tales como consumo energético, emisiones asociadas al transporte, uso del suelo y efectos generales sobre el entorno. Este análisis tiene un carácter indicativo y comparativo, sin llegar a la elaboración de estudios de impacto ambiental, planes de manejo ambiental o documentos requeridos para procesos de licenciamiento.

Quedan expresamente excluidos del alcance conceptual del proyecto: el diseño geométrico del trazado ferroviario, los estudios topográficos y geotécnicos detallados, la modelación estructural de la infraestructura, el diseño de estaciones, patios, sistemas de señalización y control, así como la formulación de presupuestos de obra, cronogramas de construcción y planes de ejecución.

2.2 GEOGRÁFICA

La delimitación geográfica del proyecto corresponde al corredor ferroviario Buenaventura–Cali, restringido específicamente al tramo comprendido entre los municipios de Yumbo y Palmira, ubicados en el departamento del Valle del Cauca. Este tramo se selecciona debido a su importancia estratégica dentro del sistema de transporte regional, al concentrar actividades industriales, logísticas y de movilidad asociadas al área metropolitana de Cali y su zona de influencia.

El estudio se desarrolla a escala regional, considerando las condiciones generales del territorio en el tramo Yumbo–Palmira, tales como su función dentro del corredor logístico, su relación con los centros de producción y consumo, y su papel en la conectividad entre el puerto de Buenaventura y el interior del país. No se extiende el análisis a otros segmentos del corredor ferroviario Buenaventura–Cali ni a la totalidad de la red ferroviaria nacional.

Asimismo, la delimitación geográfica excluye análisis a escala local o predial, como la evaluación de afectaciones específicas a comunidades, la localización exacta de estaciones, patios o trazados urbanos, y el análisis detallado de usos del suelo a nivel municipal. Esta restricción permite mantener la coherencia del estudio con el nivel de prefactibilidad y con el alcance académico del proyecto.

2.3 CRONOLÓGICA

Desde el punto de vista cronológico, el proyecto se desarrolla con base en información secundaria y datos disponibles y vigentes durante el período de elaboración del trabajo de grado. El análisis considera las condiciones actuales del sistema de transporte regional y, cuando resulta pertinente, proyecciones de corto y mediano plazo coherentes con el nivel de prefactibilidad del estudio.

No se realizan proyecciones de largo plazo asociadas al ciclo de vida completo de la infraestructura ferroviaria, ni análisis dinámicos de demanda a horizontes temporales extendidos, dado que estos corresponden a etapas posteriores de planeación y factibilidad detallada.

Finalmente, la delimitación cronológica del proyecto se circunscribe al período académico establecido para la formulación, desarrollo y presentación del trabajo de grado, sin contemplar fases futuras de implementación, seguimiento, operación o evaluación posterior del sistema ferroviario analizado.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, mediante la integración estructurada de información en un entorno Building Information Modeling (BIM), con el fin de apoyar la toma de decisiones en la planificación del transporte regional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la prefactibilidad técnica del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, mediante la estructuración integrada de la información técnica en un entorno BIM.
- Evaluar la prefactibilidad económica del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, mediante el análisis comparativo de escenarios logísticos integrados en la metodología BIM.
- Analizar la prefactibilidad ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, mediante la valoración de variables ambientales relevantes integradas en el modelo BIM.
- Integrar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, tramo Yumbo–Palmira, mediante la implementación de un modelo digital unificado en metodología BIM, para apoyar la toma de decisiones.

3.3 ANTECEDENTES

El presente apartado describe el estado del arte relacionado con la evaluación de la viabilidad de sistemas ferroviarios y la aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM), con el fin de contextualizar el desarrollo del proyecto y evidenciar los antecedentes que sustentan la investigación.

3.3.1 INTERNOS

En el contexto colombiano, el sistema ferroviario ha perdido protagonismo dentro de la matriz nacional de transporte, debido principalmente al abandono institucional, la limitada inversión sostenida y la priorización histórica del transporte carretero sobre otros modos. Esta situación ha derivado en una red férrea con bajos niveles de operación, escasa integración multimodal y una participación marginal en el transporte de carga y pasajeros (Quintero González & Salomón Molano, 2023).

Diversos estudios de carácter diagnóstico realizados a nivel nacional señalan que el deterioro de la infraestructura ferroviaria, la obsolescencia de la subestructura y superestructura, la baja confiabilidad del servicio y la débil articulación con

plataformas logísticas han limitado el aprovechamiento del ferrocarril como alternativa competitiva de transporte. Como consecuencia, se ha fortalecido la dependencia del transporte por carretera, incrementando los costos logísticos, el desgaste de la infraestructura vial y los impactos ambientales asociados al transporte terrestre.

Dentro de este contexto, el corredor ferroviario Buenaventura–Cali adquiere especial relevancia por su papel estratégico en la conexión del principal puerto marítimo del país con los centros productivos del suroccidente colombiano. No obstante, este corredor no ha sido objeto de una rehabilitación integral, presentando tramos con altos niveles de deterioro y pérdida de funcionalidad operativa.

Particularmente, el tramo Yumbo–Palmira se identifica como uno de los sectores más críticos del corredor debido al avanzado estado de abandono, el deterioro de la superestructura y subestructura, las deficiencias en los sistemas de drenaje, la afectación de obras de arte y la ocupación indebida del corredor férreo. Estas condiciones evidencian la necesidad de desarrollar estudios de prefactibilidad que permitan evaluar, de manera integral, la viabilidad técnica, económica y ambiental de este tramo, como insumo para la planificación del transporte y la toma de decisiones en el sector ferroviario.

3.3.2 EXTERNOS

A nivel internacional, el sistema ferroviario es ampliamente reconocido como un componente estratégico para el desarrollo económico, la competitividad logística y la sostenibilidad del transporte. Organismos como la International Union of Railways (UIC) y el Banco Mundial destacan que el ferrocarril presenta altos niveles de movilización de carga y pasajeros, medidos a través de indicadores como toneladas-kilómetro y pasajeros-kilómetro, consolidándose como una alternativa eficiente frente a otros modos de transporte terrestre, especialmente en corredores de media y larga distancia (UIC & World Bank, 2024).

La literatura internacional resalta además el papel del ferrocarril en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en el menor consumo energético por unidad transportada, lo que lo posiciona como un modo clave dentro de las estrategias de transporte sostenible adoptadas en diferentes países (International Energy Agency, 2023).

En paralelo, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha sido ampliamente aplicada en proyectos de infraestructura ferroviaria a nivel internacional como una herramienta para integrar información técnica, económica y ambiental en entornos digitales colaborativos. Estudios desarrollados en distintos contextos evidencian que BIM facilita la coordinación multidisciplinaria, la

evaluación de múltiples escenarios y la toma de decisiones en etapas tempranas de planificación, especialmente en proyectos de infraestructura lineal y compleja como los sistemas ferroviarios (Sacks et al., 2018; Volk et al., 2014; Succar & Kassem, 2015).

No obstante, pese a la consolidación de estas prácticas a nivel internacional, la aplicación de BIM en estudios de viabilidad del sistema ferroviario colombiano sigue siendo limitada, particularmente en análisis focalizados en tramos específicos. Esta brecha entre las experiencias internacionales y el contexto nacional evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones que adapten y evalúen el uso de BIM como herramienta de apoyo para la prefactibilidad ferroviaria en corredores estratégicos como el tramo Yumbo–Palmira.

4. JUSTIFICACIÓN

El sistema ferroviario constituye un componente estratégico para la eficiencia logística y la sostenibilidad del transporte, especialmente en corredores que conectan puertos marítimos con centros productivos y zonas de alta actividad industrial. En el caso del eje Buenaventura–Cali, la elevada dependencia del transporte por carretera ha incrementado los costos logísticos, la congestión vial y la presión sobre la infraestructura existente, afectando la competitividad del comercio exterior colombiano. Esta situación resulta particularmente relevante en el tramo Yumbo–Palmira, el cual atraviesa una de las zonas industriales y logísticas más importantes del Valle del Cauca y presenta condiciones de deterioro que limitan su funcionalidad ferroviaria.

Desde una perspectiva técnica y económica, la toma de decisiones relacionadas con la rehabilitación o reactivación de infraestructura ferroviaria requiere evaluaciones integrales que consideren múltiples variables, tales como el estado de la infraestructura, los costos de inversión y operación, y los beneficios asociados a la reducción de tiempos y costos de transporte. En este contexto, la metodología Building Information Modeling (BIM) ha sido ampliamente reconocida en la literatura científica indexada como una herramienta eficaz para integrar información técnica, económica y ambiental, facilitando el análisis de alternativas y la evaluación de escenarios en proyectos de infraestructura complejos desde las etapas tempranas de planificación (Sacks et al., 2018; Succar & Kassem, 2015). La aplicación de BIM en el análisis del tramo Yumbo–Palmira permite consolidar información dispersa y mejorar la calidad de los estudios de viabilidad.

Se cuentan con varios estudios científicos que destacan el aporte que tiene la aplicación de BIM en proyectos de infraestructura al contribuir significativamente en la gestión y calidad de la información, el fortalecimiento de la coordinación entre

actores y la toma de decisiones basada en datos confiables, aspectos especialmente relevantes para infraestructuras lineales como los sistemas ferroviarios (Volk et al., 2014, Sacks et al., 2018). Bajo este enfoque, el uso de BIM trasciende los procesos tradicionales de diseño y construcción, consolidándose como una herramienta de apoyo para estudios de viabilidad, análisis costo–beneficio y planificación estratégica. Esta perspectiva resulta clave para evaluar de manera objetiva la reactivación del tramo ferroviario Yumbo–Palmira dentro del corredor Buenaventura–Cali.

Desde el enfoque ambiental, la literatura científica resalta que el fortalecimiento del transporte ferroviario, sustentado en evaluaciones integrales, puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, al menor consumo energético por tonelada transportada y a la mitigación de los impactos ambientales asociados al transporte de carga por carretera (International Energy Agency [IEA], 2023). En este sentido, la evaluación de la viabilidad ambiental del tramo Yumbo–Palmira, mediante herramientas que permitan integrar variables ambientales desde las etapas tempranas del proyecto, resulta fundamental para avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible y alineado con los objetivos de desarrollo y mitigación del cambio climático.

En el ámbito académico e institucional, esta investigación se justifica en la medida en que aporta un enfoque metodológico basado en BIM para la evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, contribuyendo a cerrar brechas de información existentes en el contexto colombiano. Asimismo, los resultados del estudio podrán servir como insumo para la planificación logística, la priorización de inversiones y la toma de decisiones estratégicas en el sector transporte, fortaleciendo el conocimiento aplicado y el desarrollo de proyectos ferroviarios en el país.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO TEÓRICO

- **Normatividad y políticas BIM en Colombia**

La adopción de Building Information Modeling (BIM) en Colombia se ha formalizado a través de instrumentos de política pública que promueven su implementación progresiva en proyectos de infraestructura, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la coordinación de información y la toma de decisiones durante todo el ciclo de vida de los proyectos (DNP, 2020). La Estrategia Nacional BIM 2020-2026, desarrollada por el Departamento Nacional de Planeación, establece metas claras para la incorporación gradual de BIM en la contratación pública de proyectos de

infraestructura, incluyendo metas de cobertura por año y la meta de adopción obligatoria en proyectos públicos para 2026. colaboracion.dnp.gov.co

Además, la estandarización de BIM en Colombia considera la implementación de normas técnicas relacionadas con la gestión de la información digital, como la NTCISO 19650, la cual provee un marco internacional para la gestión de la información a lo largo del ciclo de vida de activos construidos mediante procesos colaborativos estandarizados. Esta adopción de normas ISO para BIM contribuye a la interoperabilidad y a la calidad de la información en proyectos de infraestructura, y está siendo integrada en los marcos de trabajo de instituciones públicas. Global BIM Network –

En el sector transporte, la implementación y coordinación de BIM se articula con entidades del sector transporte a través de iniciativas como la plataforma de BIM del Instituto de Planeación e Investigación para el Desarrollo Territorial (UPIT), que busca estandarizar criterios de implementación de BIM en proyectos públicos y adaptarlos al contexto colombiano.

- **Transporte ferroviario y su papel en los sistemas de transporte**

El transporte ferroviario es reconocido a nivel internacional como un modo estratégico dentro de los sistemas de transporte multimodal, debido a su alta capacidad para movilizar grandes volúmenes de carga y pasajeros de manera eficiente. Una de sus principales ventajas radica en los menores costos unitarios de operación y mantenimiento por tonelada-kilómetro y pasajero-kilómetro, así como en su mayor eficiencia energética frente a otros modos terrestres, especialmente el transporte carretero.

La eficiencia del transporte ferroviario suele evaluarse mediante indicadores como toneladas-kilómetro y pasajeros-kilómetro, los cuales permiten analizar su desempeño operativo, su productividad y su contribución al desarrollo económico y logístico de los territorios. Estos indicadores son ampliamente utilizados por organismos internacionales para comparar la competitividad de los sistemas de transporte y orientar políticas públicas en materia de movilidad y logística (UIC & World Bank, 2024).

En corredores de media y larga distancia, particularmente aquellos que conectan puertos marítimos con centros industriales y zonas de producción, el ferrocarril desempeña un papel fundamental en la reducción de la congestión vial, la disminución de los costos logísticos y la mitigación de impactos ambientales. Por esta razón, numerosos países han priorizado la rehabilitación y modernización de

su infraestructura ferroviaria como parte de estrategias orientadas al desarrollo sostenible, la eficiencia del transporte y la mejora de la competitividad económica.

- **Sistema ferroviario en Colombia y su contexto actual**

A diferencia de las tendencias internacionales, el sistema ferroviario colombiano ha experimentado una pérdida progresiva de relevancia dentro de la matriz nacional de transporte. Este proceso se ha visto influenciado por factores como el abandono institucional, la falta de inversión sostenida en infraestructura férrea y una política de transporte históricamente orientada al fortalecimiento del modo carretero.

Como resultado, gran parte de la red ferroviaria del país presenta bajos niveles de operación, deterioro de la superestructura y subestructura, limitaciones en la capacidad de carga y una débil integración con otros modos de transporte. Estas condiciones han restringido el aprovechamiento del ferrocarril como alternativa eficiente para el transporte de carga a gran escala (Quintero González & Salomón Molano, 2023).

La baja participación del ferrocarril ha incrementado la dependencia del transporte por carretera, generando altos costos logísticos, mayor deterioro de la infraestructura vial y un aumento significativo de los impactos ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la reactivación y rehabilitación de corredores estratégicos, como el eje Buenaventura–Cali, se presenta como una oportunidad para diversificar el sistema de transporte nacional, mejorar la competitividad logística y fortalecer la conexión entre el principal puerto del país y el interior.

- **Rehabilitación ferroviaria y estudios de prefactibilidad**

La rehabilitación ferroviaria comprende el conjunto de acciones técnicas orientadas a recuperar, mejorar o adecuar la infraestructura ferroviaria existente con el fin de restablecer o incrementar su capacidad operativa, seguridad y eficiencia. Estas intervenciones pueden incluir la renovación de rieles, durmientes y balasto, el mejoramiento de la subrasante, la adecuación de sistemas de drenaje, la rehabilitación de obras de arte y la actualización de elementos operativos y de señalización, sin implicar necesariamente la construcción de una nueva línea férrea (UIC, 2017).

En las etapas tempranas de planificación, los estudios de prefactibilidad cumplen un rol fundamental, ya que permiten realizar una evaluación preliminar de la viabilidad técnica, económica, ambiental y social de un proyecto. Estos estudios permiten identificar restricciones físicas y operativas, analizar diferentes escenarios

de intervención, estimar costos iniciales y orientar la toma de decisiones estratégicas antes de avanzar hacia fases de mayor nivel de detalle.

En el caso de los proyectos ferroviarios, los estudios de prefactibilidad adquieren especial relevancia debido a la complejidad técnica de la infraestructura, la interacción con el entorno y las altas inversiones requeridas para su rehabilitación y puesta en operación.

- **Competitividad logística y transporte ferroviario**

La competitividad logística se refiere a la capacidad de un sistema de transporte para movilizar mercancías de manera eficiente, confiable y a bajo costo, influyendo directamente en el desempeño económico de una región o país. Un sistema logístico competitivo permite reducir tiempos de transporte, costos operativos y pérdidas asociadas a la congestión y a la ineficiencia en la cadena de suministro.

En corredores portuarios, como el eje Buenaventura–Cali, la competitividad logística depende en gran medida de la disponibilidad de alternativas modales que permitan descongestionar la red vial, mejorar la confiabilidad del transporte y reducir los costos asociados al movimiento de carga. En este sentido, el transporte ferroviario representa una opción estratégica para el transporte masivo de mercancías, especialmente en distancias medias y largas.

El fortalecimiento del modo ferroviario contribuye a reducir la dependencia del transporte carretero, mejora la resiliencia del sistema de transporte y permite enfrentar de manera más eficiente las variaciones en la demanda y las condiciones operativas del entorno logístico (World Bank, 2023).

- **Sostenibilidad del transporte y ferrocarriles**

La sostenibilidad del transporte implica la integración equilibrada de dimensiones ambientales, económicas y sociales, con el objetivo de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las de las futuras generaciones. En este marco, el transporte ferroviario es considerado uno de los modos más sostenibles, debido a su menor consumo energético y menores emisiones de gases de efecto invernadero por tonelada-kilómetro transportada, en comparación con el transporte por carretera (IEA, 2023).

Además de los beneficios ambientales, el ferrocarril contribuye a la sostenibilidad económica mediante la reducción de costos logísticos y a la sostenibilidad social al mejorar la seguridad vial y reducir la congestión urbana. La evaluación ambiental en etapas de prefactibilidad permite identificar de manera preliminar los beneficios, impactos y restricciones ambientales de los proyectos ferroviarios, aportando

criterios técnicos para la planificación del transporte y la priorización de inversiones alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático.

- **Normatividad colombiana del transporte ferroviario**

En Colombia, aunque la normatividad ferroviaria histórica es escasa y antigua, el sistema de transporte ferroviario está regulado principalmente por el Estatuto Nacional del Transporte y varias normas que definen la intervención y responsabilidad estatal en materia de transporte y planeación:

El artículo 80 de la Ley 336 de 1996 establece que el modo de transporte ferroviario, como servicio público esencial, se regula por las normas establecidas en la Ley y por normas especiales sobre la materia, lo que obliga a que su regulación atienda la prestación de servicios de transporte con calidad y seguridad conforme a la regulación estatal.

El Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte (Decreto 1079 de 2015) compila gran parte de la regulación del sector transporte, incluida la reglamentación del transporte ferroviario y las funciones del Ministerio de Transporte como organismo rector que planifica, regula y controla el sector, así como las competencias de entidades como la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en la administración y operación de la red férrea cuando corresponda.

Aunque la regulación técnica específica del sector ferroviario colombiano aún está en desarrollo, existen proyectos de ley como el PL 232 de 2024, orientado a regular más claramente la prestación del servicio público de transporte ferroviario de carga y pasajero, así como condiciones de planeación, ordenamiento institucional, sostenibilidad ambiental y lineamientos técnicos que promuevan interoperabilidad, eficiencia y seguridad en la red férrea nacional.

Además, varios análisis jurídicos señalan que el marco actual combina normas antiguas (como la Ley 76 de 1920 y el Decreto 1075 de 1954, relacionados con la infraestructura ferroviaria) con la necesidad de un esquema técnico unificado para armonizar la regulación y facilitar la operación y reactivación de la red ferroviaria, lo cual está siendo discutido en procesos de actualización normativa.

- **Normativa internacional relacionada con ferrocarriles**

Aunque la normatividad ferroviaria internacional no rige directamente en Colombia, existen marcos comunes que orientan buenas prácticas en la regulación del transporte ferroviario a nivel global. Por ejemplo:

La Directiva Única Ferroviaria de la Unión Europea (2012/34/UE) establece principios para la organización de los mercados ferroviarios, incluyendo la separación de la gestión de infraestructura y los operadores, así como el acceso abierto a las redes ferroviarias en los Estados miembros, promoviendo la competencia y la eficiencia en el transporte de carga y pasajeros.

El Cuarto Paquete Ferroviario de la UE representa un conjunto de normas que modernizan y liberalizan aún más los servicios ferroviarios en la Unión, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la interoperabilidad entre sistemas internacionales.

- **BIM y su papel en la planificación de infraestructura ferroviaria**

La literatura técnica y estudios aplicados muestran que la adopción de BIM, si bien suele estar vinculada a fases de diseño y construcción, también aporta valor en fases tempranas de planificación y prefactibilidad de proyectos complejos de infraestructura, como los ferroviarios, al facilitar la integración de datos técnicos, la simulación de escenarios potenciales y la coordinación de distintas disciplinas en un modelo digital único, lo cual contribuye a la toma de decisiones más informadas y eficientes.

Este enfoque va más allá de la simple representación tridimensional de elementos, permitiendo la gestión de datos a lo largo del ciclo de vida del proyecto, desde la concepción hasta la operación, y ha sido promovido tanto en iniciativas nacionales (Estrategia Nacional BIM) como en estándares internacionales (ISO 19650), que buscan coordinar la gestión de la información en proyectos de infraestructura complejos.

- **BIM como herramienta de apoyo a la toma de decisiones**

El uso de BIM en estudios de prefactibilidad permite superar los enfoques tradicionales basados en información fragmentada, proporcionando un entorno digital colaborativo que mejora la calidad del análisis y la coherencia de los resultados. La integración de datos técnicos, económicos y ambientales en un modelo BIM facilita la evaluación comparativa de escenarios y alternativas de intervención, reduciendo la incertidumbre en las etapas iniciales del proyecto.

Algunos autores destacan que la aplicación de BIM en infraestructura de transporte mejora la gestión de la información (Costin et al., 2018) destacando la transparencia en los procesos de planificación y la toma de decisiones basada en datos confiables (Volk et al., 2014). En el contexto colombiano, la adopción progresiva de BIM, respaldada por la Estrategia Nacional BIM y la normativa asociada, representa una oportunidad para fortalecer los estudios de viabilidad del sistema ferroviario.

En particular, su aplicación al análisis del tramo Yumbo–Palmira del corredor Buenaventura–Cali permite integrar dimensiones técnicas, económicas y ambientales, contribuyendo a una planificación logística más eficiente y a la toma de decisiones estratégicas en el sector transporte.

- **BIM (Building Information Modeling)**

De acuerdo con el documento introductorio de BIM, esta metodología se entiende como un proceso colaborativo que se apoya en modelos digitales para integrar información geométrica y no geométrica de un proyecto. El documento permite comprender que BIM no se limita a la elaboración de modelos tridimensionales, sino que su verdadero valor radica en la gestión de la información a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, desde la etapa de planeación y diseño hasta la construcción y operación. Asimismo, se destaca de manera clara la diferencia entre BIM y el uso tradicional de herramientas CAD, enfatizando que BIM debe entenderse como una metodología de trabajo y no como un software específico.

Según el documento de software y plataformas BIM, la correcta implementación de la metodología requiere el apoyo de herramientas tecnológicas que faciliten el desarrollo del proceso. Este documento explica que las plataformas BIM permiten modelar, coordinar y analizar la información del proyecto, además de favorecer el trabajo colaborativo entre las distintas disciplinas. No obstante, se enfatiza que estas herramientas actúan únicamente como un soporte del proceso BIM, ya que el éxito de la metodología depende principalmente de la correcta definición de procesos, roles y flujos de información.

De acuerdo con el documento resumido de la norma ISO 19650, uno de los pilares fundamentales de BIM es la adecuada gestión de la información. Este documento aporta conceptos clave como el Modelo de Información del Proyecto (PIM), el Modelo de Información del Activo (AIM), los Requisitos de Intercambio de Información (EIR) y el Entorno Común de Datos (CDE). A través de estos conceptos, la norma establece lineamientos para organizar, controlar y asegurar la trazabilidad de la información, permitiendo que los datos generados durante el proyecto sean confiables, accesibles y útiles para la toma de decisiones.

Con base en el documento BIM Plan y Nivel de Desarrollo (LOD), se explica que el LOD permite definir el nivel de detalle geométrico e informativo que debe tener cada elemento del modelo en las diferentes etapas del proyecto. Este documento ayuda a comprender que la definición clara del LOD evita interpretaciones erróneas entre los actores del proyecto y permite establecer expectativas realistas sobre los entregables. De esta manera, el LOD se convierte en una herramienta clave para la planificación, coordinación y control del desarrollo del modelo BIM.

De acuerdo con el documento de BIM aplicado a la infraestructura, la metodología BIM puede adaptarse a proyectos de infraestructura como carreteras, puentes y sistemas de transporte. Este documento expone cómo BIM se extiende hacia enfoques específicos como I-BIM, BrIM y CIM, integrando información geoespacial, topográfica y funcional. Asimismo, se resalta la importancia de aplicar BIM a lo largo del ciclo de vida de las obras de infraestructura, permitiendo una mejor planificación, diseño y gestión de los activos.

- **ArcGIS**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que permiten capturar, almacenar, analizar y visualizar información georreferenciada, facilitando el estudio del territorio y la toma de decisiones en áreas como la ingeniería civil, el transporte y la planificación urbana.

ArcGIS es una plataforma de Sistemas de Información Geográfica que permite gestionar y analizar datos espaciales mediante mapas, modelos y bases de datos geográficas en entornos de escritorio, web y móviles.

Esta herramienta utiliza datos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) y ráster (imágenes, elevaciones y modelos del terreno) para representar la realidad geográfica.

En proyectos de infraestructura, ArcGIS se emplea principalmente en etapas de prefactibilidad y planificación, permitiendo la visualización de corredores, el análisis territorial y la gestión de información existente. Además, su integración con herramientas BIM facilita la ubicación de los proyectos en su contexto real, mejorando la coordinación entre información ambiental, social y técnica.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual permite definir y precisar los principales términos que sustentan el desarrollo de la investigación, facilitando la comprensión del enfoque metodológico y analítico del estudio de prefactibilidad del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira.

- **Rehabilitación ferroviaria**

La rehabilitación ferroviaria se entiende como el conjunto de acciones técnicas orientadas a recuperar, mejorar o adecuar una infraestructura ferroviaria existente para restablecer o incrementar su capacidad operativa, seguridad y eficiencia, sin implicar necesariamente la construcción de una nueva línea férrea. Estas acciones pueden incluir intervenciones en la superestructura, subestructura, obras de drenaje, señalización y elementos operativos. En estudios de prefactibilidad, la

rehabilitación se evalúa a nivel conceptual, identificando necesidades generales y restricciones técnicas (UIC, 2017; World Bank, 2023).

- **Competitividad logística**

La competitividad logística hace referencia a la capacidad de un sistema de transporte para movilizar mercancías de manera eficiente, confiable y a bajo costo, contribuyendo al desempeño económico de una región o país. En corredores portuarios como Buenaventura–Cali, la competitividad logística está estrechamente relacionada con la diversificación modal y la reducción de la dependencia del transporte carretero. El fortalecimiento del transporte ferroviario puede mejorar la competitividad logística al reducir costos unitarios, tiempos de transporte y externalidades negativas (World Bank, 2023).

- **Desarrollo regional**

El desarrollo regional se asocia al fortalecimiento de la conectividad, la integración territorial y el acceso a mercados, factores que influyen directamente en el crecimiento económico y social de las regiones. La rehabilitación de corredores ferroviarios estratégicos puede dinamizar actividades productivas, atraer inversión y mejorar la articulación entre zonas industriales y portuarias. En este sentido, el tramo Yumbo–Palmira adquiere relevancia por su localización en un área de alta actividad industrial y logística (CEPAL, 2020).

- **Sostenibilidad del transporte**

La sostenibilidad del transporte se refiere a la capacidad de los sistemas de movilidad para satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las de las futuras generaciones, integrando dimensiones ambientales, económicas y sociales. El transporte ferroviario es considerado un modo sostenible debido a su menor consumo energético y menores emisiones por tonelada-kilómetro transportada frente al transporte carretero, especialmente en el transporte de carga (International Energy Agency [IEA], 2023).

