

SIZFF – Boyacá: Sistema de Inteligencia para Zonas Francas Ferroviarias, Plan de Mejora para la Optimización de Costos Logísticos en el Transporte Ferroviario de Arándanos, Mediante un Sistema de Inteligencia con Google Gemini

Juan Felipe Becerra Posada

Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

Facultad de Negocios Internacionales

Decana Esperanza Diaz Casallas

Tunja, Colombia

11 de Noviembre de 2025

Resumen

El proyecto SIZFF-Boyacá, un Sistema de Inteligencia para Zonas Francas Ferroviarias, se enfoca en el análisis de **costos** para el transporte de **arándanos**. El problema que busca resolver es cómo Boyacá puede aprovechar su infraestructura férrea existente, apoyada por tecnologías de automatización e inteligencia artificial, para fortalecer su competitividad logística y económica.

El objetivo es diseñar una propuesta tecnológica que utilice la **IA de Google Gemini** para optimizar el transporte ferroviario de arándanos, priorizando la reducción de costos. La justificación del proyecto destaca que el transporte ferroviario es una alternativa viable para movilizar grandes volúmenes de mercancía, lo que permite reducir los costos logísticos y aumentar la estabilidad operativa. Con la implementación de vagones refrigerados inteligentes que usan Gemini para la automatización de la cadena de frío, se proyecta una reducción de los costos logísticos por tonelada de hasta un 52% en comparación con el transporte terrestre. El costo del transporte ferroviario (**COP 120 por tonelada-kilómetro**) es **significativamente menor que el terrestre (COP 250 por tonelada-kilómetro) (MinTransporte, 2023)**.

Se estima que el proyecto logrará un ahorro de entre el 15% y el 26% en comparación con el transporte terrestre. Como conclusión, se recomienda consolidar alianzas estratégicas con actores clave como Acerías Paz del Río y la ANI para promover la operación del corredor ferroviario. El proyecto es escalable y busca consolidar a Boyacá como un polo logístico de exportación de arándanos.

Palabras claves: Transporte ferroviario, Arándanos, Gemini IA, Automatización de cadena de frío, Optimización de costos logísticos

Abstract

The SIZFF-Boyacá project, an Intelligence System for Railway Free Zones, focuses on the cost analysis for blueberry transport. The problem it seeks to solve is how Boyacá can leverage its existing railway infrastructure, supported by automation and artificial intelligence technologies, to strengthen its logistical and economic competitiveness.

The objective is to design a technological proposal that uses **Google Gemini AI** to optimize railway transport of **blueberries, prioritizing cost reduction**. The project's justification highlights that railway transport is a viable alternative for mobilizing large volumes of goods, which allows for reducing logistical costs and increasing operational stability. With the implementation of intelligent refrigerated wagons using Gemini for cold chain automation, a reduction in logistical costs per ton of up to 52% is projected in comparison with road transport. **The cost of railway transport (COP 120 per ton-kilometer) is significantly lower than road transport (COP 250 per ton-kilometer) (MinTransporte, 2023).**

It is estimated that the project will achieve savings of between 15% and 26% compared to road transport. In conclusion, it is recommended to consolidate strategic alliances with key players such as Acerías Paz del Río and the ANI to promote the operation of the railway corridor. The project is scalable and seeks to consolidate Boyacá as a logistics hub for blueberry exports.

Keywords: Railway transport, Blueberries, Gemini AI, Cold chain automation, Logistical cost optimization

Tabla de Contenido:

- Introducción
- Antecedentes
- Objetivos
- Justificación
- Reseña de la empresa
- Plan de trabajo
- Impactos y limitaciones
- Plan de mejora
- Conclusiones
- Hallazgos y Recomendaciones
- Referencias

Introducción

El departamento de Boyacá se ha posicionado como una región estratégica en el desarrollo logístico del centro-oriente colombiano, no solo por su ubicación geográfica sino también por su capacidad productiva en sectores clave como la agroindustria (Gobernación de Boyacá, 2023). En este contexto, la implementación de Zonas Francas Ferroviarias, apoyadas por tecnologías de inteligencia artificial, representa una oportunidad transformadora para optimizar el movimiento de mercancías. Un ejemplo de esto es el corredor férreo Bogotá-Belencito, una ruta con infraestructura existente y un alto potencial para descongestionar las vías tradicionales que a menudo presentan sobrecostos logísticos y demoras (Ministerio de Transporte, 2024). En el ámbito internacional, proyectos similares en Alemania han demostrado la eficacia de estas soluciones al reducir los costos logísticos en un 25% (World Bank, 2023). El transporte ferroviario permite movilizar grandes volúmenes de carga, lo que se traduce en mayores eficiencias operativas y menores emisiones de carbono por unidad transportada en comparación con el transporte terrestre (UNCTAD, 2021; World Bank, 2022).

Específicamente, Boyacá es el primer productor nacional de once frutas, incluyendo el arándano (ProColombia, 2024). La producción de arándanos, que se concentra en municipios como Sotaquirá, Duitama, Villa de Leyva y Paipa, requiere condiciones estrictas de conservación y transporte para mantener su frescura. Actualmente, el transporte de estos productos perecederos se realiza por vía terrestre, un método que, si bien es flexible, es más susceptible a los riesgos viales, los tiempos de espera y el deterioro de la carga lo que resulta en un aumento de costos. El presente proyecto aborda esta problemática proponiendo la implementación de vagones refrigerados inteligentes que utilizarán la inteligencia artificial Gemini de Google. Esta tecnología garantizará

la trazabilidad, integridad y el cumplimiento normativo de los arándanos desde el origen hasta el destino, optimizando la cadena de frío y minimizando las pérdidas post-cosecha.

La adopción de este sistema busca un impacto significativo y verificable en la comparativa de costos y la sostenibilidad. Se proyecta que el SIZFF-Boyacá podrá reducir los costos logísticos por tonelada hasta en un 52%. Este modelo, centrado en los arándanos, no solo responde a una necesidad operativa, sino que también propone una transformación estructural en la forma en que Boyacá se conecta con los mercados nacionales e internacionales. Al posicionar al departamento como pionero en soluciones de movilidad inteligente, el SIZFF-Boyacá se presenta como un referente replicable que puede impulsar el desarrollo regional y la competitividad de las exportaciones boyacenses de arándanos así como la reducción de costos logísticos.

Por consiguiente, el propósito fundamental de este Plan de Mejora es cuantificar y demostrar la viabilidad económica de implementar un Sistema de Inteligencia (SIZFF) en el corredor ferroviario de Boyacá, enfocado exclusivamente en el transporte de arándanos. Específicamente, este proyecto busca comparar los costos logísticos actuales del transporte terrestre contra la eficiencia proyectada del sistema ferroviario automatizado con Google Gemini IA, estableciendo así la reducción porcentual de los gastos operativos y la sostenibilidad de Boyacá como polo de exportación.

Antecedentes

Evolución Histórica Profunda de la Política Férrea en Colombia:

El Declive y la Paradoja Férrea Post-1950: Aunque la política férrea en Colombia tuvo su auge a inicios del siglo XX, la transición hacia el modelo de sustitución de importaciones y la influencia del sector automotor en la posguerra (1950-1970) provocaron un declive progresivo y una priorización casi exclusiva del transporte terrestre (Gómez, 2021). Este viraje histórico es la causa fundamental de la actual estructura de costos logísticos elevada en Boyacá