5.3 MARCO INSTITUCIONAL

El marco institucional del presente estudio se fundamenta en la estructura organizacional del sector transporte en Colombia, la cual define las competencias, responsabilidades y relaciones entre las entidades encargadas de la formulación de políticas, la planificación, la regulación, la ejecución y el control de los proyectos de infraestructura ferroviaria. Comprender este marco resulta esencial para contextualizar la evaluación de prefactibilidad del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitada al tramo Yumbo–Palmira, y para asegurar la coherencia del estudio con los lineamientos institucionales vigentes.

El Ministerio de Transporte actúa como la entidad rectora del sector y es responsable de formular las políticas públicas, estrategias y planes orientados al desarrollo del sistema nacional de transporte, incluyendo el modo ferroviario. Su función se centra en promover la integración modal, la eficiencia logística y la sostenibilidad del transporte, aspectos directamente relacionados con la reactivación y evaluación de corredores ferroviarios estratégicos como el Buenaventura–Cali.

La Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) cumple un papel clave en la estructuración, administración y gestión de proyectos de infraestructura de transporte de carácter estratégico, incluyendo los corredores ferroviarios. Esta entidad es responsable de adelantar estudios de prefactibilidad y factibilidad, estructurar esquemas de financiación y concesión, y coordinar la ejecución de proyectos ferroviarios, lo que la convierte en un actor institucional central para la eventual rehabilitación del tramo Yumbo–Palmira.

El Departamento Nacional de Planeación (DNP) participa en la formulación de políticas públicas y en la planeación estratégica del transporte a través de documentos CONPES y planes nacionales de desarrollo. El DNP orienta la priorización de inversiones en infraestructura y promueve la consolidación de un sistema de transporte multimodal, reconociendo el ferrocarril como un componente fundamental para mejorar la competitividad logística y reducir los costos del transporte de carga.

En el ámbito de la infraestructura férrea, la Empresa Férrea Regional y otras entidades técnicas del sector ferroviario cumplen funciones relacionadas con la administración, conservación y operación de tramos específicos de la red ferroviaria, dependiendo de la jurisdicción y los esquemas de gestión adoptados. Estas entidades aportan información técnica relevante para la evaluación del estado de la infraestructura y su potencial de rehabilitación.

Desde la perspectiva territorial, las autoridades departamentales y municipales del Valle del Cauca, particularmente las administraciones de Yumbo y Palmira, desempeñan un rol complementario en la articulación del proyecto con los instrumentos de ordenamiento territorial, la planificación urbana e industrial y la gestión del suelo. Su participación resulta fundamental para garantizar la compatibilidad del sistema ferroviario con el desarrollo regional y las dinámicas económicas locales.

En materia ambiental, las autoridades ambientales competentes, como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y las corporaciones autónomas regionales, establecen los lineamientos y criterios para la evaluación de impactos ambientales asociados a proyectos de infraestructura. Aunque el presente estudio se desarrolla

a nivel de prefactibilidad, el marco institucional ambiental proporciona los referentes necesarios para la valoración preliminar de los impactos potenciales de la reactivación ferroviaria.

En conjunto, este entramado institucional define el contexto en el cual se inscribe el estudio de prefactibilidad del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira, y establece las bases para que los resultados obtenidos sean pertinentes, aplicables y coherentes con los procesos de planificación y toma de decisiones del sector transporte en Colombia.

5.4 MARCO LEGAL

El presente estudio se enmarca en la normatividad colombiana relacionada con la planificación del transporte, la infraestructura ferroviaria, la formulación de proyectos de inversión pública y la implementación de metodologías de gestión de información, particularmente en etapas tempranas como la prefactibilidad.

Desde el marco constitucional, la Constitución Política de Colombia de 1991 establece la intervención del Estado en la economía (art. 334) y define el transporte como un servicio público esencial (art. 365), lo cual respalda la planificación y evaluación de sistemas de transporte como el ferroviario en función del interés general. En concordancia, la Ley 105 de 1993 establece los principios del sector transporte, destacando la eficiencia, seguridad y multimodalidad del sistema, mientras que la Ley 336 de 1996 regula la prestación del servicio público de transporte y refuerza la necesidad de planificación técnica previa. Asimismo, la Ley 1682 de 2013 exige la estructuración adecuada de proyectos de infraestructura mediante estudios técnicos, económicos y ambientales que soporten la toma de decisiones.

En el ámbito de política pública, los documentos CONPES 3547 de 2008 y 3759 de 2013 orientan la política logística nacional y la modernización del sistema ferroviario en Colombia, promoviendo la integración de los distintos modos de transporte. De igual forma, el Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) del Departamento Nacional de Planeación impulsa la articulación de corredores estratégicos como el eje Buenaventura–Cali, dentro de un enfoque multimodal que justifica el análisis del transporte ferroviario desde etapas tempranas de planificación.

En relación con la gestión de proyectos, el CONPES 3991 de 2020 establece la estrategia para la implementación de la metodología Building Information Modeling (BIM) en proyectos de infraestructura pública, promoviendo su uso como herramienta de integración de información y apoyo a la toma de decisiones. En este contexto, el Plan de Ejecución BIM (BEP) define los lineamientos de implementación del modelo, incluyendo objetivos BIM, usos del modelo, roles, responsabilidades, niveles de desarrollo (LOD) y protocolos de intercambio de información.

Así mismo, la gestión de la información bajo estándares como la norma ISO 19650 permite asegurar la organización, trazabilidad y control de los datos mediante el uso del Entorno Común de Datos (CDE), el control de versiones y la asignación de responsabilidades. Complementariamente, los flujos de trabajo BIM propuestos por el BIM Fórum Colombia establecen secuencias metodológicas que organizan la interacción entre disciplinas, puntos de revisión y entregables en cada fase del proyecto, promoviendo procesos colaborativos y eficientes.

De igual manera, la Guía de Modelado BIM para Colombia establece criterios técnicos para la estandarización de modelos, niveles de desarrollo, estructura de información y buenas prácticas de modelado, garantizando consistencia y calidad en los entregables. Por su parte, los lineamientos de BIM aplicado a infraestructura vial permiten adaptar la metodología a proyectos de carreteras y sistemas de transporte, definiendo usos BIM específicos, roles especializados y su aplicación en las diferentes fases del proyecto.

Finalmente, en el componente ambiental, la Ley 99 de 1993 crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece la obligación de considerar los impactos ambientales en la planificación de proyectos de infraestructura, lo que justifica la inclusión de la evaluación ambiental en el análisis de prefactibilidad.

En conjunto, este marco normativo sustenta la realización del estudio de prefactibilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, integrando la metodología BIM como herramienta de apoyo a la planificación, gestión de información y toma de decisiones en el sector transporte.

5.5 MARCO HISTÓRICO

El sistema ferroviario en Colombia ha sido históricamente un eje fundamental para el desarrollo económico y la integración regional. Desde finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, el ferrocarril fue el principal medio para conectar los centros de producción con los puertos marítimos, destacándose el corredor Buenaventura–Cali como una de las rutas estratégicas para el comercio exterior del país.

Como se observa en la Figura 1, el corredor ferroviario del Pacífico representó un hito en la integración económica y territorial del suroccidente colombiano, permitiendo el transporte eficiente de mercancías entre el puerto de Buenaventura y los centros industriales emergentes del Valle del Cauca.

Ilustración 1 Ferrocarril del Pacífico



Fuente: Universidad del Valle, Historia del Valle del Cauca (s. f.).

El Ferrocarril del Pacífico permitió durante décadas el transporte eficiente de carga entre el puerto de Buenaventura y el suroccidente colombiano, impulsando el crecimiento industrial y comercial del Valle del Cauca. Sin embargo, con el paso del tiempo, la falta de mantenimiento, la priorización del transporte carretero y los cambios en las políticas de infraestructura condujeron al deterioro progresivo del sistema ferroviario, reduciendo su operatividad y relevancia dentro del sistema de transporte nacional.

En años recientes, el crecimiento del comercio internacional, la congestión vial y la necesidad de mejorar la competitividad logística del país han generado un renovado interés en la reactivación del modo ferroviario. En este contexto, el corredor Buenaventura–Cali ha sido nuevamente considerado como una alternativa estratégica para el transporte de carga, especialmente en tramos con alta actividad industrial como Yumbo–Palmira, donde se concentra una parte significativa de la producción del Valle del Cauca.

La evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema ferroviario en este tramo responde a la necesidad de analizar, bajo criterios actuales, las condiciones de la infraestructura existente, la demanda potencial y los impactos asociados a su implementación. En este escenario, la metodología Building Information Modeling (BIM) se presenta como una herramienta que permite integrar información técnica, económica y ambiental, facilitando el análisis integral del proyecto y apoyando la toma de decisiones informadas.

5.6 MARCO AMBIENTAL

El desarrollo de proyectos ferroviarios implica una interacción directa con el entorno natural y social, por lo que se enmarca dentro de los principios constitucionales de protección ambiental establecidos en los artículos 79 y 80 de Constitución Política de Colombia, así como la ley 99 de 1993, que crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece la obligatoriedad de evaluar los impactos ambientales que generan los proyectos de infraestructura. Bajo esta mirada la realización de estudios

previos con las consideraciones ambientales es fundamentales en la etapa de planificación y así lo establece la Ley 1682 de 2013. En el caso del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, y particularmente en el tramo Yumbo–Palmira, el proyecto se desarrolla en una zona con alta actividad industrial, agrícola y urbana, lo que exige un análisis cuidadoso de los posibles efectos sobre el medio ambiente.

Desde una perspectiva técnica, la sostenibilidad del transporte se evalúa mediante el análisis de datos ambientales como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo energético, ocupación del suelo y generación de ruido, variables que han sido ampliamente estudiadas en el contexto internacional (International Energy Agency [IEA], 2023; UIC, 2017). Se puede afirmar que el transporte ferroviario presenta menores emisiones por tonelada-kilómetro y mayor eficiencia energética en comparación con el transporte carretero, especialmente en corredores de media y larga distancia (World Bank, 2023) lo cual genera una ventaja competitiva en este aspecto.

En el caso del tramo Yumbo–Palmira, el análisis ambiental debe considerar las condiciones particulares del territorio, caracterizado por alta actividad industrial, proximidad al río Cauca, presencia de áreas agrícolas y expansión urbana, aspectos identificados en instrumentos de planificación ambiental regional como los planes de gestión de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC, 2022). Estas características territoriales exigen una valoración preliminar de posibles interacciones con recursos hídricos, calidad del aire, uso del suelo y generación de ruido.

Sin embargo, es necesario delimitar el alcance del estudio, pues este se enfoca en la prefactibilidad por tanto la evaluación ambiental adoptada no corresponde a un Estudio de Impacto Ambiental detallado conforme al Decreto 1076 de 2015, sino a una valoración comparativa e indicativa de variables ambientales relevantes, orientada a identificar restricciones, oportunidades y beneficios potenciales asociados a la reactivación ferroviaria frente al modo carretero.

La Tabla 1 presenta las variables ambientales consideradas en la evaluación preliminar del sistema ferroviario en el tramo Yumbo–Palmira, así como los indicadores y marcos normativos asociados. La estructuración de variables ambientales presentada se fundamenta en la literatura técnica sobre sostenibilidad del transporte (IEA, 2023; UIC, 2017) y en el marco normativo ambiental colombiano (Ley 99 de 1993; Decreto 1076 de 2015).

Tabla 1. Variables ambientales consideradas

Dimensión	Variable	Indicador	Soporte normativo	Contexto regional	Nivel de análisis
-----------	----------	-----------	-------------------	-------------------	-------------------

Atmosférica	Emisiones GEI	kg CO ₂ e/ton-km	Ley 99/1993 – Política Climática	Zona industrial Yumbo	Comparativo
Energética	Consumo energético	MJ/ton-km	Política Energética Nacional	Alta demanda logística	Orden de magnitud
Territorial	Uso del suelo	Área intervenida (ha)	POT municipal	Expansión urbana y agrícola	Indicativo
Hídrica	Interacción con río Cauca	# cruces / proximidad	Decreto 1076/2015	Cuenca río Cauca	Identificación espacial
Acústica	Ruido ferroviario	dB estimado	Resolución Min Ambiente (ruido)	Zona urbana/industrial	Referencial
Materiales	Residuos de rehabilitación	m ³ estimados	Ley 99/1993	Infraestructura existente	Estimación preliminar

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de International Energy Agency (2023), International Union of Railways (2017) y del marco normativo ambiental colombiano (Ley 99 de 1993; Decreto 1076 de 2015).

6. METODOLOGÍA

Esta investigación está concebida en fases secuenciales que permiten evaluar, de manera coherente, la prefactibilidad del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, delimitado al tramo Yumbo–Palmira con la longitud de 41.22 km. Estas fases, combinan análisis cualitativos y cuantitativos, se desarrolla a nivel de prefactibilidad, sin incursionar en etapas de factibilidad ni en el diseño de ingeniería de detalle.

Cada fase busca resolver un objetivo específico y define los procedimientos, criterios de análisis, fuentes de información y herramientas metodológicas empleadas. La metodología incorpora el uso de Building Information Modeling (BIM) como herramienta de apoyo para la integración, organización y análisis de información técnica, económica y ambiental, permitiendo una visión global y coherente del corredor ferroviario a nivel conceptual y para la toma de decisiones posteriores.

La evaluación de la prefactibilidad se desarrolla a través de cuatro fases principales:

análisis de la prefactibilidad técnica, económica, ambiental y Metodología BIM las cuales se abordan de forma articulada, garantizando la coherencia entre las distintas dimensiones del estudio. A continuación, se describen en detalle cada una de las fases que conforman la metodología, precisando su alcance, variables de análisis y contribución al cumplimiento de los objetivos del trabajo.

6.1 METODOLOGIA TECNICA

La presente metodología tiene como objetivo desarrollar la descripción técnica del proyecto ferroviario en el tramo Yumbo–Palmira, mediante un enfoque estructurado orientado a caracterizar integralmente el corredor y evaluar su viabilidad a nivel de prefactibilidad técnica.

Para ello, se emplea información secundaria proveniente de fuentes técnicas, cartográficas e imágenes satelitales, complementada con herramientas de análisis espacial como ArcGIS. Esta información se procesa, organiza y analiza con el fin de construir una visión clara del estado actual del corredor, sus condiciones físicas, territoriales y de funcionamiento. Adicionalmente, el proyecto se integra en un entorno Building Information Modeling (BIM) con un nivel de desarrollo conceptual LOD 100–200, lo cual permite apoyar la toma de decisiones en etapas tempranas.

En primer lugar, se define la localización y el alcance del proyecto, estableciendo la ubicación geográfica del corredor, su delimitación y longitud, con el fin de contextualizarlo dentro del entorno regional y su área de influencia. Posteriormente, se desarrolla el análisis del contexto territorial y de demanda, evaluando la distribución poblacional, las características socioeconómicas y la identificación de zonas urbanas, industriales y logísticas. De igual forma, se analizan los flujos de transporte de pasajeros y carga, así como los principales nodos de conexión y centros generadores de demanda, lo que permite justificar el carácter de uso mixto del sistema ferroviario.

Seguidamente, se realiza la caracterización del entorno físico mediante el análisis de las condiciones topográficas, geotécnicas, geológicas e hidrológicas del área de estudio, así como la identificación de obstáculos naturales y artificiales. De manera complementaria, se lleva a cabo el análisis predial y de afectaciones, con el fin de identificar los predios requeridos, las áreas de afectación directa e indirecta, y los posibles procesos de adquisición, servidumbre o reubicación, considerando además los conflictos sociales asociados al proyecto.

A continuación, se desarrolla el diagnóstico del corredor existente, evaluando su estado actual y las restricciones físicas, técnicas y ambientales que puedan influir en su desarrollo. Con base en esto, se establecen los criterios de diseño ferroviario, considerando parámetros normativos como la velocidad de diseño, radios de curvatura y pendientes máximas.

A partir de dichos criterios, se define el trazado ferroviario mediante el análisis de alternativas y la propuesta de alineamientos horizontal y vertical, garantizando su adecuada integración con el entorno. Paralelamente, se conceptualiza la ubicación y diseño de las estaciones, teniendo en cuenta criterios de accesibilidad, demanda, conectividad y articulación con zonas urbanas e industriales.

Finalmente, se identifican y caracterizan los componentes de la infraestructura ferroviaria, se integra el proyecto en un entorno BIM y se analizan las condiciones de seguridad y operación del sistema, incluyendo señalización y control ferroviario.

En conjunto, esta metodología permite consolidar una base técnica sólida para evaluar la prefactibilidad del proyecto y apoyar la toma de decisiones en etapas posteriores.

6.2 METODOLOGIA ECONOMICA

METODOLOGÍA – Evaluación de la Prefactibilidad Económica

Para el desarrollo de la prefactibilidad económica del sistema ferroviario Buenaventura–Cali, en el tramo Yumbo–Palmira, se adoptó una metodología basada en la recopilación de información secundaria, estimaciones paramétricas y modelación de escenarios logísticos integrados mediante la metodología BIM.

En primer lugar, se realizó una investigación de referencias de costos ferroviarios, tomando como base proyectos ejecutados y en desarrollo en Colombia, tales como el corredor La Dorada–Chiriguaná, el Regiotram de Occidente y el Metro de Bogotá, así como experiencias internacionales. A partir de esta información se establecieron rangos de costos por kilómetro de vía férrea, permitiendo una aproximación inicial del costo de infraestructura.

Posteriormente, se efectuó la estimación de los costos de estudios y diseños, considerando los componentes técnicos requeridos en proyectos ferroviarios, incluyendo estudios topográficos, geotécnicos, hidrológicos, ambientales y diseños especializados. Estos costos se estimaron como un porcentaje del costo total del proyecto, siguiendo referencias de proyectos similares.

De igual forma, se desarrolló la estimación del costo de adquisición de predios, identificando el área requerida para el corredor ferroviario y analizando valores comerciales del suelo en zonas aledañas al trazado, con el fin de determinar el costo total de compra de terrenos.

En cuanto a la demanda, se realizó una estimación del número de pasajeros potenciales, basada en el análisis de población, tasas de captación de usuarios y condiciones reales de operación, lo cual permitió proyectar los ingresos del sistema.

Con base en lo anterior, se llevó a cabo la evaluación financiera del proyecto, incluyendo la estimación de ingresos, costos de operación y mantenimiento (OPEX), inversión inicial (CAPEX) y la construcción del flujo de caja. A partir de este flujo se calcularon indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión.

Adicionalmente, se definió una tarifa preliminar del pasaje, considerando referencias del transporte actual en la zona y criterios de competitividad y accesibilidad para los usuarios.

Finalmente, se integraron todos los componentes dentro de un entorno BIM, lo que permitió consolidar la información técnica y económica en un modelo digital, facilitando el análisis comparativo de escenarios logísticos y la verificación de la viabilidad económica del proyecto.

6.3 METODOLOGIA AMBIENTAL

La evaluación de la prefactibilidad ambiental del corredor ferroviario Yumbo–Palmira se desarrolló mediante una metodología de carácter descriptivo–analítico, orientada a identificar las condiciones ambientales del área de estudio, evaluar los posibles impactos asociados al proyecto y determinar su viabilidad ambiental preliminar.

El proceso metodológico integró el análisis de información secundaria, el uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y el reconocimiento de campo, permitiendo una aproximación integral a las dinámicas ambientales del territorio.

En primera instancia, se elaboró el informe de prefactibilidad ambiental, a partir de la recopilación de información proveniente de fuentes oficiales, estudios previos, cartografía temática y normativa ambiental vigente. Esta fase permitió establecer una línea base general del área de estudio, así como identificar restricciones, determinantes ambientales y posibles condicionantes para el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, se realizó la caracterización ambiental preliminar del área de estudio, mediante el análisis espacial y la verificación en campo del corredor ferroviario. En esta etapa se evaluaron los principales componentes ambientales:

En cuanto al uso del suelo, se identificaron y clasificaron las áreas presentes en el corredor, incluyendo zonas urbanas consolidadas, áreas industriales y logísticas, cultivos agrícolas extensivos y fragmentos de vegetación natural. Este análisis

permitió evaluar la interacción entre los diferentes usos del suelo y su relación con la sostenibilidad ambiental, así como identificar posibles conflictos o compatibilidades con el proyecto ferroviario.

Respecto al sistema hídrico, se identificaron los cuerpos de agua superficiales presentes en el área de influencia, analizando sus funciones ecológicas y socioambientales. Asimismo, se evaluaron los posibles impactos derivados de la implementación de la vía férrea, tales como la alteración de cauces, afectación de rondas hídricas y riesgos de contaminación.

En relación con la cobertura vegetal, se caracterizaron los diferentes tipos de vegetación presentes, evaluando sus funciones ecológicas, su interacción con el trazado ferroviario y su contribución a procesos de sostenibilidad y descarbonización, especialmente en términos de captura de carbono y regulación ambiental.

La calidad ambiental actual se analizó considerando variables como la contaminación acústica, la presencia de material particulado y la alteración de suelos y cuerpos de agua, así como los procesos de fragmentación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad. De igual manera, se identificaron los beneficios ambientales potenciales del sistema ferroviario, destacando la reducción de emisiones contaminantes frente a otros modos de transporte.

En el componente de fauna y biodiversidad, se identificaron posibles afectaciones sobre especies presentes en el área de estudio, evaluando impactos como la fragmentación del hábitat, el desplazamiento de fauna y el riesgo de mortalidad. Asimismo, se plantearon medidas preliminares de conservación orientadas a la protección de la biodiversidad.

De forma complementaria, se realizó un análisis de los impactos sobre la biodiversidad, identificando de manera cualitativa los efectos que el proyecto podría generar sobre los ecosistemas presentes en el corredor.

Con base en la información obtenida, se definieron las construcciones para prevenir impactos ambientales, proponiendo medidas de manejo desde la fase de diseño, tales como sistemas de drenaje, pasos de fauna, barreras acústicas y obras de contención, orientadas a mitigar los impactos identificados.

Posteriormente, se llevó a cabo una comparación ambiental entre modos de transporte, evaluando el sistema ferroviario frente al transporte carretero en términos de emisiones, consumo energético e impactos ambientales, lo que permitió evidenciar las ventajas del modo férreo.

Finalmente, se desarrolló un análisis de sostenibilidad y descarbonización, en el cual se evaluó el aporte del proyecto a la reducción de la huella de carbono y su contribución a modelos de transporte más sostenibles.

Como resultado de todo el proceso, se formuló la conclusión de viabilidad ambiental preliminar, en la cual se integraron los hallazgos obtenidos, determinando la compatibilidad del proyecto con el entorno ambiental y su viabilidad desde una perspectiva ambiental, constituyendo una base para etapas posteriores de factibilidad y licenciamiento.

6.4 METODOLOGIA BIM

La metodología BIM tiene como propósito integrar la información técnica, económica y ambiental del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira en un modelo digital unificado, con el fin de mejorar la gestión de la información y apoyar la toma de decisiones en la etapa de prefactibilidad.

En primer lugar, se realizó la recolección y consolidación de la información generada en las fases técnica, económica y ambiental, garantizando la coherencia y compatibilidad de los datos. Esta información incluye características del corredor, costos estimados, variables ambientales y resultados de los análisis previos.

Posteriormente, se llevó a cabo la estructuración de la información bajo estándares BIM, organizando los datos conforme a lineamientos de gestión de información como los definidos en la norma ISO 19650, incluyendo la definición de flujos de información, niveles de desarrollo (LOD 100–200) y estructura del modelo.

En la siguiente fase, se desarrolló la construcción del modelo digital del proyecto, mediante herramientas BIM, en el cual se representó de manera conceptual el corredor ferroviario, incluyendo elementos como:

- Trazado férreo
- Estaciones
- Obras principales
- Contexto territorial

Este modelo permitió integrar información geométrica y no geométrica en un entorno digital único.

Posteriormente, se realizó la integración de dimensiones del modelo (BIM multidimensional):

- 3D: Modelación del trazado y elementos del sistema
- 4D: Relación con fases del proyecto (conceptual)

- 5D: Integración de costos estimados
- 6D: Incorporación de variables ambientales

Esto permitió analizar el proyecto de manera integral.

A continuación, se efectuó la coordinación y análisis del modelo, identificando interferencias, inconsistencias y puntos críticos del proyecto, así como la evaluación de diferentes escenarios de intervención.

Finalmente, se desarrolló la visualización y análisis para la toma de decisiones, donde el modelo BIM facilitó la comprensión del proyecto, la comparación de escenarios y la reducción de la incertidumbre en la etapa de prefactibilidad.

6. RESULTADOS

7.1 RESULTADOS TECNICA

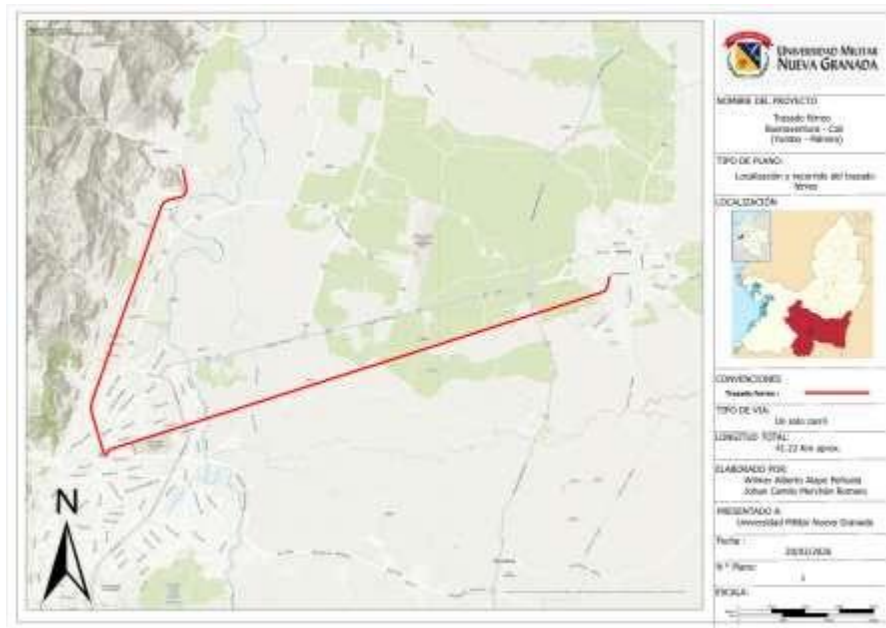
1.1 Localización del corredor

El tramo Yumbo–Palmira del corredor ferroviario Buenaventura–Cali se ubica en el departamento del Valle del Cauca y constituye un segmento estratégico por su cercanía a zonas industriales, logísticas y al área metropolitana de Cali. Mediante herramientas como Google Earth, Google Maps, QGIS y ArcGIS, se logró identificar y delimitar su trazado, evidenciando su papel clave en la conexión entre el puerto de Buenaventura y los principales centros productivos del suroccidente colombiano, lo que fortalece la articulación multimodal y la eficiencia logística de la región.

El trazado tiene una longitud aproximada de **41.22 km**, abarcando tanto áreas urbanas como rurales. Este dato es fundamental para dimensionar el proyecto, ya que permite estimar la escala de intervención y los requerimientos de infraestructura.

Adicionalmente, se elaboró un plano conceptual que permite visualizar el recorrido del corredor, los municipios involucrados y su relación con la infraestructura existente. Este plano facilita la identificación de zonas clave —urbanas, industriales y logísticas— que influyen directamente en el desarrollo del proyecto y sirven como base para su análisis en etapa de prefactibilidad.

Ilustración 2. Vía férrea



Fuente: Elaboración propia con base en información geoespacial obtenida de ArcGIS (2026).

1. Caracterización territorial, socioeconómica y de la demanda

El análisis del contexto territorial y de demanda es fundamental para entender cómo se relacionan la población, la economía y la infraestructura en el corredor Yumbo–Palmira. Este estudio permite identificar las necesidades reales de movilidad, tanto de pasajeros como de carga, así como los principales focos donde se genera dicha demanda.

En el área de influencia —que incluye Yumbo, Palmira y Cali— existe una alta concentración poblacional (más de 2,6 millones de habitantes) y una fuerte dinámica económica. Yumbo se destaca por su actividad industrial, Palmira por su vocación agroindustrial y Cali como el principal centro urbano, lo que genera constantes desplazamientos por trabajo, estudio y comercio.

Además, el corredor atraviesa zonas urbanas, industriales y logísticas estratégicas, donde se concentran actividades productivas y centros de distribución. Esto explica los altos flujos de transporte, tanto de pasajeros (movilidad diaria intermunicipal) como de carga (especialmente desde y hacia el puerto de Buenaventura). Actualmente, estos flujos dependen en gran medida del transporte por carretera, lo que genera congestión, mayores costos y afectaciones ambientales.

El análisis también permitió identificar **centros generadores de demanda** (como Yumbo, Cali y Palmira) y **nodos de conexión clave**, que facilitan la integración del

sistema ferroviario con otros modos de transporte, mejorando la accesibilidad y la intermodalidad.

Con base en todo lo anterior, se concluye que el sistema ferroviario debe enfocarse **principalmente en el transporte de pasajeros**, debido a la alta demanda diaria de movilidad. Sin embargo, se reconoce el potencial del transporte de carga, el cual podría desarrollarse en una fase futura mediante una infraestructura independiente.

En consecuencia, el servicio propuesto corresponde a un **tren de cercanías orientado a pasajeros**, diseñado para mejorar la conectividad regional, reducir tiempos de viaje y ofrecer una alternativa de transporte más eficiente y sostenible, manteniendo una visión a largo plazo que permita integrar el componente de carga.

2. Análisis predial, afectaciones y gestión social

El análisis predial es una etapa clave del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira, ya que permite entender cómo el trazado interactúa con el territorio, identificando predios, usos del suelo y posibles impactos. Esto facilita evaluar la viabilidad técnica, legal y social del proyecto, anticipando conflictos y orientando decisiones para una implementación ordenada.

A partir de herramientas SIG, se identificaron **6 predios potencialmente afectados**, en su mayoría urbanos (viviendas), junto con algunos rurales e industriales. En ciertos casos, especialmente en zonas estrechas como el sector de Guabanal, se requiere la **adquisición total de predios**, debido a que el proyecto compromete completamente su uso.

El análisis también permitió diferenciar entre **áreas de afectación directa** (donde se construirá la infraestructura ferroviaria) y **áreas de afectación indirecta** (zonas cercanas que pueden verse impactadas por ruido, cambios en movilidad o dinámicas del entorno). Esto ayuda a identificar zonas críticas para la gestión social y ambiental.

En cuanto a la gestión predial, se determinó que será necesario combinar **adquisición de predios, servidumbres y posibles reubicaciones**, dependiendo del contexto. Las servidumbres se presentan como una alternativa eficiente en zonas rurales, mientras que en áreas urbanas e industriales la intervención es más compleja.

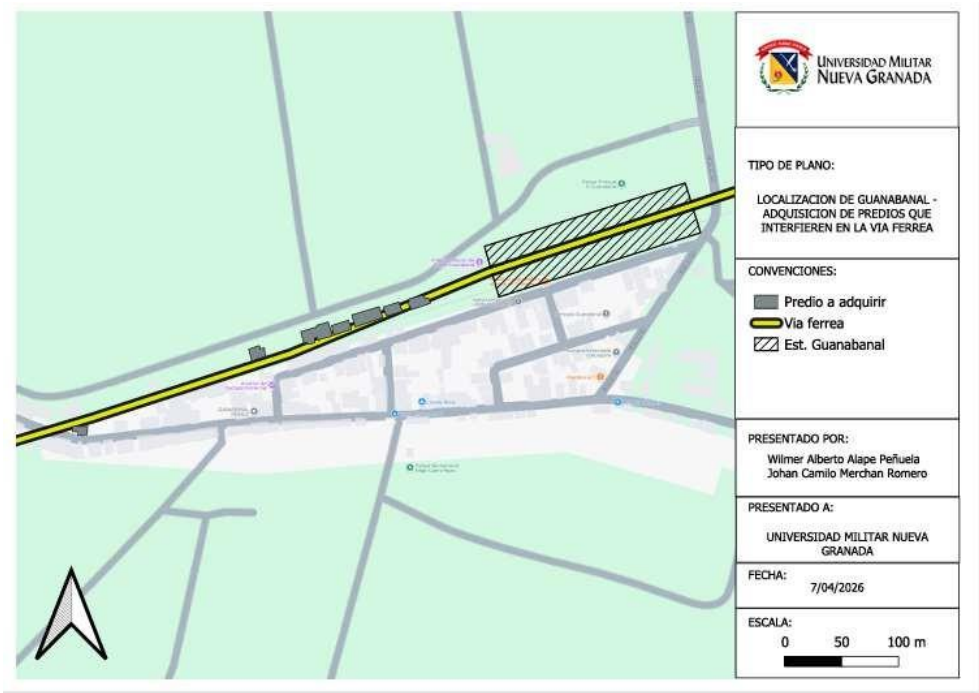
Aunque el trazado aprovecha en gran medida un corredor ferroviario existente —lo que reduce interferencias con construcciones—, se identificaron **ocupaciones informales** como parqueo de vehículos, acumulación de residuos y vegetación no controlada. Estas condiciones evidencian la necesidad de recuperar y adecuar la franja ferroviaria.

Asimismo, pueden surgir **conflictos sociales**, principalmente por el uso actual del corredor por parte de la comunidad. Esto incluye resistencia al proyecto, afectaciones a la movilidad durante la construcción y posibles inconformidades por adquisición de predios.

En este contexto, se identifican riesgos sociales como oposición de la comunidad, alteraciones en la movilidad y problemas de convivencia. Por ello, será fundamental implementar estrategias de **gestión social, comunicación y participación comunitaria**, que permitan mitigar impactos, facilitar la aceptación del proyecto y garantizar su desarrollo sostenible.

A continuación, se presenta la representación gráfica del análisis predial en el sector de Guabanal, donde se observa la superposición del corredor ferroviario existente sobre la cartografía catastral. En la imagen se identifican específicamente las viviendas ubicadas en una franja estrecha entre calles, las cuales deben ser adquiridas en su totalidad para permitir la reactivación del sistema ferroviario, evidenciando su localización y nivel de afectación.

Ilustración 3. Localización de Guabanal



A continuación, se presenta la clasificación preliminar de los predios:

Tabla 2. Clasificación de predios

Tipo de predio	Descripción	Cantidad estimada	Porcentaje (%)
----------------	-------------	-------------------	----------------

Urbano	Pedios ubicados en zonas urbanizadas, con presencia de vivienda, comercio o servicios	4	66.67 %
Rural	Pedios localizados en áreas rurales, asociados a actividades agrícolas o de baja densidad	1	16.67%
Industrial	Pedios destinados a actividades productivas, logísticas o manufactureras	1	16.67%
Total		6	100%

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4. Imágenes actuales de la vía férrea

Ilustración 6. Imágenes de la vía férrea actualmente



Fuente: *Elaboración propia con base en imágenes obtenidas de Google Maps (2026).*

La imagen muestra las zonas donde se presentan ocupaciones del corredor, evidenciando la presencia de vehículos estacionados, vegetación no controlada y acumulación de residuos, lo cual confirma la necesidad de implementar acciones de control, recuperación y mantenimiento de la franja ferroviaria para garantizar su adecuada operación.

3. Caracterización física y topográfica del terreno

El análisis del entorno físico del tramo Yumbo–Palmira permitió comprender las condiciones del territorio que influyen en el desarrollo del proyecto ferroviario. A partir de herramientas como ArcGIS, se evaluaron aspectos clave como la topografía, el tipo de suelo, la hidrología y la presencia de obstáculos, información fundamental para la prefactibilidad del proyecto.

En términos topográficos, el corredor se ubica en el valle del río Cauca, con un terreno mayormente plano a suavemente ondulado (entre 900 y 1.100 m s. n. m.), lo que favorece el trazado ferroviario. Sin embargo, existen variaciones puntuales que requieren ajustes en el diseño, así como la posible construcción de obras como puentes, alcantarillas, cortes y rellenos.

Desde el punto de vista geotécnico, predominan suelos aluviales (arcillas, limos y arenas) con baja capacidad portante y alta compresibilidad, lo que puede generar asentamientos. Además, la presencia de niveles freáticos altos y zonas inundables implica riesgos como inestabilidad del terreno y dificultades constructivas. Por ello, se plantean soluciones como mejoramiento de suelos, uso de geotextiles y sistemas de drenaje.

En cuanto a la hidrología, se identificaron ríos, quebradas y zonas de escorrentía que pueden afectar el corredor. Esto hace necesario diseñar obras hidráulicas (alcantarillas, canales y drenajes) para controlar el agua, evitar inundaciones y proteger la infraestructura.

Finalmente, se reconocieron obstáculos naturales (cuerpos de agua, zonas inundables, pendientes) y artificiales (vías, edificaciones y redes de servicios), los cuales condicionan el trazado y requieren soluciones de ingeniería como pasos a desnivel, estructuras de contención o ajustes en el diseño.

En conjunto, este análisis permite identificar zonas críticas y definir de manera preliminar las intervenciones necesarias, garantizando la viabilidad técnica, la seguridad y la adecuada planificación del corredor ferroviario.

4. Diagnóstico del corredor existente

El análisis del corredor ferroviario Yumbo–Palmira permitió obtener una visión general de su estado actual, las principales limitaciones y su relación con el entorno.

En términos generales, el corredor presenta **signos de deterioro**, como vegetación no controlada, acumulación de residuos y uso informal del espacio (por ejemplo, parqueo de vehículos). Además, los rieles muestran oxidación por falta de mantenimiento, y en algunos tramos el trazado es difícil de identificar debido a que está cubierto por maleza o materiales. A pesar de esto, la **traza del corredor aún se conserva**, lo cual es una ventaja importante para su recuperación.

Se identifican varias **restricciones**, principalmente asociadas a ocupaciones informales, problemas de drenaje y el estado de la infraestructura, que requiere rehabilitación. También existen consideraciones ambientales, como zonas con riesgo de inundación y manejo de vegetación, que deben ser atendidas.

Aun con estas condiciones, el corredor tiene una **buena compatibilidad con el entorno**, ya que sigue un trazado ferroviario existente y se conecta con zonas urbanas e industriales, lo que facilita su integración al sistema de transporte regional.

En conclusión, el corredor tiene **alto potencial para su reactivación**, pero necesita intervenciones de recuperación, mantenimiento y una adecuada gestión social y ambiental para garantizar su funcionamiento eficiente.

5. Criterios de diseño ferroviario

El análisis de los criterios de diseño para el tramo Yumbo–Palmira permitió definir los parámetros técnicos que orientan el trazado del proyecto, asegurando condiciones adecuadas de seguridad, eficiencia y viabilidad en esta etapa de prefactibilidad.

Se plantea una **velocidad de operación diferenciada** según el tipo de servicio: entre 60 y 80 km/h para carga y entre 80 y 120 km/h para pasajeros. En operación mixta, se adopta un valor intermedio, lo cual influye directamente en el diseño geométrico de la vía, como curvas, pendientes y distancias de seguridad.

El sistema se proyecta con **vía simple**, una solución que reduce costos, limita la intervención sobre el territorio y facilita su adaptación al corredor existente, complementándose con puntos de cruce para garantizar la operación.

El diseño se basa en **normativas nacionales e internacionales** (UIC, AASHTO, ANI y Ministerio de Transporte), lo que asegura estándares adecuados en aspectos como seguridad, geometría, capacidad y operación ferroviaria.

En cuanto a la geometría, se establece una **pendiente máxima del 2%** y un **radio mínimo de curvatura de 300 m**, valores que permiten un equilibrio entre seguridad, eficiencia y adaptación al terreno. En zonas específicas se podrán aplicar ajustes como peraltes para mantener condiciones operativas óptimas.

El sistema se concibe como **mixto (pasajeros y carga)**, con una operación planificada que optimiza el uso de la vía, priorizando la carga en horarios de menor demanda de pasajeros. Además, se contemplan elementos de señalización, control y coordinación con otros modos de transporte.

En conclusión, estos criterios permiten estructurar un diseño coherente con las condiciones del corredor, asegurando su viabilidad técnica y operativa, y sirviendo como base para el desarrollo de etapas posteriores del proyecto.

6. Localización y diseño conceptual de estaciones

La ubicación y el diseño de las estaciones ferroviarias son fundamentales para el funcionamiento del corredor Yumbo–Palmira, ya que determinan cómo el sistema se integra con el entorno y cómo se presta el servicio de manera eficiente y segura.

La localización de las estaciones se definió considerando aspectos clave como la **demanda de pasajeros**, la cercanía a **zonas industriales**, la **conectividad vial**, la disponibilidad de predios, el uso del suelo y las condiciones del terreno. Esto permite ubicarlas en puntos estratégicos que faciliten el acceso, reduzcan conflictos con el entorno y optimicen la operación del sistema.

En cuanto a su distribución, las estaciones de pasajeros se ubican principalmente en **zonas urbanas y periurbanas**, para atender la movilidad diaria de la población, mientras que las de carga se plantean en áreas **industriales y logísticas**, facilitando el transporte de mercancías. Además, se contemplan **patios talleres en Yumbo y Palmira**, que apoyan la operación y el mantenimiento del sistema.

Respecto a la tipología, el proyecto se enfoca principalmente en **estaciones de pasajeros**, las cuales cuentan con infraestructura básica como plataformas, accesos, señalización y conexión con otros medios de transporte. Aunque se considera el componente de carga, este se proyecta para una fase futura con una infraestructura independiente.

En conjunto, estos criterios permiten estructurar un sistema de estaciones funcional, bien integrado al territorio y alineado con las necesidades de movilidad de la región.

Tabla 3. Criterios de localización de estaciones

CRITERIO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN EN EL PROYECTO	RESULTADO ESPERADO
DEMANDA DE PASAJEROS	Concentración poblacional y flujos de movilidad	Ubicación en zonas urbanas	Alta captación de usuarios
ZONAS INDUSTRIALES	Presencia de parques industriales y empresas	Ubicación estratégica para carga	Eficiencia en transporte de mercancías
ACCESIBILIDAD VIAL	Conexión con vías principales	Integración con la red vial existente	Facilidad de acceso
USO DEL SUELO	Compatibilidad con planificación territorial	Respeto por normativa urbana e industrial	Menor conflicto territorial
DISPONIBILIDAD PREDIAL	Existencia de terrenos viables	Identificación de predios disponibles	Viabilidad constructiva
CONDICIONES TOPOGRÁFICAS	Terreno apto para infraestructura	Selección de zonas con baja complejidad	Reducción de costos

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las imágenes que evidencian la localización y distribución de las estaciones dentro del corredor Yumbo–Palmira, junto con la justificación técnica de su emplazamiento.

Ilustración 5. Estaciones de la vía férrea



A continuación, se presenta la representación gráfica de la tipología de estaciones definida para el corredor ferroviario Yumbo–Palmira, en la cual se ilustran los diferentes tipos de estaciones considerados en el proyecto. Esta imagen permite visualizar la clasificación propuesta y su relación con la funcionalidad del sistema, evidenciando el enfoque principal en el transporte de pasajeros dentro del tren de cercanías.

Ilustración 6. Tipologías de las estaciones



7. Componentes de la infraestructura ferroviaria

La infraestructura ferroviaria del corredor Yumbo–Palmira está compuesta por los elementos físicos que permiten que el sistema funcione de manera segura, estable

y continua. Estos incluyen tanto la vía como las obras necesarias para adaptarla al terreno y al entorno.

A partir de recorridos de campo y análisis del trazado, se identificaron tanto **infraestructuras existentes** como la necesidad de nuevas intervenciones en puntos críticos. Esto permitió reconocer las condiciones reales del corredor y definir las obras requeridas para su adecuada operación.

Entre los principales componentes se encuentran:

- **Plataforma de la vía:** base sobre la cual se construye la vía férrea, que incluye cortes, rellenos y compactación del terreno para garantizar estabilidad.
- **Sistema de drenaje:** encargado de manejar las aguas superficiales y subterráneas, evitando problemas como erosión o saturación del suelo.
- **Estructuras de cruce (puentes):** permiten separar el tráfico ferroviario del vehicular, mejorando la seguridad y la fluidez del sistema.
- **Obras de contención:** necesarias en zonas con pendientes o inestabilidad, para evitar deslizamientos y asegurar la integridad de la vía.

En conjunto, estos elementos garantizan que el corredor ferroviario pueda operar de manera eficiente, segura y adaptada a las condiciones del territorio.

7.2 RESULTADOS ECONOMICA

1. Investigación de referencias de costos de vías férreas

La estimación de costos de infraestructura ferroviaria es un componente fundamental en la evaluación de viabilidad económica de proyectos, especialmente en etapas de prefactibilidad, donde se requiere contar con valores de referencia confiables que permitan aproximaciones realistas del presupuesto total.

Para el caso del corredor Yumbo–Palmira, se realizó una revisión de proyectos ferroviarios en Colombia y a nivel internacional, con el fin de identificar rangos de costos por kilómetro que consideren variables como topografía, tipo de vía, tecnología implementada, condiciones del suelo y nivel de intervención requerido.

2. Proyectos ferroviarios en Colombia y otros países

A nivel nacional, los proyectos ferroviarios han presentado una alta variabilidad en sus costos debido al estado de la infraestructura existente y el tipo de intervención (rehabilitación o construcción nueva):

- **Corredor La Dorada – Chiriguana**

Ilustración 7. Corredor La Dorada-Chiriguana



Proyecto enfocado en la rehabilitación de vía existente, con costos relativamente bajos en comparación con proyectos nuevos, estimados entre USD 0.8 y 1.5 millones por km.

➤ **Regiotram de Occidente**

Ilustración 8. Regiotram de occidente



Sistema férreo de pasajeros con adecuaciones importantes, electrificación y estaciones modernas. Presenta costos entre USD 6 y 10 millones por km, dependiendo del tramo y complejidad urbana.

➤ **Metro de Bogotá**

Ilustración 9. Metro de Bogotá



Aunque es un sistema urbano elevado, sirve como referencia alta, con costos superiores a USD 80 millones por km, debido a su complejidad estructural.

A nivel internacional, se identifican los siguientes rangos:

- Proyectos en América Latina:

Costos entre USD 3 y 15 millones por km para sistemas ferroviarios convencionales, dependiendo del nivel de intervención.

- Europa y Asia:

Proyectos de alta velocidad pueden superar los USD 20 a 40 millones por km, especialmente en zonas montañosas o altamente urbanizadas.

Estos valores permiten establecer un rango base para el análisis del corredor propuesto.

- **Costo aproximado por km de vía férrea**

Considerando que el tramo Yumbo–Palmira corresponde a:

- Vía simple
 - Uso mixto (carga y pasajeros)
 - No electrificada en etapa inicial (si decides dejarlo así)
 - Con cruces a desnivel (puentes) en lugar de pasos a nivel
-
- Condiciones topográficas moderadas del Valle del Cauca

Se adopta un costo promedio de referencia de:

$$\text{Costo por Km} = 4 \text{ a } 8 \text{ millones USD/Km}$$

Para efectos de prefactibilidad, se puede tomar un valor medio:

$$\text{Costo adoptado} = 6 \text{ millones USD/Km}$$

Este valor incluye:

- Movimiento de tierras
- Plataforma y subrasante
- Superestructura (rieles, durmientes, balasto)
- Obras de drenaje

- Puentes y estructuras menores
- Señalización básica

No incluye (o se consideran aparte):

- Compra de predios
- Material rodante
- Costos financieros
- Operación y mantenimiento
- **Fuentes de información y confiabilidad de datos**

Los rangos de costos utilizados se basan en:

- Estudios del Banco Mundial (World Bank) sobre infraestructura ferroviaria.
- Reportes del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para proyectos en América Latina.
- Documentos técnicos del Ministerio de Transporte de Colombia.
- Información oficial de proyectos como Regiotram de Occidente y corredores férreos nacionales.

Estas fuentes permiten validar que los valores adoptados son consistentes con proyectos reales y condiciones similares.

- **Estimación del costo total**

El costo total del proyecto se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Costo total} = \text{costo por Km} \times \text{Numero de Km}$$

Si, por ejemplo, el tramo Yumbo–Palmira tiene una longitud aproximada de:

$$N = 41.2 \text{ Km}$$

Entonces:

$$\text{Costo total} = 6 \text{ millones USD/km} \times 41.2 \text{ Km}$$

$$\text{Costo total} = 247.2 \text{ millones USD}$$

En pesos colombianos *aprox.* 1 USD $\approx$ 4.000 COP):

$$\text{Costo total} = 988.800 \text{ millones COP}$$

Este análisis permite establecer una línea base económica preliminar, útil para comparar alternativas, evaluar viabilidad y avanzar hacia etapas posteriores de factibilidad. La integración de estos costos en el modelo BIM facilita la simulación de escenarios, optimización de recursos y toma de decisiones estratégicas en el desarrollo del proyecto ferroviario.

2. Estimación del costo de estudios y diseños

En la estructuración de proyectos de infraestructura ferroviaria, los estudios y diseños representan una fase fundamental dentro del ciclo del proyecto, ya que permiten definir con precisión las condiciones técnicas, económicas, ambientales y operativas antes de la etapa constructiva.

De acuerdo con prácticas comunes en proyectos de ingeniería civil y lineamientos utilizados en Colombia y a nivel internacional, el costo de los estudios y diseños se estima aproximadamente como un 10% del costo total de la obra, especialmente en proyectos lineales como carreteras y vías férreas en fase de prefactibilidad y factibilidad.

- **Componentes de los estudios y diseños**

Este porcentaje incluye un conjunto integral de actividades técnicas y profesionales necesarias para garantizar la correcta planificación del proyecto, entre las cuales se destacan:

Tabla 4. Componentes de los estudios y diseños

TIPO DE ESTUDIO	DESCRIPCION
Estudios topográficos	Levantamientos detallados del terreno que permiten definir el trazado geométrico de la vía férrea (alineación horizontal y vertical).
Estudios geotécnicos	Análisis de suelos y capacidad portante, fundamentales para el diseño de la subrasante, taludes y cimentaciones de estructuras como puentes y viaductos.
Estudios hidrológicos e hidráulicos	Evaluación del comportamiento de corrientes de agua, drenajes y riesgos de inundación, necesarios para el diseño de obras de drenaje y protección.
Estudios ambientales	Identificación de impactos ambientales y definición de medidas de manejo, mitigación y compensación.
Diseños geométricos y estructurales	Incluyen el diseño del trazado ferroviario, superestructura (rieles, durmientes, balasto) y obras de infraestructura como puentes y pasos a desnivel
Diseño de señalización y sistemas ferroviarios	Definición de sistemas de control, comunicación y operación del corredor.
Estudios de tránsito y demanda	Proyección del flujo de pasajeros y carga, fundamentales para dimensionar la capacidad del sistema.
Consultorías especializadas	Asesorías técnicas, económicas, legales y financieras necesarias para la estructuración integral del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

- **Estimación del costo total**

Tomando como base el costo total estimado previamente:

$$\text{costo total del proyecto} = 247,2 \text{ millones USD}$$

El costo de estudios y diseños se calcula como:

$$\text{Costo total del proyecto} = 247,2 \text{ millones USD}$$

El costo de estudios y diseños se calcula como:

$$\text{costo estudio y diseños} = 0.10 \text{ millones USD}$$

$$\text{Costo estudios y diseños} = 0.10 \times 247,2 \text{ millones USD}$$

$$\text{Costo estudios y diseños} = 24,72 \text{ millones USD}$$

En pesos colombianos:

$$\text{Costo} = 98.880 \text{ millones COP}$$

- **Importancia en la viabilidad del proyecto**

La adecuada inversión en estudios y diseños permite:

- Reducir la incertidumbre técnica del proyecto.
- Minimizar riesgos constructivos y sobrecostos.
- Optimizar el trazado y uso de recursos.
- Garantizar el cumplimiento de normativas y estándares.
- Facilitar la toma de decisiones en etapas posteriores.

En proyectos ferroviarios como el tramo Yumbo–Palmira, esta etapa es especialmente crítica debido a la interacción con múltiples variables como topografía, suelos, infraestructura existente y condiciones operativas de una vía simple con transporte mixto.

La estimación del 10% para estudios y diseños proporciona una base sólida para la evaluación económica en fase de prefactibilidad, permitiendo avanzar hacia análisis más detallados en etapas posteriores del proyecto. Además, su integración dentro del modelo BIM facilita la coordinación interdisciplinaria, la detección temprana de interferencias y la optimización del diseño antes de la construcción.

3. Estimación del costo de adquisición de predios

La adquisición de predios constituye uno de los componentes más relevantes dentro del costo total de proyectos de infraestructura lineal, como es el caso de corredores ferroviarios. Este rubro puede representar un porcentaje significativo del presupuesto, especialmente en zonas con alta valorización del suelo o presencia de áreas urbanas y periurbanas, como ocurre en el tramo Yumbo–Palmira.

La estimación del costo de predios en etapa de prefactibilidad se realiza a partir de valores promedio del metro cuadrado, referencias de mercado en zonas cercanas al corredor y el cálculo del área total requerida para la franja ferroviaria.

- **Valor del metro cuadrado en la zona del proyecto**

El valor del suelo en el corredor Yumbo–Palmira presenta variaciones dependiendo del uso del suelo:

- **Zona rural:**

Valores aproximados entre \$30.000 y \$80.000 COP/m², dependiendo de la cercanía a vías principales, acceso a servicios y productividad del terreno.

- **Zona periurbana o de expansión:**

Valores entre \$80.000 y \$200.000 COP/m², debido al crecimiento urbano y la presión inmobiliaria.

Zona urbana o industrial (especialmente en Yumbo):

Puede superar los \$200.000 a \$400.000 COP/m², dependiendo del uso industrial o logístico del suelo.

Para efectos de estimación en prefactibilidad, se puede adoptar un valor promedio ponderado de:

$$\text{Valor promedio} = 100.000 \text{ Cop /m}^2$$

Este valor busca representar una condición intermedia a lo largo del corredor.

- **Referencia de terrenos cercanos al corredor**

Los valores adoptados se fundamentan en:

- Información de mercado inmobiliario en el Valle del Cauca.
- Referencias de compra de predios en proyectos de infraestructura vial.
- Avalúos comerciales en zonas cercanas a Yumbo, Palmira y el corredor Cali–Buenaventura.

Estas referencias permiten establecer una base confiable para la estimación, aunque en etapas posteriores será necesario realizar avalúos prediales detallados por cada lote afectado.

- **Determinación del área requerida**

Para una longitud de corredor:

$$N = 41.2 \text{ Km} = 41.200 \text{ m}$$

El área total requerida es:

$$Area = 3.000\text{ m} \times 3\text{ m}$$

$$Area = 9.000\text{ m}^2$$

- **Costo total de compra de predios**

El costo total de adquisición de predios se calcula como:

$$Costo\ total = Area \times Valor\ por\ m^2$$

$$Costo\ total = 9.000\text{ m}^2 \times 100.000\text{ COP/m}^2$$

$$Costo\ total = 900.000.000\text{ COP}$$

Es decir:

$$Costo\ total = 900\text{ millones COP}$$

- **Consideraciones adicionales**

Este valor corresponde a una estimación preliminar, por lo que puede variar dependiendo de negociaciones, avalúos comerciales y procesos de adquisición.

No se incluyen costos asociados a:

- Reasentamientos
- Compensaciones sociales
- Indemnizaciones

En proyectos reales, estos costos pueden incrementar significativamente el valor total de adquisición.

La decisión de mantener una vía simple contribuye a reducir este costo, ya que limita la necesidad de adquirir una franja más amplia de terreno.

La estimación del costo de predios permite complementar el análisis económico del proyecto, evidenciando la importancia de la planificación del trazado para minimizar afectaciones y optimizar recursos. Su integración en el modelo BIM facilita la identificación de áreas críticas, la cuantificación precisa de superficies y la toma de decisiones estratégicas en etapas tempranas del proyecto.

4. Estimación de la demanda de pasajeros

La estimación de la demanda de pasajeros es un componente clave en la evaluación de la viabilidad de un sistema ferroviario, ya que permite dimensionar la capacidad operativa, proyectar ingresos y justificar la inversión en infraestructura.

Para el corredor Yumbo–Palmira, la demanda se estima a partir del análisis de las poblaciones conectadas, los patrones de movilidad regional y la proporción de

usuarios potenciales que podrían optar por el transporte ferroviario como alternativa eficiente frente a otros modos de transporte

- **Tamaño de población del área de influencia**

El tramo Yumbo–Palmira se encuentra dentro de un corredor estratégico del Valle del Cauca, con influencia directa de importantes centros urbanos e industriales:

Tabla 5. Tamaño de población del área de influencia

Palmira:	Población aproximada de 350,000 habitantes, con alta actividad agrícola, universitaria y comercial.
Yumbo:	Población cercana a 120,000 habitantes, reconocido como uno de los principales centros industriales del país.
Área de influencia (Cali y municipios cercanos):	Aunque el tramo es Yumbo–Palmira, su conexión funcional con Cali amplía significativamente la demanda potencial, alcanzando más de 2 millones de habitantes en el área metropolitana.

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de estimación conservadora, se considera una población directamente influenciada de:

$$Poblacion\ base = 500.000\ habitantes$$

- **Tasa de captación de usuarios**

No toda la población utiliza el sistema ferroviario. Se adopta una tasa de captación basada en experiencias de sistemas regionales:

$$Tasa\ de\ uso = 5\% \text{ a } 10\%$$

Para este análisis se toma un valor medio:

$$Tasa\ adoptada = 7\%$$

- **Número de pasajeros diarios estimados**

La cantidad de usuarios diarios se estima como:

$$Pasajeros\ diarios = 500.000 \times 0.07$$

$$Pasajeros\ diarios = 35.000$$

Considerando viajes de ida y regreso (factor 2):

$$Pasajeros\ totales\ diarios = 35.000 \times 2$$

$$Pasajeros\ diarios\ totales = 70.000$$

- **Ajuste por condiciones reales de operación**

Para una estimación más realista en etapa de prefactibilidad, se aplica un factor de ajuste por:

- Competencia con transporte existente (buses, vehículos particulares).
- Frecuencia del servicio ferroviario.
- Tiempo de viaje y accesibilidad a estaciones.

Se adopta un factor de reducción del 30%:

$$Demanda\ ajustada = 70.000 \times 0.7$$

$$Demanda\ diaria\ estimada = 49.000\ pasajeros/dia.$$

Resultado final de demanda

Se puede establecer que la demanda preliminar del corredor es:

$$Demanda\ estimada = 45.000\ a\ 50.000\ pasajeros\ /dia$$

- **Interpretación del resultado**

- Esta demanda es consistente con sistemas ferroviarios regionales de escala intermedia.
- Justifica la implementación de una vía simple, siempre que se cuente con adecuada programación operativa (cruces en estaciones o apartaderos).
- Permite proyectar ingresos en etapas posteriores del análisis financiero.
- Refuerza la importancia del corredor como eje de integración regional entre zonas industriales, urbanas y agrícolas.

La estimación de la demanda de pasajeros proporciona una base sólida para el análisis de viabilidad del proyecto, permitiendo dimensionar la operación ferroviaria y evaluar su sostenibilidad económica. La integración de estos datos en el modelo BIM y en herramientas de simulación facilita el análisis de escenarios, la optimización de frecuencias y la toma de decisiones estratégicas en la etapa de prefactibilidad.

5. Evaluación financiera del proyecto

La evaluación financiera del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira tiene como objetivo determinar su viabilidad económica, a partir de la estimación de ingresos generados por la operación del sistema y su comparación con los costos de inversión y operación a lo largo del tiempo.

- **Estimación de ingresos del sistema**

Los ingresos del sistema se derivan principalmente del transporte de pasajeros, considerando la demanda estimada previamente.

- Demanda diaria estimada:
 $50.000 \text{ pasajeros/día (aprox)}$

• Tarifa promedio por viaje:
Se adopta una tarifa de referencia:

$$\text{Tarifa} = 5.000 \text{ COP}$$

- Ingresos diarios:
 $\text{Ingresos diarios} = 50.000 \times 5.000$
 $\text{Ingresos diarios} = 250.000.000 \text{ COP}$

- Ingresos anuales:
 $\text{Ingresos anuales} = 250.000.000 \times 365$
 $\text{Ingresos anuales} = 91.250.000.000 \text{ COP}$

Es decir:

$$\text{Ingresos anuales} = 91.250 \text{ millones COP}$$

- **Costos de operación y mantenimiento (OPEX)**

En sistemas ferroviarios, los costos de operación suelen representar entre el 30% y 50% de los ingresos.

Se adopta un valor promedio del 40%:

$$\text{OPEX} = 0.40 \times 91.250$$

$$\text{OPEX} = 36.500 \text{ millones COP/año}$$

- **Flujo neto anual**

$$\text{Flujo neto} = \text{ingresos} - \text{OPEX}$$

$$\text{Flujo neto} = 91.250 - 36.500$$

$$\text{Flujo neto} = 54.750 \text{ millones COP/año}$$

- **Inversión inicial (CAPEX)**

Sumando los costos estimados:

- Infraestructura: 988.800 millones COP
 - Estudios y diseños: 98,880 millones COP
 - Predios: 900 millones COP
- $$\text{Inversión total} = 1.088.580 \text{ millones COP}$$

- **Valor Presente Neto (VPN)**

Se evalúa el proyecto a un horizonte de 30 años con una tasa de descuento del 10%.

El VPN se calcula como:

$$VPN = \sum \frac{\text{Flujo Neto}}{(1 + i)^t} - \text{inversion inicial}$$

Para simplificación (flujo constante), se utiliza el factor de anualidad:

$$VPN = 54.750 \times 9.43 - 1.088.580$$

$$VPN = 516.292 - 1.088.500$$

$$VPN = -572.207 \text{ millones COP}$$

- **Tasa Interna de Retorno (TIR)**

La TIR es la tasa que hace el VPN = 0.

Para este caso:

$$TIR = 5\% - 7\%$$

- **Periodo de recuperación (Payback)**

$$\text{Payback} = \frac{\text{inversion}}{\text{Flujo neto}}$$

$$\text{Payback} = \frac{1.088.500}{54.750}$$

$$\text{Payback} = 20 \text{ años.}$$

- **Interpretación de resultados**

- El proyecto presenta un VPN negativo, lo que indica que financieramente no es totalmente rentable bajo condiciones estrictamente privadas.
- La TIR es inferior a la tasa de descuento (10%), lo que refuerza que el proyecto no se justifica únicamente por ingresos tarifarios.
- Sin embargo, el periodo de recuperación es razonable para proyectos de infraestructura.

- **Análisis estratégico**

A pesar de los resultados financieros, este tipo de proyectos se justifica por sus beneficios socioeconómicos, tales como:

- Reducción de congestión vial.

- Disminución de emisiones contaminantes.
- Integración regional.
- Impulso al desarrollo económico e industrial.

Por esta razón, los proyectos ferroviarios suelen ser financiados mediante:

- Inversión pública.
- Asociaciones público-privadas (APP).
- Subsidios o cofinanciación estatal.

El análisis financiero evidencia que el corredor Yumbo–Palmira es un proyecto viable desde el punto de vista social y estratégico, aunque requiere mecanismos de apoyo financiero para su implementación. La integración de estos resultados en el modelo BIM y herramientas de simulación permite evaluar escenarios alternativos, optimizar costos e identificar estrategias para mejorar la rentabilidad del proyecto en fases posteriores.

6. Definición preliminar del valor del pasaje

La definición del valor del pasaje es un elemento clave dentro de la estructuración del proyecto ferroviario, ya que incide directamente en la demanda, los ingresos del sistema y la competitividad frente a otros modos de transporte.

En esta etapa de prefactibilidad, el valor tarifario se determina a partir de referencias del transporte actual en el corredor Yumbo–Palmira, así como de criterios de eficiencia, accesibilidad y atractivo para los usuarios.

• Referencia del transporte actual

En el corredor Yumbo–Palmira, el transporte de pasajeros se realiza principalmente mediante:

- Buses intermunicipales
- Transporte informal
- Vehículos particulares

El costo promedio del pasaje en transporte público terrestre se encuentra en un rango aproximado de:

3.000 a 6.000 por viaje

Este valor depende de factores como:

- Tipo de servicio (corriente o especial)
- Tiempo de viaje
- Nivel de comodidad

- Condiciones de tráfico

El tiempo de desplazamiento por carretera puede variar entre 45 minutos y 1.5 horas, dependiendo de la congestión vial, especialmente en accesos a zonas urbanas e industriales.

- **Criterios para la definición tarifaria**

El valor del pasaje ferroviario debe cumplir con los siguientes criterios:

Tabla 6. Criterios para la definición tarifaria

CRITERIO	DEFINICION
Competitividad	Debe ser similar o ligeramente superior al transporte terrestre, siempre que ofrezca mejores condiciones.
Ahorro de tiempo	El tren debe garantizar tiempos de viaje más cortos y confiables
Comodidad y seguridad	Mayor confort, menor riesgo de accidentes y menor variabilidad en el tiempo de viaje.
Accesibilidad económica	Debe ser asequible para la población objetivo, evitando excluir usuarios potenciales.
Sostenibilidad financiera	Debe contribuir a cubrir parcialmente los costos de operación del sistema.

Fuente: Elaboración propia

- **Valor propuesto del pasaje**

Con base en los criterios anteriores, se propone un valor de:

Tarifa ferroviaria = 5.000 COP por viaje

Este valor se justifica porque:

- Se encuentra dentro del rango del transporte actual.
- Es competitivo frente al bus.

Puede ser aceptado por los usuarios si el tren ofrece:

- Menor tiempo de viaje
- Mayor puntualidad
- Mayor comodidad

Tabla 7. Valor propuesto del pasaje

Característica	Transporte por carretera	Transporte ferroviario
Tiempo de viaje	Variable (45–90 min)	Más estable (30–40 min)
Costo	3,000 – 6,000 COP	~5,000 COP
Confiabilidad	Baja (tráfico)	Alta
Comodidad	Media	Alta
Seguridad	Media	Alta

Fuente: Elaboración propia

El tren se posiciona como una alternativa más eficiente y confiable, lo que justifica un valor tarifario competitivo dentro del mercado.

- **Consideraciones adicionales**

- En etapas futuras, se pueden implementar esquemas tarifarios diferenciados:
 - Tarifas por distancia
 - Tarifas en horas pico y valle
 - Subsidios para ciertos grupos poblacionales
- También es posible incluir ingresos complementarios:
 - Publicidad
 - Servicios en estaciones
 - Integración con otros sistemas de transporte

La definición preliminar del valor del pasaje permite establecer una base realista para la proyección de ingresos del sistema, garantizando un equilibrio entre accesibilidad para los usuarios y sostenibilidad operativa. Este valor, integrado al modelo financiero y al entorno BIM, facilita la evaluación de escenarios tarifarios y su impacto en la demanda y rentabilidad del proyecto.

7. Estimación de ingresos del sistema ferroviario

La estimación de ingresos del sistema ferroviario permite evaluar la capacidad del proyecto para generar recursos económicos a partir de su operación, constituyendo un insumo fundamental para el análisis de viabilidad financiera.

En esta etapa de prefactibilidad, los ingresos se calculan con base en la demanda estimada de pasajeros y el valor del pasaje definido, considerando un escenario de operación promedio del sistema.

- **Ingresos diarios**

A partir de los valores previamente definidos:

- **Número de pasajeros diarios:**

50.000 pasajeros / día (aprox)

Valor del pasaje:

5.000 COP

El ingreso diario se calcula como:

Ingreso diario = Numero de pasajeros x valor del pasaje

Ingreso diario = 50.000 x 5.000

Ingresos diarios = 250.000.000 COP

- **Ingresos mensuales proyectado:**

Se considera un mes promedio de 28 días:

Ingresos mensuales = 250,000,000 × 28

Ingreso mensuales = 7.000.000.000 COP

Es decir:

Ingresos mensuales = 7.000 millones COP

- **Ingresos anuales proyectados**

Para un año de operación:

Ingresos anuales = 250.000.000 x 365

Ingresos anuales = 91.250.000.000 COP

Es decir:

Ingresos anuales = 91.250 millones COP

- **Análisis de los ingresos**

- Los ingresos estimados reflejan un sistema con alta demanda potencial, consistente con la importancia del corredor Yumbo–Palmira.
- Estos valores permiten cubrir una parte significativa de los costos de operación y mantenimiento, aunque no necesariamente la totalidad de la inversión inicial.

La estabilidad de los ingresos dependerá de factores como:

- Frecuencia del servicio
 - Calidad del sistema
 - Integración con otros medios de transporte
 - Crecimiento de la demanda en el tiempo
- **Escenarios de variación**

Para fortalecer el análisis, se pueden considerar escenarios:

- Escenario conservador: menor demanda (~40,000 pasajeros/día).
- Escenario optimista: mayor demanda (~60,000 pasajeros/día).

Esto permite evaluar la sensibilidad de los ingresos frente a cambios en la demanda y mejorar la toma de decisiones.

La estimación de ingresos constituye una base fundamental para el análisis financiero del proyecto, permitiendo proyectar flujos de caja, evaluar indicadores como el VPN y la TIR, y definir estrategias de sostenibilidad económica. Su integración en el modelo BIM y herramientas de simulación facilita la evaluación de diferentes escenarios operativos y tarifarios, fortaleciendo la planificación del sistema ferroviario en etapas posteriores.

8. Horizonte de recuperación de la inversión

El horizonte de recuperación de la inversión es un indicador clave dentro de la evaluación financiera de proyectos de infraestructura, ya que permite estimar el tiempo necesario para recuperar el capital invertido a partir de los flujos de ingresos generados por la operación del sistema ferroviario.

En el caso del corredor Yumbo–Palmira, este análisis se realiza considerando las características propias del proyecto: alta inversión inicial, tarifas moderadas y un enfoque de servicio público, lo cual influye directamente en los tiempos de retorno.

- **Periodo estimado de recuperación**

De acuerdo con los cálculos preliminares realizados en las secciones anteriores, se tiene:

- Inversión total estimada:
1.088.500 millones COP

- Flujo neto anual:
= 54,750 millones COP/año

El periodo de recuperación (Payback) se estima como:

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Flujo neto anual}}$$

$$\text{Periodo} = \frac{1.088.500}{54,750}$$

$$\text{Periodo} = 20 \text{ años}$$

Sin embargo, este valor corresponde a un escenario ideal teórico, que no incorpora completamente factores reales como variaciones en la demanda, costos adicionales o ajustes tarifarios.

Por esta razón, en proyectos ferroviarios reales se adopta un horizonte más amplio:

$$\text{Horizonte realista} = 25 \text{ a } 30 \text{ años}$$

- **Consideraciones de tarifas moderadas**

Uno de los factores más importantes que influye en el horizonte de recuperación es la política tarifaria:

- Se ha definido una tarifa aproximada de 5,000 COP, la cual es:
 - Accesible para la población
 - Competitiva frente al transporte terrestre
 -
- Sin embargo, no maximiza los ingresos, ya que el objetivo del sistema no es únicamente la rentabilidad, sino también la accesibilidad y el beneficio social.

Esto implica que el proyecto prioriza:

- Movilidad eficiente
- Inclusión social
- Desarrollo regional

sobre la recuperación rápida de la inversión.

- **Limitaciones financieras de los municipios**

El corredor Yumbo–Palmira se desarrolla en un contexto donde:

- Los municipios tienen recursos fiscales limitados.
- Existen múltiples necesidades de inversión en infraestructura, salud y educación.

- La financiación del proyecto requiere apoyo de:
 - Gobierno nacional
 - Esquemas de cofinanciación
 - Asociaciones público-privadas (APP)

Por lo tanto, el proyecto no puede depender exclusivamente de los ingresos tarifarios para recuperar la inversión en el corto plazo.

- **Enfoque de rentabilidad social**

Los proyectos ferroviarios, especialmente en contextos regionales, deben evaluarse no solo desde la rentabilidad financiera, sino también desde la rentabilidad social, que incluye beneficios como:

- Reducción de tiempos de viaje.
- Disminución de congestión vehicular.
- Reducción de emisiones contaminantes.
- Impulso al desarrollo económico e industrial.
- Generación de empleo.

Estos beneficios justifican horizontes de recuperación más largos y la participación del Estado en su financiación.

El análisis del horizonte de recuperación permite concluir que el proyecto ferroviario Yumbo–Palmira es una inversión de largo plazo, cuyo retorno económico directo se complementa con importantes beneficios sociales y estratégicos. La adopción de un horizonte de 25 a 30 años es consistente con proyectos de infraestructura similares y permite estructurar adecuadamente los mecanismos de financiación y sostenibilidad del sistema.

La integración de este análisis en el modelo BIM y en la evaluación financiera facilita la simulación de escenarios, el ajuste de variables económicas y la toma de decisiones informadas en etapas posteriores del proyecto.

9. Inclusión de costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento y operación constituyen un componente esencial en la sostenibilidad del sistema ferroviario, ya que garantizan la seguridad, continuidad del servicio y conservación de la infraestructura a lo largo del tiempo.

En proyectos ferroviarios, estos costos se agrupan dentro del OPEX (Operational Expenditure) e incluyen tanto el mantenimiento de la infraestructura como la operación diaria del sistema. Para el corredor Yumbo–Palmira, se consideran tres

componentes principales: mantenimiento de la vía férrea, mantenimiento del material rodante y operación del sistema.

- **Mantenimiento de vía férrea**

El mantenimiento de la vía férrea incluye todas las actividades necesarias para conservar en buen estado la superestructura (rieles, durmientes, balasto) y la infraestructura (plataforma, drenajes, obras civiles).

Entre las principales actividades se encuentran:

- Alineación y nivelación de la vía (bateo de balasto).
- Reemplazo de durmientes y fijaciones deterioradas.
- Mantenimiento de rieles (soldaduras, rectificado).
- Limpieza y reposición de balasto.
- Mantenimiento de drenajes y control de erosión.
- Inspección periódica de puentes y estructuras.

El costo de mantenimiento de vía suele estimarse entre:

1 % a 3% del costo de la infraestructura por año

Adoptando un valor promedio del 2%:

$$\text{Mantenimiento de la vía} = 0.02 \times 988.800$$

$$\text{Mantenimiento de la vía} = 19.776 \text{ millones COP/año}$$

- **Mantenimiento de material rodante**

El mantenimiento del material rodante incluye las actividades necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de los trenes y la seguridad de los pasajeros:

- Revisiones mecánicas periódicas.
- Mantenimiento de sistemas eléctricos y electrónicos.
- Sustitución de componentes desgastados.
- Inspecciones de seguridad.

Este costo suele representar entre el 10% y 20% de los costos operativos totales.

Para este análisis, se considera incluido dentro del OPEX global, estimándose aproximadamente en:

$$= 8.000 \text{ a } 10.000 \text{ millones COP/año}$$

- **Operación del sistema**

La operación del sistema incluye todos los costos asociados al funcionamiento diario del servicio ferroviario:

- Personal operativo (conductores, controladores, mantenimiento).
- Energía o combustible.
- Gestión administrativa.
- Sistemas de control y señalización.
- Seguridad y vigilancia.

Como se estimó previamente, los costos de operación y mantenimiento total representan aproximadamente:

40 % de los ingresos

OPEX total = 36.500 millones COP/año

- **Consolidación de costos de mantenimiento y operación**

Tabla 8. Consolidación de costos de mantenimiento y operación

Componente	Costo estimado (millones COP/año)
Mantenimiento de vía	19,776
Mantenimiento de trenes	8,000 – 10,000
Operación del sistema	Incluido en OPEX
Total, OPEX	≈ 36,500

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de importancia**

- Estos costos garantizan la vida útil del sistema ferroviario y reducen el riesgo de fallas operativas.
- Un mantenimiento adecuado evita sobrecostos futuros por rehabilitaciones mayores.
- La correcta gestión del OPEX es clave para mejorar la viabilidad financiera del proyecto.
- En sistemas ferroviarios, el equilibrio entre inversión inicial (CAPEX) y mantenimiento (OPEX) define la sostenibilidad a largo plazo.

La inclusión de los costos de mantenimiento y operación dentro del análisis financiero permite obtener una visión más realista del comportamiento económico del proyecto, evidenciando que la sostenibilidad del sistema no depende únicamente de la inversión inicial, sino de una adecuada gestión de los recursos durante su vida útil.

La integración de estos costos en el modelo BIM y en herramientas de simulación facilita la planificación del mantenimiento, la optimización de recursos y la toma de decisiones estratégicas en etapas futuras del proyecto ferroviario

10. Aplicación del análisis financiero con valor futuro

El análisis con valor futuro permite proyectar el crecimiento de los ingresos del sistema ferroviario a lo largo del tiempo, considerando el efecto de variables como el incremento de la demanda, ajustes tarifarios e inflación.

Para este caso, se adopta una tasa de crecimiento anual conservadora del:

$$g = 3\% \text{ anual}$$

La proyección de ingresos se realiza mediante la fórmula de valor futuro:

$$VF = VA \times (1 + g)^n$$

Donde:

- VF : valor futuro
- VA : ingreso anual actual
- g : tasa de crecimiento
- n : número de años

Tomando como base:

$$VA = 91,250 \text{ millones COP/año}$$

Para un horizonte de **30 años**:

$$VF = 91,250 \times (1.03)^{30}$$

$$VF = 91,250 \times 2.43$$

$$VF = 221,737 \text{ millones COP/año}$$

Esto indica que, bajo condiciones de crecimiento moderado, los ingresos del sistema podrían **más que duplicarse** en el largo plazo.

11. Comparación inversión vs ingresos

El análisis comparativo permite evaluar la relación entre la inversión inicial y los ingresos proyectados en el tiempo.

- **Inversión inicial (año 0):**
1,088.500 millones COP
- **Ingresos anuales iniciales:**
91,250 millones COP

- **Ingresos proyectados a largo plazo:**
> 200,000 millones COP/año

A medida que transcurren los años, el crecimiento de los ingresos reduce la brecha frente a la inversión inicial, especialmente en escenarios de incremento de demanda y eficiencia operativa.

Este comportamiento es típico en proyectos de infraestructura, donde:

- La inversión es alta al inicio.
- Los ingresos aumentan progresivamente con el tiempo.

12. Verificación de viabilidad económica

La viabilidad económica se determina evaluando si los ingresos proyectados permiten recuperar la inversión dentro del horizonte definido.

- El análisis indica que:
 - En el corto plazo, el proyecto presenta **limitaciones financieras**.
 - En el largo plazo (25–30 años), los ingresos crecen significativamente.

Sin embargo:

- La recuperación completa depende de:
 - Crecimiento real de la demanda
 - Control de costos operativos
 - Estabilidad de la tarifa
- **Ajustes necesarios para mejorar la viabilidad**

Para lograr una viabilidad positiva más sólida, se pueden considerar:

- Incrementos graduales en la tarifa.
- Integración con otros sistemas de transporte.
- Ingresos adicionales (publicidad, logística, carga).
- Optimización de costos de operación.
- Apoyo financiero del Estado o esquemas APP.

En este contexto, el proyecto es **económicamente viable en el largo plazo**, pero requiere estrategias complementarias para fortalecer su rentabilidad.

7.3 RESULTADOS AMBIENTAL

RESULTADOS DE LA PREFACTIBILIDAD AMBIENTAL

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología de prefactibilidad ambiental al sistema ferroviario en el tramo Yumbo–Palmira, como parte del corredor estratégico Buenaventura–Cali.

El análisis se desarrolló bajo un enfoque conceptual propio de esta etapa de estudio, permitiendo evaluar de manera preliminar la viabilidad ambiental del proyecto mediante la identificación de impactos potenciales, la caracterización del entorno y la valoración de las condiciones ambientales del área de influencia.

Los resultados integran la evaluación de los componentes ambientales, incluyendo el uso del suelo, el sistema hídrico, la cobertura vegetal, la fauna y biodiversidad, así como la calidad ambiental del área. Asimismo, se consideran los impactos asociados al proyecto y las medidas de manejo ambiental necesarias para su adecuada implementación.

Adicionalmente, se analizan los beneficios del sistema ferroviario en comparación con otros modos de transporte, destacando su contribución a la sostenibilidad, la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes, lo que lo posiciona como una alternativa estratégica para el desarrollo logístico de la región.

En este sentido, los resultados obtenidos permiten sustentar la viabilidad ambiental preliminar del proyecto, estableciendo las bases para las siguientes etapas de estudio y diseño, en las cuales se deberán profundizar los análisis mediante instrumentos como el Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

1. Caracterización ambiental preliminar del área de estudio

El corredor Yumbo–Palmira se localiza en una zona altamente intervenida del Valle del Cauca, caracterizada por la coexistencia de actividades urbanas, industriales y agrícolas, especialmente el cultivo de caña de azúcar, lo que ha impulsado un uso intensivo del suelo y el desarrollo de infraestructura.

A pesar de esta intervención, el territorio conserva elementos ambientales importantes como corredores ecológicos, vegetación ribereña y áreas de cobertura vegetal que permiten la conectividad ecológica y el mantenimiento de procesos naturales, además de servir como hábitat y zonas de desplazamiento para diversas especies de fauna.

Sin embargo, la interacción entre el sistema natural y las actividades humanas genera presiones sobre recursos como el aire, el agua y la biodiversidad, incluyendo riesgos para la fauna, como la fragmentación de hábitats y el desplazamiento de especies. Por ello, el desarrollo de infraestructura como el sistema ferroviario requiere la implementación de medidas orientadas a la protección de la fauna, como la conservación de corredores ecológicos, la reducción de impactos sobre hábitats y la inclusión de pasos de fauna.

En este contexto, se resalta la necesidad de implementar soluciones de transporte sostenibles que contribuyan a reducir el impacto ambiental y promuevan la protección de la biodiversidad, en coherencia con el desarrollo territorial responsable.

- **Uso del suelo**

El área de influencia del corredor ferroviario Yumbo–Palmira se caracteriza por una compleja heterogeneidad en el uso del suelo, producto de décadas de desarrollo urbano, industrial y agrícola que han transformado significativamente el paisaje natural del Valle del Cauca. Esta diversidad de usos genera un mosaico territorial donde conviven zonas densamente pobladas, polígonos industriales, cultivos extensivos y remanentes de vegetación natural, elementos que condicionan de manera directa el diseño, construcción y operación del sistema ferroviario. La comprensión detallada de esta estructura territorial es fundamental para evaluar impactos ambientales, identificar restricciones prediales y definir medidas de mitigación y adaptación ambiental.

Tabla. Principales usos del suelo en el corredor Yumbo–Palmira

Tabla 9. Principales usos del suelo en el corredor Yumbo-Palmira

Uso del suelo	Características principales	Implicaciones para el proyecto
Zonas urbanas	Alta densidad poblacional, infraestructura desarrollada, presencia de viviendas y servicios.	Restricciones de espacio, necesidad de minimizar impactos en población, ruido y movilidad.
Áreas industriales y logísticas	Parques industriales, bodegas y centros de distribución, alta actividad de transporte de carga.	Oportunidad logística, pero requiere control de riesgos, seguridad e integración operativa.
Áreas agrícolas	Cultivos extensivos (caña de azúcar, hortalizas, frutales).	Posibles afectaciones a suelos, drenaje y productividad; necesidad de medidas de mitigación.

Vegetación natural	Fragmentos de bosques, riberas y corredores ecológicos.	Protección de biodiversidad, conectividad ecológica y necesidad de evitar impactos ambientales.
Interacción general	Coexistencia de múltiples usos en un mismo territorio.	Requiere enfoque integral de sostenibilidad, planificación y gestión ambiental.

Fuente: Elaboración propia

2. Sistema hídrico

El componente hídrico del área de estudio constituye uno de los elementos más relevantes en la evaluación ambiental del corredor ferroviario Yumbo–Palmira, debido a la estrecha relación existente entre la infraestructura proyectada y los sistemas de agua superficial presentes en la región. Su análisis permite comprender la dinámica hidrológica del territorio, identificar los cuerpos de agua involucrados y establecer las posibles afectaciones derivadas de la intervención, así como las medidas necesarias para su protección y manejo.

En el área de estudio se identificó un sistema hídrico compuesto por:

- Río Cauca (principal eje hídrico de la región)
- Quebradas y canales de drenaje
- Humedales y cuerpos de agua menores

El río Cauca se consolida como el principal eje hídrico, recibiendo el aporte de múltiples afluentes y desempeñando un papel fundamental en la regulación del sistema hídrico regional. Por su parte, las quebradas y canales de drenaje permiten la evacuación de aguas lluvias y el transporte de sedimentos, mientras que los humedales y cuerpos de agua menores actúan como reguladores naturales del ciclo hidrológico, contribuyendo a la recarga de acuíferos y al control de inundaciones.

Estos cuerpos de agua no solo cumplen funciones hidrológicas, sino que también constituyen hábitats esenciales para una gran diversidad de especies, incluyendo peces, anfibios, macroinvertebrados y aves ribereñas, las cuales dependen directamente de la calidad, cantidad y continuidad del recurso hídrico.

- **Sistema hídrico del área de estudio**

El sistema hídrico presente en el área se caracteriza por una red interconectada de cuerpos de agua que responden tanto a condiciones naturales como a intervenciones antrópicas. La variabilidad en los caudales, la calidad del agua y la dinámica de escorrentía están influenciadas por factores como la estacionalidad

climática, el uso del suelo (predominantemente agrícola e industrial) y la expansión urbana.

El trazado ferroviario interactúa con este sistema en diferentes puntos a lo largo del corredor, lo que implica la necesidad de considerar cuidadosamente el diseño de obras hidráulicas, drenajes y estructuras de cruce, con el fin de evitar alteraciones significativas en la dinámica natural del agua.

- **Funciones del sistema hídrico**

El sistema hídrico del área de estudio cumple funciones fundamentales que deben ser consideradas en el desarrollo del proyecto:

Tabla 10. Funciones del sistema hídrico

Sistema hídrico	Definición
Regulación hídrica:	contribuye al control de caudales, la prevención de inundaciones y la regulación del comportamiento de los humedales.
Hábitat para fauna:	alberga especies acuáticas y semiacuáticas que dependen de la calidad del agua para su supervivencia.
Corredores ecológicos:	permiten la conectividad entre diferentes ecosistemas, facilitando el desplazamiento de especies.
Uso agrícola e industrial:	Uso agrícola e industrial: el agua es utilizada para riego, procesos productivos y abastecimiento de actividades económicas, lo que incrementa la presión sobre el recurso.

Fuente: Elaboración propia

- **Cuerpos de agua identificados**

En el área de influencia del proyecto se identifican diversos cuerpos de agua, entre ellos ríos principales, quebradas secundarias, canales de riego y drenaje, así como humedales y cuerpos de agua menores. Estos elementos conforman una red hídrica que cumple funciones clave en la regulación ambiental y el soporte de actividades humanas.

Las condiciones de estos cuerpos de agua pueden variar considerablemente dependiendo de la época del año, presentando periodos de mayor caudal durante temporadas de lluvia y reducciones significativas en épocas secas. Asimismo, su calidad puede verse afectada por descargas agrícolas, industriales y urbanas, lo que representa un reto importante en términos de gestión ambiental.

- **Áreas de influencia**

Para el análisis del componente hídrico se definieron dos áreas de influencia:

- **Área de influencia directa (AID):** corresponde a las zonas donde el trazado del proyecto intercepta o se encuentra en proximidad inmediata a cuerpos de agua, como cruces de ríos, quebradas y canales. En estas áreas existe una alta probabilidad de afectación física del recurso hídrico, incluyendo alteraciones en cauces, afectación de rondas hídricas y cambios en la dinámica hidráulica.
- **Área de influencia indirecta (AI):** comprende las zonas aledañas a las microcuencas asociadas al proyecto, donde pueden generarse impactos secundarios como cambios en la escorrentía superficial, procesos de contaminación difusa y alteraciones en la dinámica hídrica general del territorio.

La correcta delimitación de estas áreas permite establecer estrategias de manejo ambiental, orientadas a prevenir, mitigar y compensar los posibles impactos sobre los recursos hídricos.

- **Impactos potenciales del proyecto**

Durante la fase de construcción:

- Alteración de cauces naturales por excavaciones, rellenos y obras de infraestructura.
- Incremento de la sedimentación y turbidez en cuerpos de agua debido a procesos de erosión.
- Riesgo de contaminación por vertimientos de residuos de construcción, aceites y combustibles.
- Afectación de hábitats acuáticos y ribereños, impactando la reproducción y alimentación de especies.

Durante la fase de operación:

- Modificación de patrones de escorrentía superficial por compactación del suelo y obras lineales.
- Posible generación de residuos sólidos y sustancias contaminantes durante actividades de mantenimiento.
- Alteración de la fauna acuática debido al ruido, vibraciones y la interacción con estructuras hidráulicas.
- Funciones ecológicas y socioambientales del sistema hídrico

El sistema hídrico no solo cumple funciones ecológicas, sino también socioeconómicas de gran importancia:

- **Regulación del ciclo hidrológico:** contribuye a la estabilidad del sistema ambiental y al control de eventos extremos como inundaciones y sequías.
- **Sustento de biodiversidad:** provee condiciones necesarias para la supervivencia de múltiples especies.
- **Apoyo a actividades productivas:** el agua es un recurso esencial para la agricultura, la industria y el consumo humano.

- **Contribución a la sostenibilidad y descarbonización**

El desarrollo del corredor ferroviario representa una alternativa sostenible al transporte de carga por carretera, lo que permite reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica. Esta transición contribuye indirectamente a la protección de los sistemas hídricos, al disminuir la erosión, la sedimentación y la contaminación asociada al transporte terrestre.

- **Descripción de cartografía**

Se presenta un mapa temático que permite visualizar la distribución espacial de los cuerpos de agua presentes en el área de estudio, incluyendo ríos, quebradas, canales de drenaje y humedales. Este mapa también identifica las zonas críticas de interacción entre la infraestructura ferroviaria y los cuerpos de agua, facilitando la identificación de puntos de cruce, áreas sensibles y sectores que requieren medidas especiales de manejo ambiental.

- **Cobertura vegetal**

El componente biótico del área de estudio permite identificar las características ecológicas del territorio, considerando la cobertura vegetal y la conectividad entre ecosistemas. Este análisis es clave para evaluar posibles impactos ambientales del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira y la necesidad de implementar medidas de manejo y conservación que garanticen la sostenibilidad ambiental del corredor.

El corredor ferroviario Yumbo–Palmira atraviesa un mosaico de cobertura vegetal que combina fragmentos de ecosistemas naturales, vegetación ribereña y áreas agrícolas, generando una estructura heterogénea con gran importancia ecológica y

ambiental. Esta cobertura cumple funciones esenciales de conectividad ecológica, regulación del microclima, protección de suelos y mantenimiento de hábitats para la fauna terrestre y acuática.

En el área de estudio predominan coberturas vegetales asociadas a actividades antrópicas, especialmente cultivos agrícolas, dentro de los cuales destaca la caña de azúcar como uso dominante en el Valle del Cauca. También se identifican pastos para ganadería, zonas urbanas e industriales, así como vegetación secundaria y fragmentos de bosque natural, principalmente asociados a rondas hídricas y áreas de difícil acceso.

- **Componentes principales**

- **Vegetación ribereña:** presente a lo largo de ríos y quebradas, estos corredores verdes actúan como elementos fundamentales del paisaje, contribuyendo a la protección de márgenes, control de erosión y filtrado de sedimentos hacia los cuerpos de agua.
- **Fragmentos de bosque:** áreas dispersas de vegetación secundaria y relictos de bosque natural que se mantienen en zonas no intervenidas. Aunque de tamaño reducido, son importantes para la regulación de procesos ecológicos y el equilibrio ambiental.
- **Áreas agrícolas con cobertura parcial:** si bien predominan cultivos extensivos, muchas parcelas conservan franjas verdes o cercos vegetales que funcionan como corredores auxiliares y contribuyen a la estabilidad del ecosistema.

- **Funciones ecológicas**

- **Conectividad ecológica:** permite el flujo entre diferentes ecosistemas, reduciendo la fragmentación del paisaje.
- **Regulación micro climática:** contribuye a mantener condiciones de temperatura, humedad y viento más estables.
- **Protección de suelos y control de erosión:** la cobertura vegetal estabiliza los suelos, especialmente en márgenes de cuerpos de agua.
- **Mantenimiento de procesos ecológicos:** favorece la dinámica natural del territorio y la interacción entre sus componentes.

- **Interacción con el corredor ferroviario**

La cobertura vegetal existente implica la identificación de zonas sensibles a lo largo del trazado ferroviario, especialmente en áreas donde la infraestructura pueda interferir con corredores naturales o fragmentos de vegetación. En este sentido, el diseño del proyecto debe considerar:

- La preservación de vegetación ribereña en ríos y quebradas.
- La continuidad de los fragmentos de bosque mediante soluciones que eviten su fragmentación.
- La integración de franjas vegetales en zonas agrícolas para reducir impactos ambientales.
- Conectividad ecológica

La conectividad ecológica en el área de estudio se encuentra parcialmente limitada debido a la fragmentación del paisaje generada por la expansión agrícola, urbana e industrial. No obstante, existen corredores ecológicos naturales asociados a ríos, quebradas y franjas de vegetación riparia que permiten el mantenimiento de la continuidad ecológica.

Estos elementos cumplen un papel fundamental en la estructura del paisaje, por lo que su conservación es clave dentro del desarrollo del proyecto ferroviario. La implementación de estrategias de integración ambiental contribuye a mantener la funcionalidad de estos corredores y a reducir la fragmentación del territorio.

- **Calidad ambiental actual**

En la zona de estudio del corredor Yumbo–Palmira, el transporte carretero predominante genera impactos ambientales significativos, tanto para los ecosistemas como para la población local. La evaluación preliminar permite identificar las principales afectaciones y justificar la implementación del sistema ferroviario como una alternativa sostenible:

- **Emisiones de gases contaminantes y cambio climático**

El transporte por carretera, principalmente camiones de carga y vehículos comerciales, es responsable de altas emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀).

Estas emisiones contribuyen al cambio climático, afectan la calidad del aire en zonas urbanas y rurales, y generan riesgos para la salud humana y la fauna local. La concentración de emisiones es más elevada en áreas urbanas e industriales,

especialmente en Yumbo y Palmira, donde el tráfico pesado provoca acumulación de contaminantes atmosféricos.

En términos generales, el transporte carretero genera:

- Altas emisiones de CO₂, NO_x y material particulado
- Contaminación del aire en zonas urbanas y rurales
- Incremento de gases de efecto invernadero
- Contaminación acústica

El ruido constante de vehículos pesados altera el comportamiento de especies animales sensibles y afecta la calidad de vida de las comunidades cercanas.

La fragmentación de hábitats y la proximidad de la carretera a zonas agrícolas y residenciales agravan el impacto acústico, generando perturbaciones continuas.

En este sentido, el transporte carretero genera:

- Contaminación acústica constante
- Vibraciones que afectan tanto a ecosistemas como a infraestructura cercana
- Alteración de suelos y cuerpos de agua

El tránsito vehicular produce polvo y material particulado que se deposita sobre suelos y cuerpos de agua, afectando su calidad y funcionalidad. Asimismo, la erosión generada por el tráfico constante y el arrastre de sedimentos impacta negativamente los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Adicionalmente, posibles derrames de combustibles y aceites provenientes de los vehículos contribuyen a la contaminación de ríos, quebradas y humedales, alterando sus condiciones naturales.

De manera general, el transporte carretero implica:

- Erosión de suelos
- Contaminación de suelos y cuerpos de agua
- Alteración de la calidad hídrica
- Arrastre de sedimentos hacia ecosistemas acuáticos
- Fragmentación de ecosistemas

Las carreteras existentes contribuyen a la fragmentación de los ecosistemas, dificultando el desplazamiento de elementos del territorio como corredores de vegetación ribereña, fragmentos de bosque y franjas verdes en áreas agrícolas.

Esta fragmentación interrumpe la continuidad ecológica del paisaje, limitando la conexión entre áreas naturales y afectando la funcionalidad de los ecosistemas presentes en la zona de estudio.

En este contexto, el transporte carretero genera:

- Fragmentación de ecosistemas
- Interrupción de corredores ecológicos
- Aislamiento de coberturas vegetales
- Beneficios ambientales del sistema ferroviario propuesto
- **Reducción de emisiones contaminantes:**

El transporte ferroviario permite movilizar grandes volúmenes de carga con menor consumo energético, reduciendo las emisiones de CO₂ y otros contaminantes por tonelada transportada.

- **Disminución de la contaminación acústica:**

Los trenes generan menos ruido y vibraciones en comparación con el transporte de carga por carretera.

- **Protección de suelos y cuerpos de agua:**

Al concentrar el transporte en una infraestructura lineal controlada, se reducen los procesos de erosión, sedimentación y contaminación asociados al tráfico vehicular.

- **Preservación de corredores ecológicos:**

El trazado ferroviario permite integrar soluciones como pasos de fauna y corredores verdes, favoreciendo la conectividad ecológica del territorio.

- **Coexistencia con actividades productivas:**

La reducción del tráfico pesado en carreteras disminuye impactos sobre áreas agrícolas e industriales, mejorando la calidad ambiental del entorno.

- **Conclusión**

El transporte carretero actual en el corredor Yumbo–Palmira genera impactos significativos sobre el aire, el suelo, el ruido y la estructura de los ecosistemas, incluyendo emisiones elevadas de CO₂, NO_x y material particulado, contaminación acústica, erosión y contaminación de suelos y agua, así como fragmentación de los ecosistemas.

La implementación del sistema ferroviario no solo representa una solución logística eficiente, sino también una estrategia ambientalmente responsable. Con un diseño planificado y medidas de mitigación adecuadas, el ferrocarril puede reducir la presión sobre el medio ambiente, proteger ecosistemas sensibles y contribuir al desarrollo sostenible de la región.

- **Fauna y biodiversidad: afectación, especies y medidas**

El corredor ferroviario Yumbo–Palmira atraviesa una región altamente intervenida por actividades urbanas, industriales y agrícolas. Sin embargo, el territorio aún conserva fragmentos de vegetación natural y corredores ecológicos que permiten la presencia y desplazamiento de diversas especies de fauna. Estos elementos del paisaje cumplen funciones esenciales para el mantenimiento de la biodiversidad local, por lo que la interacción del proyecto con estos ecosistemas requiere un análisis integral de sus posibles afectaciones y la definición de medidas de manejo y conservación.

- **Especies de fauna identificadas**

En el área de influencia del proyecto se identifican, con base en información secundaria y observaciones regionales, diferentes grupos de fauna representativos de ecosistemas intervenidos y fragmentados:

➤ **Mamíferos**

Tabla 11. Mamíferos

Zorro perro (<i>Cerdocyon thous</i>):	especie adaptable a bordes de bosque y áreas agrícolas, con un rol importante como depredador de pequeños vertebrados.
Armadillo (<i>Dasypus novemcinctus</i>):	especie adaptable a bordes de bosque y áreas agrícolas, con un rol importante como depredador de pequeños vertebrados.
Conejo silvestre (<i>Sylvilagus brasiliensis</i>):	asociado a áreas abiertas y franjas de vegetación, común en zonas agrícolas y bordes de ecosistemas.
Tigrillo (<i>Leopardus tigrinus</i>):	especie asociada a fragmentos de bosque bien conservados, sensible a la perturbación y al ruido.

Fuente: Elaboración propia

➤ **Aves**

Tabla 12. Aves

Guacharaca (<i>Ortalis columbiana</i>) y colibríes (familia <i>Trochilidae</i>):	Importantes en procesos de polinización y dispersión de semillas.
Búhos y lechuzas:	reguladores naturales de poblaciones de pequeños vertebrados.
Garzas:	asociadas a cuerpos de agua, zonas húmedas y humedales, sensibles a alteraciones en el hábitat.

Fuente: Elaboración propia

➤ Reptiles y anfibios

Tabla 13. Reptiles y anfibios

Iguana (<i>Iguana iguana</i>) y serpientes no venenosas:	Comunes en zonas ribereñas y áreas con cobertura vegetal.
Ranas y sapos:	Indicadores de la calidad ambiental, particularmente sensibles a cambios en humedad, temperatura y contaminación.

Fuente: Elaboración propia

➤ Fauna acuática

- Peces nativos, macroinvertebrados e insectos acuáticos presentes en ríos, quebradas y canales de drenaje.
- Estos organismos dependen directamente de la calidad del agua y de la continuidad de los ecosistemas acuáticos.

● Afectaciones sobre la fauna y la biodiversidad

El desarrollo de infraestructura y el predominio del transporte carretero en la zona generan diversas afectaciones sobre la fauna, entre las que se destacan:

Tabla 14. Afectaciones sobre la fauna y la biodiversidad

Fragmentación del hábitat:	la infraestructura vial y urbana divide los ecosistemas, limitando el desplazamiento natural de las especies.
Desplazamiento de fauna:	la pérdida y alteración de hábitats obliga a las especies a migrar hacia zonas menos perturbadas
Mortalidad por atropellamiento:	el tránsito vehicular representa un riesgo significativo para la fauna terrestre, especialmente en zonas de cruce de corredores ecológicos.
Alteración de corredores ecológicos:	la interrupción de franjas de vegetación ribereña y fragmentos de bosque afecta la conectividad del territorio.
Alteración de corredores ecológicos:	la interrupción de franjas de vegetación ribereña y fragmentos de bosque afecta la conectividad del territorio.
Alteraciones en fauna acuática:	la contaminación y sedimentación de cuerpos de agua afectan directamente la fauna asociada a estos ecosistemas.

Fuente: Elaboración propia

- **Medidas de conservación propuestas**

Con el fin de mitigar los impactos identificados y promover la conservación de la biodiversidad, se proponen las siguientes medidas:

Tabla 15. Medidas de conservación propuestas

MEDIDA	PROPUESTA
Implementación de pasos de fauna:	estructuras diseñadas para permitir el cruce seguro de especies y reducir la mortalidad por atropellamiento.
Restauración ecológica:	recuperación de áreas degradadas mediante la siembra de especies nativas y la rehabilitación de corredores de vegetación.
Monitoreo ambiental:	seguimiento continuo de las poblaciones de fauna y del estado de los ecosistemas para evaluar el comportamiento de la biodiversidad frente al proyecto.
Control de ruido:	implementación de medidas para reducir la contaminación acústica y minimizar la perturbación sobre la fauna.
Protección de corredores ecológicos:	conservación de franjas de vegetación ribereña y fragmentos de bosque que garanticen la conectividad ecológica.

Fuente: Elaboración propia

- **Prioridad en la conservación**

Se prioriza la conservación de los corredores ecológicos presentes en el área de estudio, especialmente aquellos asociados a ríos, quebradas y fragmentos de vegetación natural. Estos elementos son fundamentales para mantener la conectividad entre ecosistemas, asegurar el flujo de especies y preservar la funcionalidad ecológica del territorio.

El diseño e implementación del proyecto ferroviario debe integrar criterios de sostenibilidad ambiental que permitan reducir los impactos sobre la fauna y fortalecer la conectividad ecológica en el corredor Yumbo–Palmira.

2. Identificación de impactos ambientales

En el análisis del área de estudio del corredor Yumbo–Palmira, se identificaron diversos impactos ambientales asociados principalmente al desarrollo de actividades de transporte carretero y a la alta intervención antrópica del territorio. Estos impactos afectan de manera directa e indirecta los componentes físicos, bióticos y sociales, alterando el equilibrio natural del entorno y generando presiones sobre los recursos naturales.

La evaluación de estos impactos permite comprender las dinámicas del territorio y establecer lineamientos para la implementación de medidas de manejo ambiental en el marco del desarrollo del proyecto ferroviario.

- **Impactos sobre el suelo**

El suelo es uno de los componentes más afectados por las actividades de transporte y la expansión de infraestructura. Entre los principales impactos se destacan:

- **Erosión:** provocada por la remoción de la cobertura vegetal y la exposición del suelo a la acción del viento y el agua. El tránsito constante de vehículos, especialmente en zonas sin adecuada estabilización, acelera los procesos erosivos.
- **Compactación:** generada por la circulación de vehículos pesados, lo que reduce la porosidad del suelo, disminuye la infiltración de agua y afecta su capacidad de soporte y fertilidad.
- **Pérdida de la estructura del suelo:** como consecuencia de la presión mecánica y la alteración de sus propiedades físicas, lo que impacta su funcionalidad ecológica y productiva.

- **Impactos sobre el recurso hídrico**

Los cuerpos de agua presentes en el área de estudio se ven afectados por diversas actividades antrópicas, principalmente asociadas al transporte y al desarrollo urbano-industrial:

Tabla 16. Impactos sobre el recurso hídrico

Contaminación de cuerpos de agua:	ocasionada por el arrastre de sedimentos, residuos sólidos, aceites y combustibles provenientes del tráfico vehicular y de actividades asociadas.
Alteración del flujo hídrico:	debido a la construcción de infraestructura que modifica la escorrentía natural, así como la canalización o desviación de cauces.
Incremento de la sedimentación:	que afecta la calidad del agua, reduce la profundidad de los cuerpos hídricos y altera sus condiciones ecológicas.
Disminución de la calidad del recurso hídrico:	impactando su disponibilidad para usos agrícolas, industriales y de consumo humano.

Fuente: Elaboración propia

- **Impactos sobre el aire**

La calidad del aire en el área de estudio se ve afectada principalmente por las emisiones generadas por el transporte carretero y las actividades industriales:

Tabla 17. Impactos sobre el aire

Tipo de impacto	Descripción	Efectos principales
-----------------	-------------	---------------------

Emisiones de gases contaminantes	Emisión de CO ₂ , óxidos de nitrógeno (NO _x) y otros compuestos derivados de la combustión de combustibles fósiles.	Contribución al efecto invernadero y al cambio climático.
Material particulado (PM2.5 y PM10)	Generado por la combustión de motores, desgaste de neumáticos y levantamiento de polvo.	Deterioro de la calidad del aire y afectación a la visibilidad.
Afectaciones a la salud y al entorno	Incremento de contaminantes atmosféricos en el área de influencia del proyecto.	Problemas respiratorios en la población y afectación a la vegetación.

Fuente: Elaboración propia

- **Impactos sobre la flora y fauna**

Los ecosistemas presentes en el área de influencia del proyecto se ven afectados por la transformación del uso del suelo y la presencia de infraestructura lineal:

Tabla 18. Impactos sobre la flora y fauna

Tipo de impacto	Descripción	Efectos principales
Pérdida de hábitat	Sustitución de coberturas vegetales naturales por infraestructura, áreas urbanas o agrícolas intensivas.	Reducción de espacios disponibles para la fauna y flora, disminución de la biodiversidad.
Fragmentación de ecosistemas	Interrupción de la continuidad de los hábitats naturales.	Limitación del movimiento de las especies y afectación de la conectividad ecológica.
Alteración de corredores ecológicos	Intervención en zonas de vegetación ribereña y fragmentos de bosque.	Disminución de la movilidad de la fauna y afectación del flujo genético.
Afectación de procesos ecológicos	Alteración de funciones naturales del ecosistema.	Impacto en la polinización, dispersión de semillas y regulación de poblaciones.

Fuente: Elaboración propia

- **Impactos sobre el entorno social**

El componente social también se ve afectado por los impactos derivados del transporte carretero y la dinámica territorial:

Tabla 19. Impactos sobre el entorno social

Tipo de impacto	Descripción	Efectos principales
Contaminación acústica	Ruido constante generado por vehículos pesados en zonas cercanas al proyecto.	Estrés, alteraciones del sueño y afectaciones en la salud de la población.
Afectaciones urbanas	Incremento de la congestión vehicular y presión sobre la infraestructura y servicios urbanos.	Deterioro de vías, reducción en la calidad del servicio y movilidad.

Interferencia con actividades productivas	Impacto del polvo, ruido y vibraciones en zonas agrícolas.	Disminución en la productividad y afectación de cultivos.
Deterioro del entorno paisajístico	Presencia de infraestructura y tráfico intenso en el área.	Alteración de la percepción visual y reducción de la calidad del entorno.

Fuente: Elaboración propia

Los impactos ambientales identificados en el área de estudio son en gran medida previsibles y, en su mayoría, mitigables mediante una adecuada planificación y diseño del proyecto. La implementación de estrategias de manejo ambiental permitirá reducir los efectos negativos sobre los componentes físico, biótico y social.

Entre las acciones recomendadas se incluyen la optimización del trazado del proyecto, la incorporación de tecnologías limpias, el control de emisiones, la protección de cuerpos de agua, la restauración de coberturas vegetales y la conservación de corredores ecológicos.

De esta manera, el proyecto puede desarrollarse bajo criterios de sostenibilidad, minimizando su huella ambiental y contribuyendo a la protección de los recursos naturales y al bienestar de las comunidades del área de influencia.

4. Determinantes y restricciones ambientales

En el área de estudio del corredor Yumbo–Palmira se identifican diversos determinantes y restricciones ambientales que condicionan el desarrollo del proyecto, debido a la presencia de elementos naturales estratégicos y a la intensa actividad antrópica del territorio. Estos factores establecen lineamientos obligatorios y condicionantes técnicos, ambientales y normativos que deben ser considerados en la etapa de diseño, construcción y operación del proyecto ferroviario, con el fin de garantizar su viabilidad ambiental y su integración con el entorno.

- **Restricciones por cuerpos de agua**

Los cuerpos de agua constituyen uno de los principales determinantes ambientales del área de estudio. El sistema hídrico está compuesto por el río Cauca como eje principal, junto con quebradas, canales de drenaje y humedales que cumplen funciones de regulación hídrica, soporte ecológico y provisión de servicios ecosistémicos.

Las restricciones asociadas a estos elementos incluyen:

- **Respeto de rondas hídricas y zonas de protección:** se deben mantener franjas de amortiguamiento que eviten la intervención directa sobre los cauces.
- **Restricciones de intervención en zonas inundables:** especialmente en áreas cercanas al río Cauca y sus tributarios.
- **Protección de la calidad del agua:** evitando vertimientos, arrastre de sedimentos y contaminación por aceites o combustibles.
- **Mantenimiento de la conectividad hídrica:** garantizando el flujo natural del sistema y la continuidad de los procesos ecológicos.
- **Control de obras en zonas de recarga hídrica:** evitando afectaciones a la dinámica del recurso.
- **Zonas con alta sensibilidad ecológica**

Se identifican áreas de especial sensibilidad ecológica que requieren un manejo prioritario dentro del proyecto, debido a su importancia para la biodiversidad y los procesos ecosistémicos.

Estas zonas incluyen:

- **Vegetación ribereña:** ecosistemas asociados a ríos y quebradas que funcionan como corredores ecológicos y barreras naturales contra la erosión.
- **Fragmentos de bosque y vegetación secundaria:** relictos de ecosistemas naturales que actúan como refugio de biodiversidad.
- **Áreas de transición ecológica:** zonas donde confluyen diferentes tipos de cobertura vegetal y hábitats.

Las restricciones en estas áreas comprenden:

- Limitación de intervenciones directas y cambios en el uso del suelo.
- Implementación de medidas de conservación y restauración.
- Evitar la fragmentación adicional de los ecosistemas.
- Protección de la funcionalidad ecológica y la estructura del paisaje.

- **Áreas urbanas e industriales**

El corredor atraviesa zonas con alta concentración de actividades urbanas e industriales, especialmente en los municipios de Yumbo y Palmira, lo cual representa un determinante clave para el desarrollo del proyecto.

Las principales restricciones y consideraciones en estas áreas son:

- Compatibilidad con el uso del suelo: el proyecto debe ajustarse a los planes de ordenamiento territorial (POT).
 - Presencia de infraestructura existente: limita las alternativas de trazado y requiere soluciones técnicas específicas.
 - Alta densidad poblacional: necesidad de minimizar impactos sobre comunidades cercanas.
 - Gestión de impactos acumulativos: asociados a ruido, emisiones y tráfico.
 - Seguridad y accesibilidad: garantizar condiciones seguras durante la construcción y operación del proyecto.
- **Fragmentos de vegetación y corredores ecológicos**

Los fragmentos de vegetación natural y los corredores ecológicos son determinantes fundamentales para la conectividad ecológica del territorio. Estos elementos permiten el flujo de especies, el intercambio genético y el mantenimiento de la funcionalidad de los ecosistemas.

Las restricciones asociadas incluyen:

- Conservación de corredores ecológicos existentes: evitando su interrupción o degradación.
 - Protección de franjas de vegetación ribereña: esenciales para la estabilidad ecológica del territorio.
 - Integración de soluciones de conectividad: como pasos de fauna, ecoductos o corredores verdes.
 - Restauración de áreas intervenidas: para recuperar la continuidad del paisaje.
 - Mantenimiento de la cobertura vegetal: especialmente en zonas estratégicas para la biodiversidad.
- **Otras determinantes ambientales relevantes**

Adicionalmente, se identifican otros factores que influyen en el desarrollo del proyecto:

- Condiciones geotécnicas y geomorfológicas: que pueden limitar la estabilidad del terreno y condicionar el diseño de la infraestructura.
- Condiciones climáticas: que influyen en la dinámica de los procesos erosivos, hidrológicos y en la estabilidad de las obras.

- Normativa ambiental vigente: que establece lineamientos y restricciones para la intervención del territorio.
- Presencia de áreas protegidas o estratégicas: que requieren especial atención en términos de conservación.

Las determinantes y restricciones ambientales identificadas en el área de estudio constituyen un marco fundamental para la planificación del proyecto ferroviario. Su adecuada integración en el diseño permite minimizar los impactos ambientales, optimizar el uso del territorio y asegurar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

El trazado debe desarrollarse bajo criterios de precaución y sostenibilidad, priorizando la protección de los recursos hídricos, la conservación de los ecosistemas sensibles, el respeto por las áreas urbanas e industriales y la preservación de la conectividad ecológica.

De esta manera, el proyecto podrá articularse de forma armónica con el entorno, contribuyendo al desarrollo regional y a la protección del patrimonio ambiental del corredor Yumbo–Palmira.

5. Medidas ambientales preliminares

Teniendo en cuenta que el trazado ferroviario ya existe, las medidas ambientales se enfocan principalmente en la optimización de la operación, el mantenimiento de la infraestructura existente y la reducción de impactos asociados, más que en la modificación del diseño del corredor. En este contexto, se plantean acciones orientadas a prevenir, mitigar y compensar los efectos ambientales derivados de la operación ferroviaria y su interacción con el entorno del corredor Yumbo–Palmira.

Estas medidas se fundamentan en la identificación de componentes sensibles como cuerpos de agua, coberturas vegetales, corredores ecológicos y áreas urbanas e industriales, con el fin de garantizar la sostenibilidad del proyecto y su integración con el territorio.

- **Medidas de prevención**

Las medidas de prevención buscan evitar la generación de nuevos impactos ambientales y reducir los riesgos asociados a la operación y mantenimiento del corredor ferroviario existente.

- **Planificación del mantenimiento del trazado:**

El mantenimiento de la vía férrea debe realizarse bajo criterios ambientales, evitando intervenciones innecesarias sobre áreas sensibles como rondas hídricas, vegetación ribereña y fragmentos de bosque. Se prioriza el uso de técnicas de bajo impacto y la intervención controlada de la infraestructura existente.

- **Identificación de zonas sensibles:**

Se debe mantener una identificación actualizada de áreas con alta sensibilidad ecológica, incluyendo cuerpos de agua, corredores ecológicos y zonas con presencia de cobertura vegetal relevante, con el fin de evitar afectaciones durante labores de mantenimiento o adecuación.

- **Protección de cuerpos de agua:**

Implementación de medidas para prevenir la contaminación y alteración de ríos, quebradas y canales de drenaje, evitando vertimientos y controlando el manejo de materiales en zonas cercanas al recurso hídrico.

- **Preservación de corredores ecológicos:**

Garantizar la continuidad de las franjas de vegetación existentes, especialmente en zonas ribereñas, evitando su degradación y fortaleciendo su función como conectores ecológicos.

- **Medidas de mitigación**

Las medidas de mitigación están orientadas a reducir los impactos generados por la operación ferroviaria, considerando que la infraestructura ya se encuentra establecida.

- **Barreras acústicas:**

Instalación de barreras en puntos estratégicos del corredor para reducir la propagación del ruido hacia zonas urbanas, rurales y áreas ecológicamente sensibles.

- **Control de ruido y vibraciones:**

Implementación de tecnologías de mantenimiento de rieles y rodaduras, así como regulación de velocidades en zonas críticas, con el fin de disminuir la afectación sobre la fauna y las comunidades cercanas.

- **Control de polvo y material particulado:**

Medidas como la limpieza de la vía, el control de materiales en zonas de carga y descarga, y el mantenimiento de superficies para evitar la generación de partículas en suspensión.

- **Manejo de residuos:**

Gestión adecuada de residuos sólidos y líquidos generados durante las actividades de mantenimiento, asegurando su recolección, almacenamiento y disposición conforme a la normativa ambiental vigente.

- **Protección de suelos:**

Control de procesos de erosión mediante obras de estabilización en zonas vulnerables y mantenimiento de la cobertura vegetal en áreas adyacentes al corredor.

- **Gestión ambiental del recurso hídrico:**

Implementación de sistemas de drenaje adecuados y control de escorrentías para evitar la contaminación de cuerpos de agua cercanos.

- **Medidas de compensación**

Las medidas de compensación se orientan a restaurar y recuperar las áreas afectadas por la operación del corredor ferroviario, especialmente en zonas donde no es posible evitar completamente los impactos.

- **Reforestación:** Establecimiento de programas de siembra de especies nativas en áreas aledañas al corredor, con el fin de recuperar la cobertura vegetal, mejorar la conectividad ecológica y contribuir a la captura de carbono.
- **Restauración ecológica:** Recuperación de áreas degradadas mediante la rehabilitación de su estructura y funcionalidad ecológica, especialmente en zonas de influencia del corredor ferroviario.
- **Fortalecimiento de corredores ecológicos:** Implementación de franjas de vegetación que conecten fragmentos de hábitat, mejorando la conectividad ecológica del territorio.

- **Compensación ambiental:** Aplicación de medidas equivalentes para compensar la afectación sobre la cobertura vegetal o ecosistemas intervenidos, conforme a la normativa ambiental vigente.
- **Enfoque integral de las medidas ambientales**

Dado que el trazado ferroviario ya existe, las medidas ambientales se centran en la gestión sostenible de la infraestructura, priorizando la reducción de impactos durante su operación y mantenimiento. La correcta implementación de estas acciones permite minimizar los efectos sobre los componentes físicos, bióticos y sociales del entorno.

El fortalecimiento de los corredores ecológicos, la protección de los cuerpos de agua y la adecuada gestión de emisiones y residuos son elementos clave para garantizar la sostenibilidad del proyecto.

Asimismo, el monitoreo ambiental continuo permite evaluar la efectividad de las medidas implementadas y realizar ajustes oportunos, asegurando el cumplimiento de los objetivos ambientales a lo largo del tiempo.

Finalmente, la participación comunitaria y la educación ambiental contribuyen al uso responsable del territorio, promoviendo la apropiación social del proyecto y el compromiso con la conservación del entorno natural.

6. Construcciones para prevenir impactos ambientales

Con el fin de reducir los efectos negativos sobre los ecosistemas y la biodiversidad del corredor Yumbo–Palmira, y teniendo en cuenta que el trazado ferroviario ya existe, se incorporan soluciones de ingeniería ambiental orientadas a mejorar la interacción entre la infraestructura y el entorno. Estas intervenciones no modifican de manera significativa la traza existente, sino que optimizan su operación mediante la implementación de estructuras que permiten mantener la conectividad ecológica, proteger los cuerpos de agua y reducir las perturbaciones sobre el medio ambiente.

Estas construcciones buscan garantizar la sostenibilidad del sistema ferroviario, disminuyendo impactos como la fragmentación de hábitats, el atropellamiento de fauna, la alteración de flujos hídricos, el ruido y la generación de polvo, al tiempo que se promueve la conservación de los ecosistemas presentes en la zona de influencia.

- **Pasos de fauna (superiores e inferiores)**

Los pasos de fauna constituyen una de las principales medidas para mantener la conectividad ecológica a lo largo del corredor ferroviario existente. Su implementación permite el desplazamiento seguro de especies terrestres, reduciendo significativamente el riesgo de atropellamiento.

Los pasos superiores (ecoductos o puentes verdes) se diseñan como estructuras elevadas que conectan hábitats fragmentados, incorporando vegetación nativa que simula el entorno natural. Esto facilita el tránsito de mamíferos, aves y reptiles, reduciendo el estrés y promoviendo el uso natural del paso.

Por su parte, los pasos inferiores (túneles o alcantarillas adaptadas) permiten el tránsito de fauna de menor tamaño y fauna acuática. Estos elementos se ubican estratégicamente en función de corredores naturales y rutas de desplazamiento identificadas previamente, garantizando la continuidad ecológica entre fragmentos de vegetación ribereña, bosques secundarios y zonas agrícolas.

La correcta ubicación y diseño de estos pasos es fundamental para asegurar su efectividad, integrándolos con vallados que dirigen el movimiento de la fauna hacia estos puntos de cruce.

- **Cercas o vallados**

Las cercas o vallados son estructuras complementarias que actúan como barreras físicas a lo largo del corredor ferroviario existente. Su principal función es evitar el ingreso de fauna a la vía férrea, reduciendo el riesgo de accidentes y atropellamientos.

Estas estructuras no solo protegen a la fauna, sino que también cumplen una función orientadora, guiando a los animales hacia los pasos de fauna previamente establecidos. De esta manera, se asegura que los desplazamientos se realicen de forma controlada y segura.

El diseño de los vallados se adapta a las condiciones del terreno, la vegetación y las especies presentes, garantizando su efectividad sin generar impactos adicionales sobre el paisaje o los procesos ecológicos. Asimismo, se busca mantener su integración visual con el entorno, reduciendo su impacto paisajístico.

- **Obras hidráulicas ecológicas**

Las obras hidráulicas ecológicas son fundamentales para la adecuada gestión del recurso hídrico en el corredor ferroviario existente. Incluyen estructuras como

alcantarillas, box culverts y drenajes adaptados, diseñados para mantener la continuidad del flujo natural del agua en ríos, quebradas y humedales.

Estas estructuras permiten evitar la alteración de los cauces, reduciendo problemas como la sedimentación, la erosión y la interrupción de los ciclos hidrológicos. Además, incorporan elementos como rampas suaves, refugios y franjas internas que facilitan el tránsito de fauna acuática y anfibia.

Su implementación es clave para garantizar que la infraestructura ferroviaria sea compatible con la dinámica natural de los ecosistemas acuáticos y ribereños, evitando impactos negativos sobre la calidad y disponibilidad del agua.

- **Barreras acústicas**

Las barreras acústicas se implementan con el objetivo de reducir el impacto del ruido generado por la operación ferroviaria en el corredor Yumbo–Palmira. Estas estructuras son especialmente importantes en zonas cercanas a asentamientos humanos y áreas ecológicamente sensibles.

El ruido puede afectar el comportamiento de la fauna, alterando sus patrones de alimentación, reproducción y desplazamiento. Por ello, las barreras acústicas contribuyen a disminuir estas perturbaciones, creando condiciones más favorables para la biodiversidad.

Estas barreras pueden integrarse con el paisaje mediante el uso de materiales y soluciones vegetales, como barreras verdes, que no solo reducen el ruido, sino que también aportan valor ecológico al entorno.

- **Restauración ecológica**

La restauración ecológica es una estrategia fundamental para compensar y mitigar los impactos ambientales asociados al corredor ferroviario existente. Esta medida se basa en la reforestación con especies nativas, la recuperación de áreas degradadas y la rehabilitación de corredores ecológicos.

Su objetivo es restablecer la funcionalidad de los ecosistemas, mejorando la conectividad entre fragmentos de vegetación y proporcionando hábitats adecuados para la fauna local. La restauración contribuye además a la estabilización de suelos, la regulación hídrica y la mejora de las condiciones micro climáticas.

Esta medida se complementa con las demás construcciones ambientales, generando un sistema integral en el que los pasos de fauna, obras hidráulicas, vallados y barreras acústicas trabajan de manera conjunta para reducir los impactos del ferrocarril.

En conjunto, estas construcciones permiten compatibilizar la infraestructura ferroviaria existente con la conservación ambiental del corredor Yumbo–Palmira. Su implementación fortalece la sostenibilidad del proyecto al reducir impactos sobre los ecosistemas, mejorar la conectividad ecológica y garantizar la protección de los recursos naturales.

De esta manera, el sistema ferroviario no solo cumple su función de transporte, sino que también se convierte en un elemento que puede integrarse de manera responsable al territorio, contribuyendo al equilibrio entre desarrollo económico y conservación ambiental.

6. Comparación ambiental entre modos de transporte

El análisis ambiental comparativo entre el transporte ferroviario y el transporte por carretera en el corredor Yumbo–Palmira evidencia que el ferrocarril es una alternativa más sostenible. A diferencia del transporte por carretera, que dispersa sus impactos a lo largo de la red vial, el sistema ferroviario concentra el flujo en un corredor definido, facilitando el control y la gestión ambiental.

El transporte ferroviario presenta menores emisiones de contaminantes (CO₂, NO_x y material particulado) por tonelada transportada, debido a su mayor eficiencia en el uso del combustible. Esto contribuye a la reducción del impacto sobre el cambio climático y a la mejora de la calidad del aire.

Además, el ferrocarril es más eficiente energéticamente, ya que puede movilizar grandes volúmenes con menor consumo por unidad, lo que lo convierte en una opción adecuada para corredores logísticos de alta demanda.

En cuanto al impacto ambiental, genera menor contaminación acústica que el tráfico pesado por carretera, reduciendo afectaciones a comunidades y fauna. También contribuye a una menor fragmentación de ecosistemas, al aprovechar corredores existentes y facilitar la implementación de medidas de conectividad ecológica.

Finalmente, el sistema ferroviario ayuda a disminuir la congestión vial y la presión sobre la infraestructura carretera, reduciendo su deterioro y mejorando la seguridad y movilidad en el territorio.

Tabla 20. Impactos ambientales del transporte ferroviario y carretero

Aspecto	Transporte ferroviario	Transporte por carretera
Emisiones de CO₂	Bajas, alta eficiencia por tonelada-km	Altas, debido al uso intensivo de combustibles fósiles
Eficiencia energética	Alta, transporte de grandes volúmenes con menor consumo	Baja, mayor consumo energético por unidad transportada
Contaminación acústica	Menor, impacto reducido sobre comunidades y fauna	Mayor, ruido constante por tráfico vehicular
Fragmentación de ecosistemas	Baja, corredor lineal con medidas de conectividad ecológica	Alta, división de hábitats por la red vial
Sedimentación y erosión	Controlada, menor impacto sobre suelos	Mayor, debido al tránsito constante de vehículos pesados
Congestión vial	Reduce la congestión al concentrar el transporte	Incrementa la congestión, especialmente en zonas urbanas
Interacción con la fauna	Más favorable, permite implementar pasos de fauna	Negativa, alto riesgo de atropellamientos
Sostenibilidad	Alta, menor impacto acumulativo y mayor control ambiental	Baja, mayor impacto ambiental acumulativo

Fuente: Elaboración propia

En síntesis, el transporte ferroviario se consolida como una alternativa ambientalmente más eficiente y sostenible frente al transporte por carretera en el corredor Yumbo–Palmira. Sus ventajas en reducción de emisiones, eficiencia energética, menor contaminación acústica y menor fragmentación de ecosistemas lo posicionan como una opción clave para el desarrollo regional sostenible.

Además, la posibilidad de integrar medidas de ingeniería ambiental como pasos de fauna, barreras acústicas, obras hidráulicas ecológicas y estrategias de restauración, permite que el ferrocarril no solo minimice sus impactos, sino que también contribuya activamente a la conservación del entorno. Por estas razones, el sistema ferroviario se presenta como una solución estratégica para promover un modelo de transporte más responsable, equilibrado y acorde con los objetivos de sostenibilidad ambiental del territorio.

8. Análisis de sostenibilidad y descarbonización

El sistema ferroviario del corredor Yumbo–Palmira constituye una alternativa estratégica para la transición hacia un transporte más sostenible, al combinar eficiencia logística con la reducción de impactos ambientales. Su implementación

permite disminuir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo CO₂, óxidos de nitrógeno y material particulado, que son responsables del calentamiento global y de la contaminación atmosférica en áreas urbanas, industriales y agrícolas del Valle del Cauca.

Ilustración 10. Análisis de sostenibilidad y descarbonización



La eficiencia energética del ferrocarril se refleja en su capacidad de transportar grandes volúmenes de carga y pasajeros por tonelada-kilómetro consumiendo menos energía que el transporte por carretera, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles y contribuye a la descarbonización regional. Esta característica permite que la actividad logística no solo sea más económica, sino también ambientalmente responsable, minimizando la huella ecológica del transporte de mercancías y personas.

Además, el ferrocarril ofrece beneficios indirectos sobre los ecosistemas y la biodiversidad local. Al concentrar el flujo de transporte en un corredor lineal, se reduce la fragmentación de hábitats naturales, la mortalidad de fauna por atropellamiento y la erosión de suelos asociada al tránsito vehicular pesado. Esto permite que especies sensibles, como aves, mamíferos pequeños, anfibios y reptiles, puedan desplazarse a través de corredores ecológicos y franjas verdes sin verse interrumpidas por carreteras saturadas de tráfico.

Otro aspecto clave es la mejora de la calidad del aire y la reducción del ruido. La operación ferroviaria genera niveles de contaminación acústica y vibraciones menores que el transporte por carretera, lo que protege tanto a la fauna local como a las comunidades humanas cercanas. La disminución de partículas contaminantes

y gases nocivos contribuye directamente a la salud pública y a la preservación de ecosistemas acuáticos y terrestres asociados al corredor.

Finalmente, la implementación del ferrocarril fomenta la integración de medidas de sostenibilidad ambiental, como la restauración de vegetación nativa, la creación de pasos de fauna, ecoductos y obras hidráulicas ecológicas, que fortalecen la conectividad ecológica y la resiliencia de los ecosistemas. Por estas razones, el sistema ferroviario se posiciona como un elemento central dentro de un modelo de transporte sostenible, capaz de equilibrar el desarrollo económico con la conservación ambiental, cumpliendo con los objetivos de descarbonización y planificación territorial responsable en el Valle del Cauca.

- **Reducción de emisiones y eficiencia energética**

El ferrocarril del corredor Yumbo–Palmira se destaca por su alta eficiencia energética, ya que permite transportar grandes volúmenes de carga y pasajeros utilizando significativamente menos energía por tonelada-kilómetro en comparación con el transporte por carretera. Esta característica no solo reduce el consumo de combustibles fósiles, sino que también minimiza la liberación de gases contaminantes como CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas (PM2.5 y PM10), que son los principales responsables del efecto invernadero, la contaminación atmosférica y los impactos sobre la salud humana y la fauna local.

La eficiencia del ferrocarril se explica por su capacidad de movilizar grandes cargas de manera concentrada. Mientras que un tren puede transportar cientos de toneladas en un solo viaje, el transporte por carretera requiere múltiples camiones, aumentando el consumo de combustible y las emisiones por cada tonelada transportada. Esta reducción en la intensidad energética se traduce en una huella de carbono significativamente menor, lo que aporta de manera directa a los objetivos de descarbonización regional y a la mitigación del cambio climático.

Además, la menor emisión de partículas y contaminantes favorece la calidad del aire en áreas urbanas e industriales, reduciendo riesgos respiratorios y promoviendo un entorno más saludable para la población. Esta ventaja es particularmente relevante en zonas densamente pobladas como Yumbo y Palmira, donde el tráfico pesado de camiones contribuye a niveles elevados de contaminación y acumulación de material particulado, afectando la vida cotidiana y los ecosistemas locales.

Otro aspecto relevante es la reducción de la energía consumida por unidad transportada, que convierte al ferrocarril en una opción más sostenible y económica

a largo plazo. Esta eficiencia energética permite disminuir los costos asociados al transporte y, simultáneamente, promover un modelo de movilidad compatible con los objetivos de sostenibilidad, preservación ambiental y planificación territorial responsable.

En conjunto, el transporte ferroviario representa una estrategia integral de reducción de emisiones y eficiencia energética, al combinar capacidad de carga, menor consumo de combustibles fósiles y menor contaminación, lo que lo convierte en un elemento central para la transición hacia un sistema de transporte más sostenible en el Valle del Cauca.

Tabla 21. Reducción de emisiones y eficiencia energética

Indicador	Ferrocarril	Transporte por carretera
CO ₂ (tonelada-km)	Bajo	Alto
Consumo de combustible	Bajo	Alto
Emisión de NO _x	Reducida	Elevada
Partículas PM2.5/PM10	Baja	Alta
Eficiencia energética	Alta	Media-Baja

Fuente: Elaboración propia

- **Protección de ecosistemas y biodiversidad**

El ferrocarril del corredor Yumbo–Palmira, al concentrar el transporte en un corredor lineal definido, presenta ventajas significativas para la protección de ecosistemas y la conservación de la biodiversidad. A diferencia de las carreteras, que suelen fragmentar extensas áreas naturales y generar múltiples puntos de presión sobre la fauna, la vía férrea permite un trazado controlado y planificado, facilitando la implementación de medidas de mitigación ambiental para reducir los impactos sobre la flora y la fauna local.

Una de las estrategias clave es la conservación y conexión de corredores ecológicos. Los ecoductos y pasos de fauna permiten que especies terrestres, como mamíferos pequeños y medianos, reptiles y anfibios, puedan desplazarse entre fragmentos de bosque o franjas verdes sin riesgo de atropellamiento. Estos pasos contribuyen a mantener la integridad genética de poblaciones animales, garantizando la supervivencia de especies sensibles y la conectividad de los ecosistemas.

Además, las obras hidráulicas ecológicas, como alcantarillas adaptadas y box culverts, facilitan el movimiento de fauna acuática y anfibios, evitando la fragmentación de hábitats ribereños y la alteración de cursos de agua. Estas medidas son fundamentales para la conservación de peces, ranas, sapos e insectos

acuáticos, cuyo ciclo de vida depende de la libre circulación a lo largo de ríos y quebradas.

El trazado ferroviario también permite minimizar la mortalidad directa de aves y mamíferos al evitar la dispersión de transporte pesado en múltiples rutas carreteras. La reducción de ruido, vibraciones y tránsito constante en zonas sensibles ayuda a preservar los patrones de alimentación, reproducción y desplazamiento de la fauna local.

Otro beneficio indirecto es la protección de fragmentos de vegetación y áreas naturales. Al concentrar la infraestructura en un solo corredor, se reduce la necesidad de intervención sobre amplias superficies de terreno, permitiendo la preservación de bosques ribereños, franjas de vegetación secundaria y corredores verdes que son esenciales para la biodiversidad del Valle del Cauca.

En conjunto, el sistema ferroviario no solo optimiza la eficiencia del transporte, sino que también se integra con la conservación ambiental, garantizando que el desarrollo económico y logístico avance en armonía con la protección de ecosistemas y especies locales, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y descarbonización del corredor.

Tabla 22. Protección de ecosistemas y biodiversidad

Impacto ambiental	Ferrocarril	Transporte por carretera
Fragmentación de hábitats	Baja, con corredores verdes	Alta, carreteras dividen ecosistemas
Mortalidad de fauna	Baja, medidas de mitigación	Alta, riesgo constante
Alteración de ecosistemas acuáticos	Controlada	Elevada, erosión y sedimentación
Presión sobre áreas naturales	Moderada	Alta

Fuente: Elaboración propia

- **Calidad del aire y ruido**

El ferrocarril del corredor Yumbo–Palmira contribuye significativamente a la reducción de la contaminación atmosférica y acústica, lo que representa un beneficio directo tanto para la fauna local como para las comunidades humanas cercanas. A diferencia del transporte por carretera, donde los vehículos pesados generan emisiones continuas de CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas suspendidas (PM2.5 y PM10), la operación ferroviaria concentra el transporte en un corredor único y eficiente, reduciendo la dispersión de contaminantes sobre el territorio.

La menor emisión de gases contaminantes tiene efectos positivos sobre la calidad del aire en zonas urbanas, industriales y agrícolas aledañas, disminuyendo riesgos de enfermedades respiratorias en la población y protegiendo los ecosistemas locales de la acidificación y la deposición de partículas. Esto es particularmente relevante en áreas densamente pobladas como Yumbo y Palmira, donde el tráfico pesado por carretera provoca acumulación de contaminantes y deterioro de la calidad ambiental.

En cuanto al ruido y las vibraciones, los trenes producen niveles significativamente menores que los vehículos de carga por carretera. Esta disminución de la contaminación acústica es clave para la protección de especies sensibles, como aves, mamíferos pequeños y medianos, reptiles y anfibios, que pueden alterar sus patrones de alimentación, reproducción o desplazamiento debido a ruidos intensos y continuos. Asimismo, reduce el estrés ambiental sobre la población humana cercana, mejorando la calidad de vida y reduciendo problemas asociados a la exposición prolongada a niveles altos de ruido.

Otro beneficio indirecto es que la menor dispersión de contaminantes y vibraciones facilita la conservación de corredores ecológicos y fragmentos de vegetación. Al proteger estos espacios, se garantiza que los ecosistemas ribereños y bosques secundarios continúen cumpliendo funciones ecológicas esenciales, como la regulación micro climática, la protección de suelos y la preservación de biodiversidad.

En conjunto, la reducción de emisiones y ruido posiciona al ferrocarril como un instrumento de transporte sostenible, capaz de equilibrar la eficiencia logística con la protección ambiental, la salud humana y la preservación de especies sensibles a lo largo del corredor Yumbo–Palmira.

Tabla 23. Calidad del aire y ruido

Aspecto	Ferrocarril	Transporte por carretera
Nivel de ruido	Moderado	Alto
Vibraciones	Bajas	Altas
Calidad del aire	Mejorada	Afectada
Impacto sobre fauna y humanos	Beneficioso	Negativo

Fuente: Elaboración propia

- **Contribución a sostenibilidad y descarbonización**

El ferrocarril del corredor Yumbo–Palmira constituye un elemento clave dentro de un sistema de transporte sostenible, al combinar eficiencia logística con estrategias

de mitigación ambiental que permiten avanzar hacia la descarbonización regional. Su implementación genera múltiples beneficios interrelacionados:

➤ Reducción de emisiones contaminantes y huella de carbono:

La concentración del transporte en un corredor ferroviario optimizado disminuye el número de vehículos de carga en carretera, reduciendo emisiones de CO₂, NO_x y partículas suspendidas. Esto contribuye directamente a la disminución de la huella de carbono del transporte, aportando a los objetivos regionales y nacionales de mitigación del cambio climático.

➤ Disminución del uso de combustibles fósiles y eficiencia energética:

La operación del ferrocarril requiere menos combustible por tonelada-kilómetro transportada en comparación con camiones y vehículos pesados. Esta eficiencia energética reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye el costo ambiental asociado al transporte de mercancías y pasajeros.

➤ Protección de ecosistemas y biodiversidad:

Al concentrar la infraestructura en un solo corredor, el ferrocarril permite preservar fragmentos de vegetación, mantener corredores ecológicos y aplicar medidas de mitigación como ecoductos, pasos de fauna y obras hidráulicas ecológicas. Esto garantiza la conectividad de especies terrestres, aves y fauna acuática, reduciendo la mortalidad directa y los impactos acumulativos sobre los ecosistemas.

➤ Mejora de la calidad del aire y reducción del ruido:

Los trenes generan niveles significativamente menores de contaminación atmosférica y acústica que los vehículos por carretera, protegiendo la salud de las comunidades locales y minimizando el estrés ambiental sobre la fauna sensible.

Estas ventajas hacen del ferrocarril una solución ambientalmente responsable y sostenible, que permite equilibrar desarrollo económico, eficiencia en la movilidad y conservación del entorno natural. Su implementación no solo aporta a la sostenibilidad del transporte, sino que también constituye una estrategia integral para la descarbonización del corredor Yumbo–Palmira, fortaleciendo la resiliencia de los ecosistemas y mejorando la calidad de vida de las poblaciones humanas y animales del área de influencia.

9. Evaluación de viabilidad ambiental preliminar

- **Integración de resultados**

El análisis integral del corredor ferroviario Yumbo–Palmira, considerando que el trazado ya existe, permite enfocar la evaluación en la operación, mantenimiento y mejora del sistema, más que en la apertura de nuevos impactos por ocupación de suelo. Esto reduce significativamente la magnitud de los efectos ambientales, ya que la infraestructura se inserta sobre un corredor previamente intervenido, evitando una expansión adicional sobre ecosistemas naturales.

En este contexto, la viabilidad ambiental del proyecto se fortalece al considerar los siguientes aspectos:

- **Gestión de impactos dentro de un trazado existente:**

Al no requerirse la construcción de un nuevo trazado, los impactos asociados a deforestación, remoción de cobertura vegetal y alteración de suelos se reducen considerablemente. Esto implica que las medidas ambientales se centran principalmente en el control, prevención y mitigación de impactos derivados de la operación, como ruido, vibraciones, emisiones y manejo de residuos.

- **Compatibilidad con la planificación ambiental:**

La planificación ambiental previa permite identificar zonas sensibles dentro del área de influencia del corredor existente, como cuerpos de agua, fragmentos de vegetación, zonas de recarga hídrica y áreas de presencia de fauna. Esto facilita la implementación de medidas de manejo específicas, optimizando la integración del ferrocarril con el entorno.

- **Mantenimiento de corredores ecológicos:**

Aunque el trazado ya está definido, es posible reforzar la conectividad ecológica mediante la implementación de ecoductos, pasos de fauna y obras hidráulicas ecológicas. Estas acciones permiten reducir la fragmentación existente y mejorar la movilidad de especies terrestres, acuáticas y aves, consolidando la funcionalidad ecológica del territorio.

- **Reducción de emisiones y eficiencia energética:**

El sistema ferroviario contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono en comparación con el transporte por carretera. Su alta eficiencia energética permite transportar grandes volúmenes de carga con menor consumo de

combustibles fósiles, lo que se traduce en una disminución de emisiones de CO₂, NO_x y material particulado.

Este aspecto es clave en la estrategia de descarbonización, ya que el ferrocarril actúa como una alternativa de bajo impacto climático dentro del sistema de transporte regional.

- **Compatibilidad ambiental**

El proyecto ferroviario existente es altamente compatible con el entorno natural y urbano del corredor Yumbo–Palmira, siempre que se implementen adecuadamente las medidas ambientales propuestas en las diferentes fases del sistema.

- **Compatibilidad con la biodiversidad y los ecosistemas:**

El ferrocarril, al concentrar el transporte en un solo eje lineal, reduce la fragmentación del territorio en comparación con la red vial. Esto favorece la conservación de ecosistemas y la continuidad de los hábitats.

La implementación de corredores ecológicos, junto con la reforestación de áreas degradadas, contribuye a la recuperación de la cobertura vegetal y al fortalecimiento de la biodiversidad. Estas acciones permiten estabilizar suelos, reducir la erosión y mejorar la calidad del hábitat para múltiples especies.

- **Medidas de mitigación ambiental:**

Dentro del trazado existente, las medidas de mitigación son fundamentales para reducir impactos operativos:

- **Barreras acústicas:** Disminuyen la propagación del ruido generado por el paso de trenes, protegiendo tanto a la fauna como a las comunidades humanas.
- **Control de polvo:** Mediante riego de vías y estabilización de taludes, se reduce la emisión de material particulado.
- **Manejo de residuos:** La correcta gestión de residuos sólidos y peligrosos evita la contaminación de suelos y cuerpos de agua.

Estas medidas permiten mantener condiciones ambientales adecuadas en zonas urbanas e industriales cercanas al corredor.

- **Protección de zonas sensibles:**

La identificación de zonas sensibles dentro del área de influencia permite priorizar acciones de conservación. Aunque el trazado ya existe, es posible implementar restricciones operativas o medidas adicionales en áreas críticas, como zonas de alta biodiversidad o cuerpos de agua estratégicos.

- **Restauración ecológica y compensación:**

Las medidas de compensación juegan un papel clave en la sostenibilidad del proyecto:

- **Reforestación con especies nativas:** Permite recuperar áreas degradadas y fortalecer los ecosistemas locales.
- **Restauración ecológica:** Facilita la recuperación de funciones ecológicas como la regulación hídrica, la captura de carbono y la provisión de hábitat.

Estas acciones contribuyen a equilibrar los impactos residuales del proyecto y a mejorar la calidad ambiental del área de influencia.

- **Sostenibilidad y descarbonización**

El ferrocarril del corredor Yumbo–Palmira se posiciona como un eje estratégico dentro del proceso de transición hacia un modelo de transporte sostenible y bajo en carbono.

- **Reducción de huella de carbono:**

El transporte ferroviario presenta una huella de carbono significativamente menor que el transporte por carretera, debido a su mayor capacidad de carga y menor consumo energético por tonelada-kilómetro. Esto permite reducir las emisiones globales del sistema de transporte en la región.

- **Menor consumo de combustibles fósiles:**

El sistema ferroviario requiere menos energía para transportar grandes volúmenes, lo que disminuye la dependencia de combustibles fósiles. Esta eficiencia energética se traduce en beneficios económicos y ambientales a largo plazo.

- **Mejora de la calidad del aire:**

La reducción de emisiones de gases contaminantes y material particulado contribuye directamente a mejorar la calidad del aire en zonas urbanas, industriales

y rurales. Esto tiene impactos positivos en la salud pública y en la conservación de ecosistemas.

- **Protección de ecosistemas:**

Al concentrar el transporte en un solo corredor, se reduce la presión sobre el territorio, evitando la expansión de nuevas vías y minimizando la fragmentación de hábitats. Además, la implementación de pasos de fauna y obras ecológicas fortalece la conectividad biológica.

- **Reducción de ruido y vibraciones:**

El ferrocarril genera menores niveles de ruido y vibraciones en comparación con el transporte por carretera, lo que protege tanto a la fauna como a las comunidades humanas cercanas.

- **Conclusión de sostenibilidad**

El análisis demuestra que el corredor ferroviario Yumbo–Palмира, incluso con un trazado ya existente, es una solución altamente sostenible y viable desde el punto de vista ambiental.

- Contribuye a la reducción de la huella de carbono
- Disminuye el consumo de combustibles fósiles
- Mejora la calidad del aire
- Protege ecosistemas y biodiversidad
- Reduce impactos como ruido y fragmentación

En síntesis, el ferrocarril se consolida como una herramienta clave para la transición hacia un sistema de transporte sostenible, integrando eficiencia logística con conservación ambiental y descarbonización del territorio.

9. Estudio de Impacto Ambiental (EIA)

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) es el instrumento central para garantizar que el corredor ferroviario Yumbo–Palмира se desarrolle de manera sostenible, permitiendo evaluar de forma integral todos los impactos ambientales potenciales generados por la construcción y operación del proyecto. Este estudio no solo identifica los posibles efectos sobre los componentes naturales y sociales del territorio, sino que también establece medidas de mitigación, compensación y

manejo ambiental, asegurando la protección de la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades cercanas.

- **Componentes principales del EIA:**

- **Caracterización ambiental detallada del corredor y áreas de influencia:**

- Incluye la descripción de uso del suelo, cobertura vegetal, ecosistemas acuáticos, fauna y flora, así como la evaluación de la calidad del aire, ruido, agua y suelos.
- Permite establecer la línea base ambiental, que servirá como referencia para medir los cambios y efectos generados por el proyecto.
- Considera también factores socioeconómicos, culturales y urbanos, evaluando la interacción del proyecto con las comunidades locales y las actividades productivas existentes.

- **Identificación de impactos directos, indirectos y acumulativos:**

- Los impactos directos incluyen la alteración de hábitats, pérdida de vegetación, cambio en el flujo de cuerpos de agua y emisiones durante la construcción.
- Los impactos indirectos se refieren a efectos sobre especies que dependen de corredores ecológicos, cambios en patrones de movilidad de fauna y efectos socioeconómicos secundarios.
- Los impactos acumulativos consideran los efectos combinados del proyecto junto con otras infraestructuras y actividades humanas en la región, asegurando una evaluación completa de riesgos y presiones ambientales.

- **Definición de medidas de mitigación y compensación ambiental específicas:**

- Incluye la propuesta de pasos de fauna, ecoductos, barreras acústicas, restauración de corredores verdes y obras hidráulicas ecológicas, entre otras.
- Permite reducir la mortalidad de especies, proteger la conectividad ecológica y minimizar los impactos sobre la calidad del aire, suelo y agua.
- También establece acciones de compensación ambiental, como reforestación con especies nativas y restauración de hábitats críticos.

- **Elaboración de protocolos de monitoreo durante construcción y operación:**

- Establece indicadores ambientales que permitan evaluar la efectividad de las medidas de mitigación implementadas.

- Incluye programas de seguimiento para fauna, calidad del aire, ruido, sedimentación y cuerpos de agua, asegurando la adaptabilidad y corrección de acciones si se detectan desviaciones de la línea base.
- Garantiza la transparencia y responsabilidad ambiental, proporcionando información para la toma de decisiones en tiempo real durante toda la vida útil del proyecto.
- **Importancia del EIA:**

El EIA constituye la herramienta técnica y legal fundamental para el desarrollo del corredor ferroviario, asegurando que todas las decisiones de diseño, construcción y operación estén respaldadas por un análisis ambiental riguroso. Este estudio permite anticipar impactos, proteger la biodiversidad y los recursos naturales, y garantizar que el proyecto cumpla con los objetivos de sostenibilidad y la normativa ambiental colombiana, convirtiéndolo en un pilar estratégico para la planificación de un transporte más limpio y eficiente.

- **Estudios de ruido y vibraciones**

Los estudios de ruido y vibraciones constituyen una herramienta fundamental para evaluar los efectos acústicos y sísmicos generados por la construcción y operación del corredor ferroviario Yumbo–Palmira. Dado que el ferrocarril implica el tránsito constante de trenes de carga y pasajeros, es necesario medir, cuantificar y predecir los niveles de ruido y vibraciones para proteger tanto la biodiversidad como la salud y bienestar de las comunidades humanas cercanas.

- **Áreas de evaluación:**
 - **Fauna terrestre y aves:**
 - El ruido constante puede alterar patrones de alimentación, reproducción, desplazamiento y comunicación.
 - Especies como aves, mamíferos pequeños y anfibios son especialmente sensibles a sonidos de baja y alta frecuencia, así como a vibraciones transmitidas por el suelo.
 - **Reptiles y anfibios:**

Estos grupos dependen de condiciones ambientales estables; las vibraciones del tren pueden generar estrés, alterar la movilidad y afectar la reproducción de especies acuáticas y semiacuáticas.

- **Comunidades humanas y edificaciones:**
 - Se evalúa la perturbación acústica en viviendas cercanas, escuelas, centros de salud y otras instalaciones sensibles.

- Se identifican posibles impactos sobre el bienestar, el sueño, la concentración y la productividad de las personas, así como riesgos estructurales en edificaciones debido a vibraciones prolongadas.

- **Importancia:**

Estos estudios son esenciales para garantizar la sostenibilidad ambiental del proyecto, evitando impactos acumulativos sobre los ecosistemas y mejorando la aceptación social del ferrocarril. La planificación y mitigación basada en estos análisis permite equilibrar la eficiencia logística del transporte con la conservación de la biodiversidad y el bienestar de la población.

- **Estudios hidrológicos y de cuerpos de agua**

Dado que el corredor ferroviario Yumbo–Palmira atraviesa ríos, quebradas, canales de drenaje y humedales menores, la realización de estudios hidrológicos y de cuerpos de agua es fundamental para garantizar la conservación de ecosistemas acuáticos y la funcionalidad de los recursos hídricos durante la construcción y operación del ferrocarril. Estos estudios permiten identificar riesgos, planificar obras hidráulicas adecuadas y asegurar la integración del proyecto con el entorno natural.

- **Áreas de evaluación:**

- **Caudales y régimen hídrico:**

- Monitoreo de caudales promedio y máximos, variaciones estacionales y eventos de lluvia intensa.
- Identificación de zonas susceptibles a inundaciones o erosión por escorrentía, que puedan requerir estabilización de taludes y drenajes especiales.

- **Sedimentación y calidad del agua:**

- Estudio de la cantidad de sedimentos que podrían generarse por movimientos de tierra y obras lineales.
- Evaluación de parámetros de calidad del agua, como turbidez, oxígeno disuelto, pH y presencia de contaminantes.

- **Protección de fauna acuática:**

- Identificación de especies sensibles y hábitats críticos.
- Definición de corredores acuáticos y estructuras que permitan el paso seguro de peces, anfibios y macroinvertebrados, minimizando la fragmentación de ecosistemas.

- **Importancia:**

Estos estudios son esenciales para minimizar riesgos ambientales y garantizar la sostenibilidad del proyecto, protegiendo tanto los ecosistemas acuáticos como las

especies que dependen de ellos. La información obtenida permitirá planificar el trazado del corredor y las obras complementarias de manera que se reduzcan los impactos negativos y se asegure la compatibilidad del ferrocarril con el entorno natural.

Nota para imagen: Mapa temático mostrando ríos, quebradas y humedales a lo largo del corredor, indicando áreas críticas de interacción, ubicaciones de obras hidráulicas ecológicas y corredores para fauna acuática.

- **Monitoreo de fauna y biodiversidad**

El monitoreo de fauna y biodiversidad es un componente esencial para garantizar la sostenibilidad del corredor ferroviario Yumbo–Palmira, permitiendo evaluar de manera continua los efectos del proyecto sobre los ecosistemas y la fauna local. Este seguimiento sistemático no solo mide la respuesta de las especies a las intervenciones, sino que también proporciona información clave para ajustar y optimizar las medidas de mitigación ambiental implementadas.

10. Plan de Manejo Ambiental (PMA)

Los Planes de Manejo Ambiental (PMA) constituyen una herramienta fundamental dentro de la gestión ambiental del corredor ferroviario Yumbo–Palmira, ya que permiten coordinar, controlar y supervisar todas las acciones del proyecto para garantizar que se desarrollen de manera sostenible y compatible con el entorno natural. Su implementación es clave para asegurar que las fases de planificación, construcción y operación no generen impactos irreversibles sobre el aire, el agua, el suelo, la fauna, la flora y la biodiversidad del área de influencia.

El objetivo principal de los PMA es minimizar los impactos negativos y maximizar los beneficios ambientales asociados al proyecto, asegurando que la infraestructura ferroviaria se integre de forma armoniosa con los ecosistemas y las comunidades humanas cercanas. Esto incluye la conservación de corredores ecológicos, la protección de especies sensibles, la reducción de emisiones y contaminación acústica, así como la restauración de áreas afectadas por las obras.

Además, los PMA permiten establecer protocolos claros y sistemáticos para el manejo de residuos sólidos y peligrosos, el control de emisiones, polvo y ruido, la restauración de hábitats y la participación activa de la comunidad. De esta manera, el proyecto no solo cumple con la normativa ambiental colombiana vigente, sino que

también promueve la responsabilidad social y ambiental, fortaleciendo la aceptación del corredor ferroviario y su contribución a un transporte más sostenible y bajo en carbono.

En síntesis, los PMA actúan como un marco estratégico de gestión ambiental, orientando todas las decisiones del proyecto hacia la sostenibilidad, la eficiencia operativa y la protección del patrimonio natural y cultural de la región, garantizando que la operación del ferrocarril Yumbo–Palmira sea compatible con la conservación de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades.

- **Protocolos de manejo y disposición de residuos sólidos y peligrosos**
 - Implementación de procedimientos claros para la recolección, almacenamiento temporal y disposición final de residuos generados en obra y operación del ferrocarril.
 - Clasificación de residuos en orgánicos, reciclables y peligrosos, con rutas de disposición seguras que eviten contaminación de suelos, cuerpos de agua y ecosistemas cercanos.
 - Capacitación del personal en manejo de residuos y medidas de prevención de derrames o liberación accidental de sustancias contaminantes.
 - Monitoreo continuo y registro documental de la gestión de residuos, asegurando cumplimiento con la normativa ambiental colombiana vigente.
 - Uso de tecnologías de tratamiento ambiental para residuos peligrosos, como aceites usados, combustibles y lubricantes, evitando impactos acumulativos en el medio ambiente.
- **Control de emisiones, polvo y ruido**
 - **Emisiones de gases contaminantes:**
 - Monitoreo de CO₂, NO_x, PM2.5 y PM10 generados por maquinaria y locomotoras.
 - Implementación de prácticas de eficiencia energética y mantenimiento preventivo de equipos para reducir emisiones.
 - **Control de polvo:**
 - Aplicación de riego en áreas de tierra suelta y material granular, uso de cubiertas para transporte de materiales y estabilización de suelos para prevenir dispersión de partículas.
 - **Control de ruido y vibraciones:**
 - Medición periódica de niveles de ruido y vibraciones en zonas sensibles, incluyendo áreas residenciales y ecosistemas cercanos.

- Diseño de barreras acústicas, ecoductos y pasos de fauna que minimicen perturbaciones sobre la fauna terrestre y acuática.
- **Reforestación y restauración de hábitats**
 - Identificación de áreas afectadas por la construcción del trazado ferroviario y diseño de estrategias de restauración ecológica.
 - Uso de especies nativas adaptadas a las condiciones locales, para garantizar conectividad ecológica y recuperación de hábitats funcionales.
 - Recuperación de corredores verdes, franjas ribereñas y fragmentos de bosque, asegurando que los animales puedan desplazarse libremente y que los ecosistemas mantengan sus funciones ecológicas.
 - Monitoreo de crecimiento vegetal y supervivencia de especies reforestadas, ajustando las estrategias según el éxito de las intervenciones.
 - Integración con obras de infraestructura ambiental, como pasos de fauna y alcantarillas adaptadas, para maximizar la efectividad de la restauración.
- **Programas de educación ambiental y participación comunitaria**
 - Promoción de conciencia ambiental en comunidades cercanas al corredor ferroviario, explicando los beneficios de la conservación de ecosistemas y el transporte sostenible.
 - Participación activa de la comunidad en actividades de monitoreo de fauna, reforestación y mantenimiento de corredores ecológicos, fomentando un sentido de apropiación y responsabilidad ambiental.
 - Organización de talleres, charlas y campañas educativas en escuelas y centros comunitarios, enfatizando la relación entre transporte ferroviario, biodiversidad y calidad del aire.
 - Establecimiento de canales de comunicación transparentes, permitiendo que la comunidad reporte impactos observados y participe en la mejora continua del proyecto.
- **Integración de los PMA con la operación del ferrocarril**
 - Los PMA no son solo un conjunto de medidas para la construcción, sino un sistema de gestión ambiental continuo, que acompaña la operación del ferrocarril a largo plazo.
 - Permiten evaluar la efectividad de las medidas de mitigación, ajustar protocolos según cambios en la biodiversidad o en la infraestructura, y garantizar la sostenibilidad ambiental del proyecto.
 - Contribuyen a la reducción de la huella ecológica del corredor ferroviario, fomentando la descarbonización, la preservación de la biodiversidad y la mejora de la calidad ambiental para comunidades humanas y ecosistemas.

7.4 RESULTADOS BIM

- **Organización de la información del proyecto**

Como resultado de la aplicación de la metodología BIM, se logró la organización e integración estructurada de la información del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira, consolidando en un entorno digital unificado los datos técnicos, económicos y ambientales obtenidos en las fases previas del estudio.

En primer lugar, se obtuvo una base de datos centralizada, en la cual se integró la información relacionada con la caracterización del corredor, las condiciones físicas del entorno, la estimación de la demanda, los costos de inversión y operación, y las variables ambientales del área de influencia. Esta centralización permitió eliminar la dispersión de información y mejorar la coherencia entre los distintos componentes del proyecto.

Como resultado de este proceso, fue posible establecer una clasificación clara de la información, diferenciando entre:

- Datos geométricos asociados al modelo del corredor ferroviario
- Datos no geométricos relacionados con atributos técnicos, económicos y ambientales

Esta organización facilitó la lectura, manejo y actualización de la información dentro del entorno BIM.

Adicionalmente, se logró la integración efectiva de las tres dimensiones del análisis:

- Técnica, mediante la incorporación del trazado, condiciones del terreno y características del sistema ferroviario
- Económica, a través de la inclusión de costos estimados, inversión inicial y variables de operación
- Ambiental, considerando el uso del suelo, cobertura vegetal, calidad ambiental e impactos potenciales

Esta integración permitió analizar el proyecto de manera articulada, evidenciando la relación entre las distintas variables y su incidencia en la prefactibilidad del sistema.

Asimismo, como resultado de la implementación del enfoque BIM, se obtuvo una mejora en la trazabilidad y consistencia de la información, permitiendo que los datos sean accesibles, actualizables y verificables dentro del modelo digital, reduciendo errores asociados a la gestión tradicional de información fragmentada.

Finalmente, la organización de la información constituyó la base para el desarrollo del modelo BIM conceptual, permitiendo contar con un soporte estructurado para la visualización del proyecto, la simulación de escenarios y el apoyo a la toma de decisiones en la etapa de prefactibilidad.

- **Construcción del modelo BIM**

Como resultado de la implementación de la metodología BIM, se logró la construcción de un modelo digital conceptual del corredor ferroviario Yumbo–Palmira, el cual permitió representar de manera integrada los principales componentes del proyecto dentro de un entorno tridimensional.

En primer lugar, se obtuvo la modelación del corredor ferroviario, en la cual se definió el trazado de la vía férrea considerando las condiciones geométricas y el contexto territorial previamente analizado. Este modelo permitió visualizar de manera clara el recorrido del sistema ferroviario, su localización dentro del área de estudio y su relación con el entorno físico.

Como resultado de esta modelación, fue posible representar elementos fundamentales del sistema, tales como:

- Eje del trazado ferroviario
- Secciones conceptuales de la vía
- Relación con la topografía del terreno
- Conectividad entre los diferentes puntos del corredor

Esto facilitó la comprensión espacial del proyecto y su comportamiento dentro del territorio.

Adicionalmente, se logró la representación de la infraestructura principal asociada al sistema ferroviario, incorporando en el modelo elementos como estaciones, puntos de conexión y obras relevantes de manera conceptual. Esta representación permitió identificar la ubicación estratégica de los componentes del sistema y su interacción con el entorno.

Asimismo, el modelo BIM permitió integrar tanto información geométrica como atributos básicos de los elementos modelados, generando una base digital estructurada que facilita la visualización, análisis y futura ampliación del proyecto en etapas más avanzadas.

Finalmente, la construcción del modelo BIM constituyó un resultado clave para la prefactibilidad del proyecto, ya que permitió mejorar la interpretación del diseño, apoyar la evaluación de alternativas y servir como herramienta base para la

integración de costos, tiempos y variables ambientales en las siguientes fases del análisis.

- **Integración multidimensional (3D, 4D, 5D, 6D)**

La implementación del enfoque BIM permitió consolidar la información del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira en un entorno digital único, integrando de manera coherente las dimensiones geométrica, temporal, económica y ambiental. Esta integración facilitó el análisis global del sistema ferroviario, superando la visión fragmentada tradicional de la prefactibilidad.

En primer lugar, se desarrolló el modelo geométrico tridimensional (3D), mediante el cual se representó el corredor ferroviario con su trazado, alineamiento y relación con el territorio. Este modelo permitió visualizar con mayor claridad la implantación espacial del proyecto, facilitando la identificación de su recorrido, su continuidad y su interacción con la topografía y el uso del suelo existente.

Adicionalmente, se incorporó la dimensión 5D (costos), en la cual se vincularon los elementos del modelo con estimaciones económicas preliminares. Esto permitió asociar componentes como vía férrea, estaciones e infraestructura complementaria con su respectivo impacto financiero, generando una base inicial para la evaluación de la inversión del proyecto.

De igual forma, se integró la dimensión 6D (ambiental), incorporando variables relacionadas con el uso del suelo, cobertura vegetal, áreas de sensibilidad ambiental y posibles impactos generados por la implantación del corredor ferroviario. Esto permitió evaluar de manera más precisa la interacción del proyecto con su entorno natural y territorial.

Aunque la dimensión 4D (tiempo) se manejó de manera conceptual, se estableció una secuencia lógica de desarrollo del proyecto, asociando fases generales de planificación y construcción.

Esta integración multidimensional permitió construir un modelo más robusto, que no solo representa el proyecto en términos físicos, sino que también incorpora sus implicaciones económicas y ambientales, mejorando significativamente el análisis en la etapa de prefactibilidad.

- **Visualización del proyecto**

La aplicación del modelado BIM permitió desarrollar una representación visual integral del proyecto ferroviario, facilitando la comprensión espacial del sistema y su relación con el territorio. Esta visualización se convirtió en una herramienta clave para interpretar el comportamiento del corredor ferroviario dentro del área de estudio.

En primer lugar, se generó la visualización del trazado ferroviario completo, en la cual se evidencia el recorrido del corredor a lo largo del territorio analizado. Esta representación permitió identificar la continuidad del sistema, su orientación y su relación con los principales componentes geográficos del área de influencia.

Adicionalmente, se realizó la identificación y representación de los elementos clave del proyecto, incluyendo estaciones, puntos de conexión, accesos y componentes principales de infraestructura ferroviaria. Esta información permitió comprender la estructura funcional del sistema y su organización dentro del territorio.

La visualización también facilitó la interpretación de condiciones espaciales complejas, como cambios de dirección, proximidad a zonas urbanas y relación con elementos naturales.

En conjunto, esta fase mejoró significativamente la comunicación técnica del proyecto, permitiendo una lectura más clara, intuitiva y estructurada del diseño ferroviario.

- **Análisis de interferencias y puntos críticos**

El análisis del modelo BIM permitió identificar interferencias y puntos críticos que afectan la viabilidad del proyecto ferroviario en su etapa de prefactibilidad, evidenciando restricciones técnicas, ambientales y territoriales que deben ser consideradas en el desarrollo del sistema.

En primer lugar, se identificaron conflictos entre el corredor ferroviario y el entorno existente, especialmente en áreas

En primer lugar, se identificaron conflictos entre el corredor ferroviario y el entorno existente, especialmente en áreas urbanas consolidadas, zonas de expansión agrícola y sectores con presencia de ecosistemas sensibles. Estas interferencias representan posibles limitaciones para el trazado, debido a la necesidad de evitar impactos negativos sobre infraestructura existente y áreas ambientalmente protegidas.

Asimismo, se detectaron restricciones del corredor, asociadas a condiciones topográficas variables, pendientes pronunciadas y cambios geomorfológicos del terreno. Estas condiciones influyen directamente en la definición del trazado óptimo, ya que pueden incrementar la complejidad constructiva y los costos asociados.

También se identificaron restricciones relacionadas con el uso del suelo y la normativa ambiental, lo que implica posibles limitaciones para la intervención en ciertas áreas del corredor.

Estos hallazgos permitieron delimitar zonas críticas dentro del proyecto, facilitando la identificación de áreas de mayor sensibilidad y apoyando la toma de decisiones en la selección de alternativas de trazado.

- **Estimación de cantidades y costos**

La integración del modelo BIM permitió desarrollar una estimación más precisa de cantidades de obra y costos asociados al proyecto ferroviario, mejorando la calidad del análisis económico en la etapa de prefactibilidad.

En primer lugar, se realizó el cálculo automatizado de cantidades, a partir de la información contenida en el modelo digital. Esto permitió estimar volúmenes de movimiento de tierras, longitud de vía férrea, elementos estructurales y componentes complementarios del sistema ferroviario.

Este proceso redujo la dependencia de cálculos manuales y permitió una mayor consistencia en los resultados, al estar directamente vinculados con la geometría del modelo.

Posteriormente, estas cantidades fueron integradas con análisis de precios unitarios, permitiendo construir un presupuesto preliminar del proyecto. Esto facilitó la aproximación al costo total de inversión requerido para la implementación del sistema ferroviario.

Adicionalmente, se logró establecer una relación directa entre los elementos del modelo y sus costos asociados, lo que permitió identificar componentes de mayor impacto económico dentro del proyecto.

Este enfoque permitió disminuir la incertidumbre en la estimación financiera, mejorando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

- **Simulación de escenarios**

El uso del modelo BIM permitió desarrollar simulaciones de diferentes escenarios de trazado del corredor ferroviario, lo que facilitó la evaluación comparativa de alternativas en términos técnicos, económicos y ambientales.

En una primera etapa, se realizó la evaluación de alternativas de diseño, considerando variaciones en el trazado del corredor con el objetivo de analizar su comportamiento frente a restricciones físicas, impactos ambientales y condiciones del terreno.

Estas alternativas permitieron identificar diferentes configuraciones posibles del sistema ferroviario, evaluando su viabilidad en función de su interacción con el territorio.

Posteriormente, se efectuó la comparación de escenarios, analizando variables como longitud del trazado, interferencias con el entorno, complejidad constructiva y costos asociados.

Este análisis permitió evidenciar diferencias significativas entre alternativas, facilitando la identificación de opciones más eficientes y viables desde el punto de vista integral del proyecto.

Las simulaciones realizadas contribuyeron a fortalecer el proceso de planificación, al permitir anticipar posibles impactos y optimizar la selección del trazado.

- **Apoyo a la toma de decisiones**

La implementación del modelo BIM aportó significativamente al proceso de toma de decisiones en el proyecto ferroviario Yumbo–Palmira, al integrar información técnica, económica y ambiental en un único entorno digital estructurado.

Uno de los principales aportes fue la reducción de la incertidumbre, ya que el modelo permitió consolidar información confiable y coherente sobre el comportamiento del proyecto, facilitando una visión más clara de sus implicaciones.

Este enfoque permitió disminuir la fragmentación de la información y mejorar la calidad del análisis en la etapa de prefactibilidad.

Asimismo, se logró una evaluación integral del proyecto, al analizar simultáneamente variables geométricas, económicas y ambientales. Esto permitió identificar riesgos, restricciones y oportunidades de mejora dentro del diseño del sistema ferroviario.

El modelo BIM también facilitó la comparación de alternativas de trazado, lo que fortaleció la selección de opciones más viables y eficientes.

En conjunto, estos resultados permitieron mejorar la base técnica para la toma de decisiones, aportando mayor coherencia, precisión y solidez al proceso de evaluación del proyecto en su fase inicial.

CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto ferroviario Yumbo–Palmira permitió evidenciar la importancia de la planificación de sistemas de transporte masivo como eje estratégico para la integración regional y la mejora de la conectividad logística en el Valle del Cauca. A partir del análisis realizado, se concluye que el corredor presenta condiciones generales de viabilidad técnica, sujetas a la adecuada gestión de restricciones físicas, ambientales y territoriales identificadas en la etapa de prefactibilidad.

Desde el punto de vista técnico, el estudio permitió establecer un trazado preliminar del corredor ferroviario, considerando variables topográficas, de uso del suelo y de conectividad regional. Se determinó que la definición del alineamiento requiere ajustes posteriores de detalle que permitan optimizar la geometría del sistema y reducir interferencias con zonas urbanas y áreas ambientalmente sensibles.

En el componente económico, la estimación de costos preliminares permitió obtener una aproximación inicial de la inversión requerida para la implementación del proyecto. Se concluye que la estructuración de cantidades de obra y su relación con análisis de precios unitarios constituye una base fundamental para la evaluación financiera del sistema, aunque debe ser refinada en etapas posteriores de diseño.

En el aspecto ambiental, se identificaron impactos potenciales asociados a la intervención del corredor ferroviario, especialmente en zonas de cobertura vegetal, cuerpos hídricos y áreas de uso agrícola. Sin embargo, también se concluye que la implementación de un sistema ferroviario puede representar beneficios ambientales a largo plazo, al promover alternativas de transporte con menor huella de carbono frente al transporte carretero.

La implementación de la metodología BIM representó un aporte significativo al desarrollo del proyecto, al permitir la integración de información técnica, económica y ambiental en un único modelo digital. Esto facilitó la visualización del proyecto, la identificación de interferencias, la evaluación de escenarios y el apoyo a la toma de decisiones, reduciendo la incertidumbre en la etapa de prefactibilidad.

Asimismo, se concluye que el uso de BIM mejora la calidad del análisis en proyectos de infraestructura de transporte, al permitir una gestión más eficiente de la información y una mejor comunicación entre las diferentes dimensiones del proyecto, consolidándose como una herramienta clave para la planificación moderna de sistemas ferroviarios.

Finalmente, se establece que el proyecto ferroviario Yumbo–Palmira constituye una alternativa relevante dentro del sistema de transporte regional, cuyo desarrollo futuro dependerá de estudios más detallados de ingeniería de detalle, viabilidad financiera y gestión ambiental, con el fin de garantizar su correcta implementación y sostenibilidad a largo plazo.

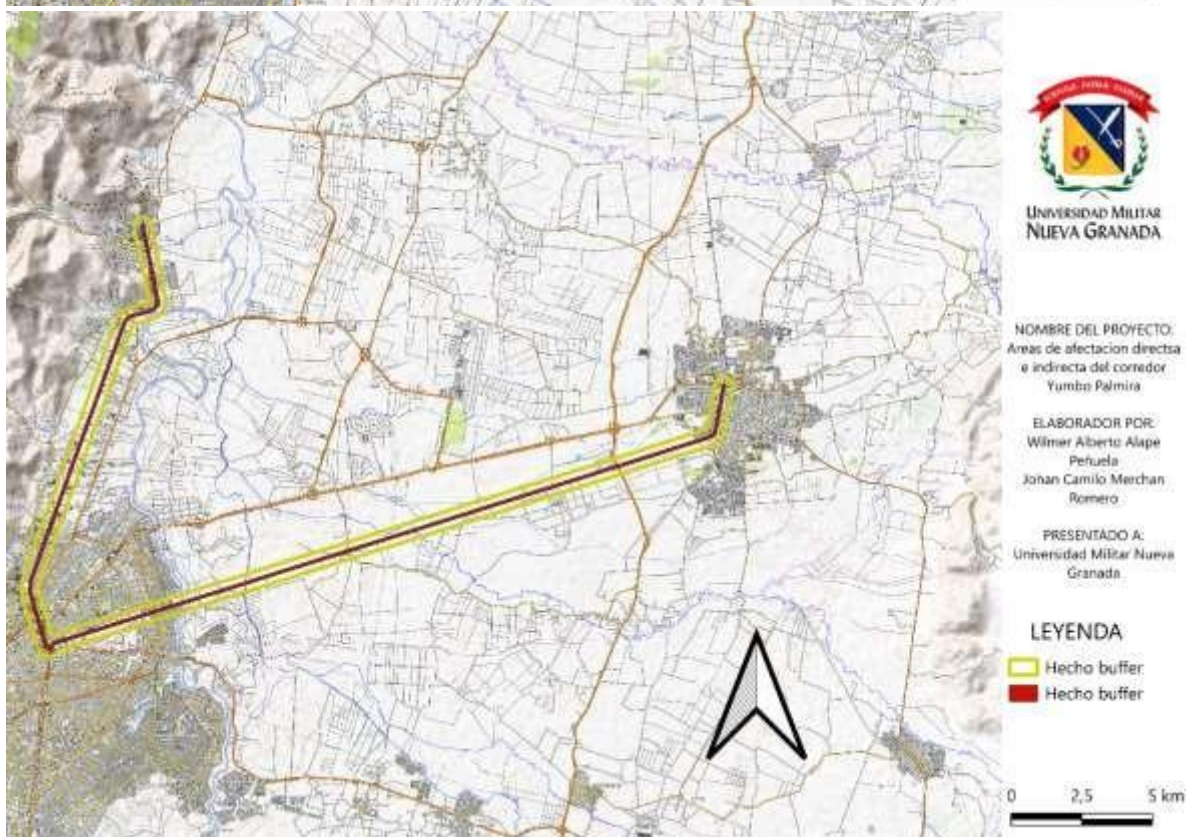
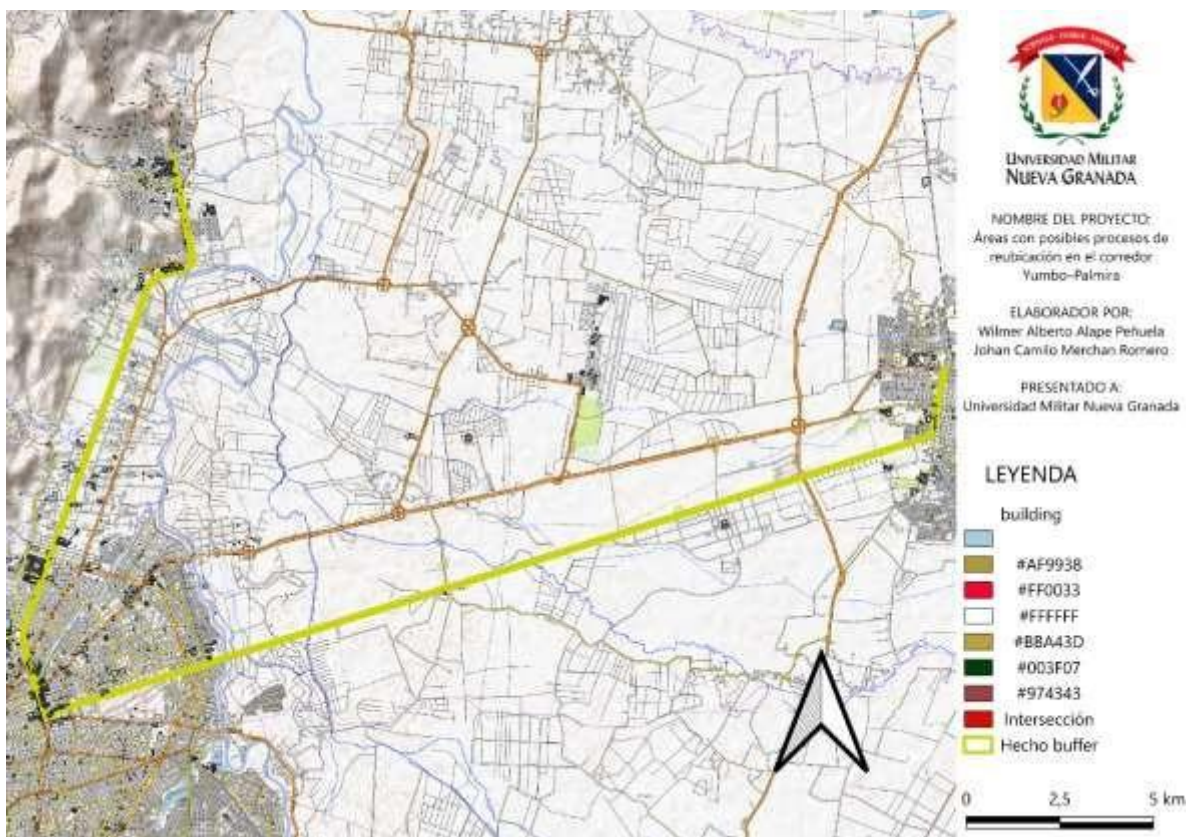
BIBLIOGRAFIA

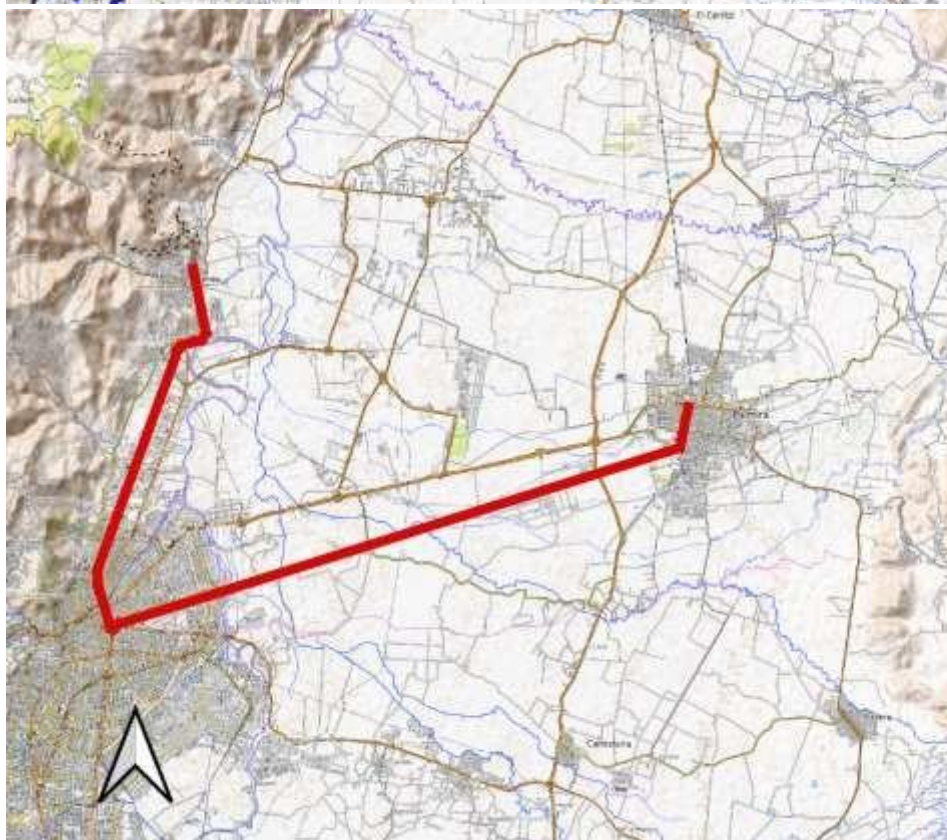
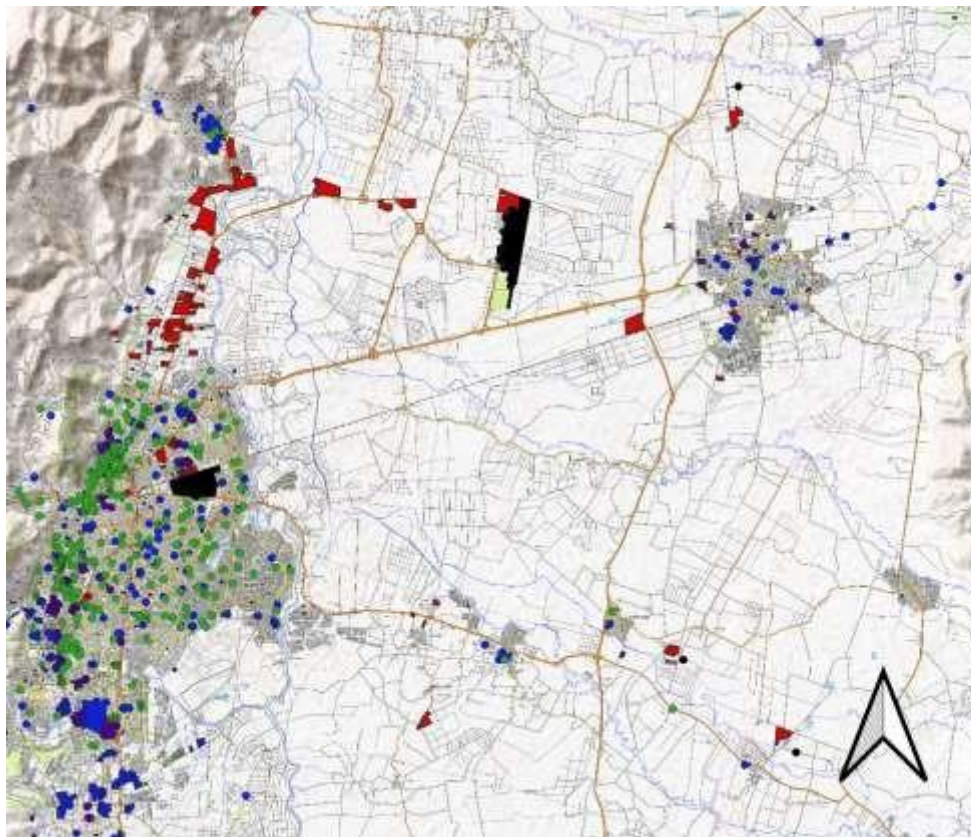
- Crespo, A. M. (2017). Infraestructura y transporte en Colombia (2ª ed.). Editorial Universitaria.
- Gómez, P., & Rodríguez, M. (2020). Desafíos de la reactivación ferroviaria en Colombia. *Revista de Ingeniería y Transporte*, 15(3), 45-60. <https://doi.org/10.1234/rit.2020.0032>

- Ministerio de Transporte. (2021, agosto 10). Plan de modernización del sistema ferroviario en Colombia. <https://www.mintransporte.gov.co/modernizacion-ferrocarril> Sánchez, P. R. (2018). Infraestructura ferroviaria y desarrollo económico. En L. H. Martínez (Ed.), Desarrollo de infraestructuras en Colombia (pp. 75-90). Editorial Académica.
- Vargas, S. (2023, febrero 15). La rehabilitación de las vías férreas: un paso clave para la economía regional. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/rehabilitacion-ferrocarril>
- Agencia Nacional de Infraestructura. (2024). Documentos técnicos y diagnósticos sobre proyectos ferroviarios en Colombia. <https://www.ani.gov.co>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI). <https://www.dnp.gov.co>
- International Energy Agency. (2023). The role of rail in transport decarbonisation. <https://www.iea.org>
- International Union of Railways. (s. f.). RAILISA database [Base de datos]. <https://uicstats.uic.org>
- Quintero González, J. R., & Salomón Molano, M. M. (2023). Infraestructura de transporte férreo en Colombia: actualidad, problemáticas, políticas y prospectiva. ResearchGate. <https://www.researchgate.net>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM handbook: A guide to building information modeling (3rd ed.). Wiley.
- Succar, B., & Kassem, M. (2015). Macro-BIM adoption: Conceptual structures. Automation in Construction, 57, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018> Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. Automation in Construction, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- World Bank. (2024). World Development Indicators: Railways, goods transported (million ton-km); Railways, passengers carried (million passenger-km). <https://data.worldbank.org>
- BIM Forum Colombia. (2019). *Guía de modelado BIM para Colombia*. Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL).
- BIM Forum Colombia. (2019). *Flujos de trabajo BIM: Guías para la adopción BIM en las organizaciones*. Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL).
- BIM Forum Colombia. (2019). *Gestión de la información: Guías para la adopción BIM en las organizaciones*. Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL).
- BIM Forum Colombia. (2019). *BIM aplicado a la infraestructura vial*. Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL).
- BIM Forum Colombia. (2019). *Plan de Ejecución BIM (BEP): Guías para la adopción BIM en las organizaciones*. Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL).

- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-2: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets*. ISO.

ANEXOS







UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

NOMBRE DEL PROYECTO:
Flujo de transporte de carga en
el corredor Buenaventura
-Cali-Yumbo-Palmira

ELABORADO POR:
Wilmer Alberto Alape Peñuela
Johan Camilo Merchan Romero

PRESENTADO A:
Universidad Militar Nueva
Granada

LEYENDA

Flujo de transporte

- 60 - 73
- 73 - 87
- 87 - 100

0 7,5 15 km



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

NOMBRE DEL PROYECTO:
Interferencias con construcciones
existentes en el corredor
Yumbo-Palmira

ELABORADOR POR:
Wilmer Alberto Alape Peñuela
Johan Camilo Merchan Romero

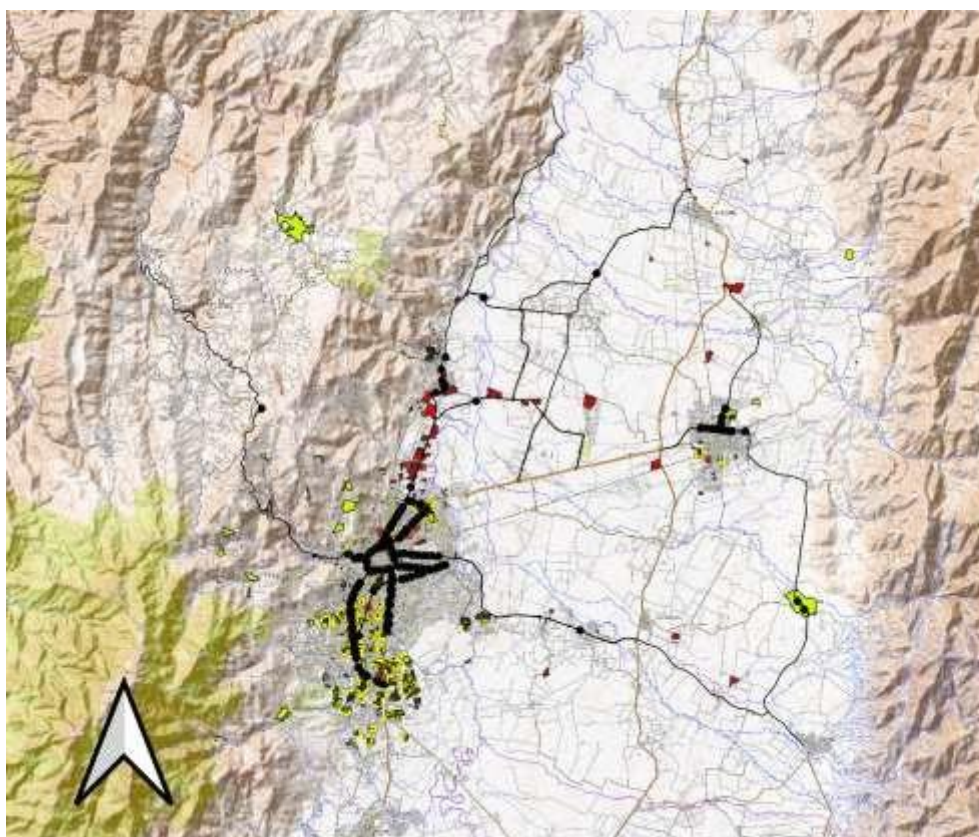
PRESENTADO A:
Universidad Militar Nueva Granada

LEYENDA

building

- #AF9938
- #FF0033
- #FFFFFF
- #BBA43D
- #003F07
- #974343
- building
- building
- Intersección
- Hecho buffer

0 2,5 5 km



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

Nombre del proyecto:
Mapa de localización de zonas
urbanas, industriales y
logísticas en el tramo
Yumbo-Palmira.

Elaborado por:
Wilmer Alberto Alape Peñuela
Johan Camilo Merchan
Romero

Presentado a:
Universidad Militar Nueva
Granada

LEYENDA

- highway_primary
- highway_primary
- landuse_industrial
- landuse_industrial
- landuse_industrial
- landuse_residential
- landuse_residential
- landuse_residential

0 5 10 km



UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA

NOMBRE DEL PROYECTO:
Nodos de conexión en el
corredor Yumbo-Palmira

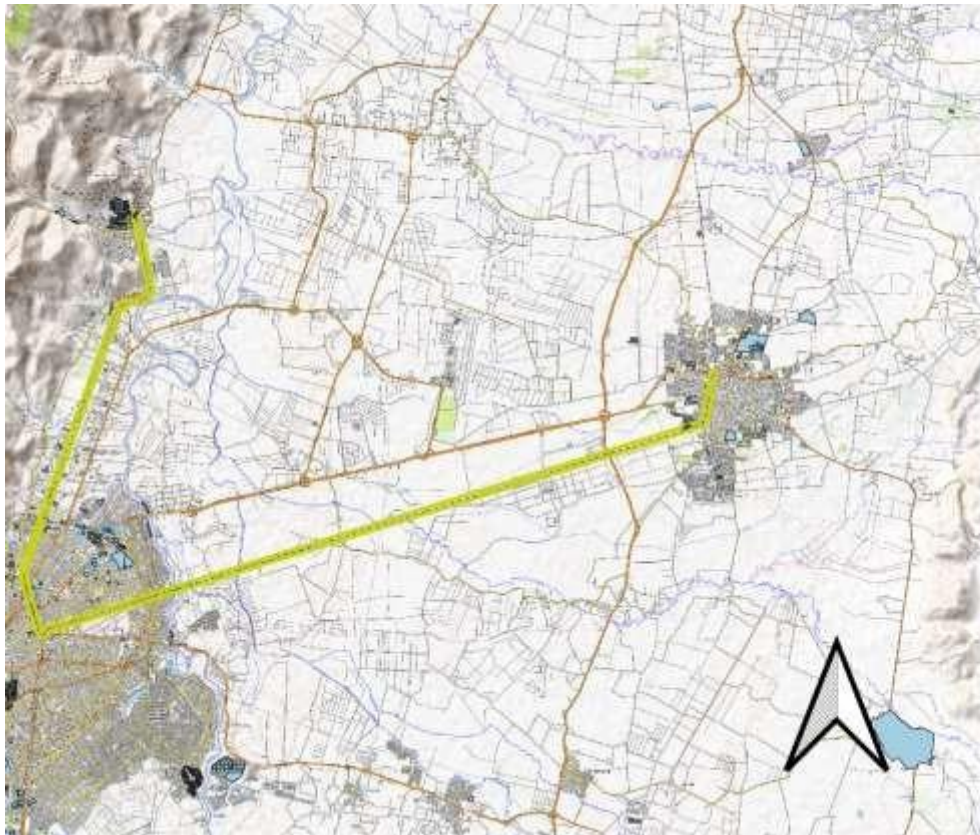
ELABORADOR POR:
Wilmer Alberto Alape
Peñuela
Johan Camilo Merchan
Romero

PRESENTADO A:
Universidad Militar Nueva
Granada

LEYENDA

- Nodos_Conexion
- Logístico
- Urbano
- Vial
- Aeropuerto

0 2.5 5 km



NOMBRE DEL PROYECTO:
Identificación de predios
requeridos en el tramo
Yumbo-Palmira

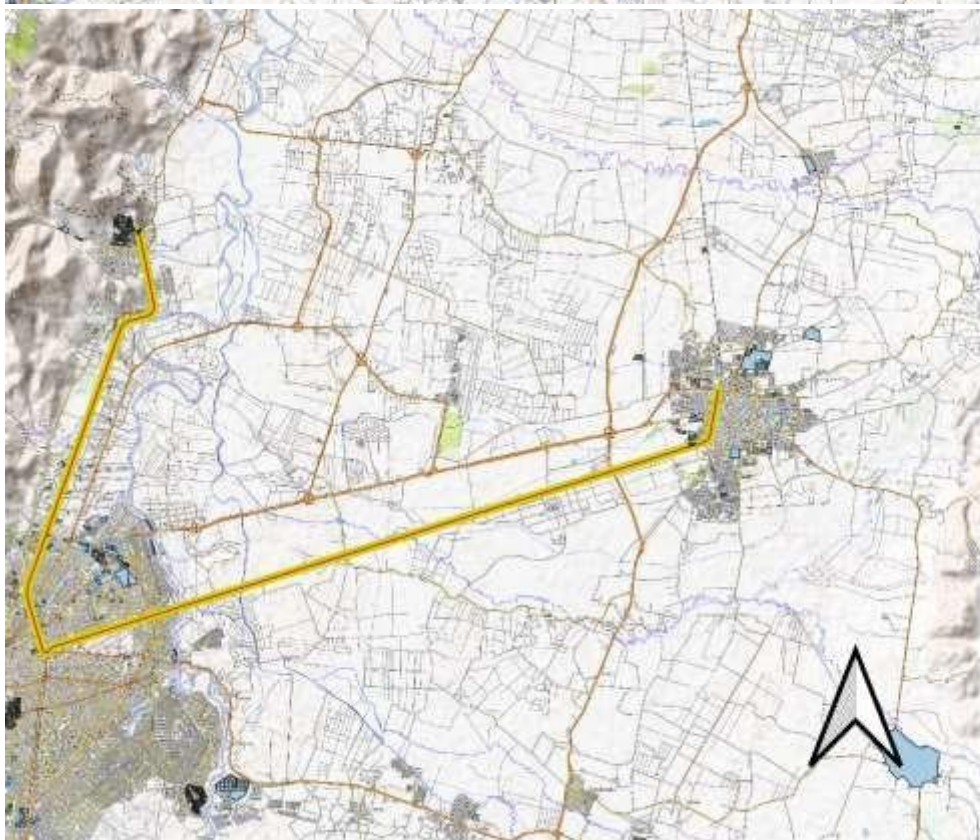
ELABORADO POR:
Wilmer Alberto Alape Peñaola
Johan Camilo Merchán
Romero

PRESENTADO A:
Universidad Militar Nueva
Granada

LEYENDA

- Intersección
- Hecho buffer
- landuse_residencial
- landuse_residencial
- landuse_residencial

0 2,5 5 km



NOMBRE DEL PROYECTO:
Servidumbres requeridas en el
corredor Yumbo-Palmira

ELABORADOR POR:
Wilmer Alberto Alape Peñaola
Johan Camilo Merchán
Romero

PRESENTADO A:
Universidad Militar Nueva
Granada

LEYENDA

- Diferencia
- Intersección
- Intersección
- Hecho buffer
- Hecho buffer
- landuse_residencial
- landuse_residencial
- landuse_residencial

0 2,5 5 km

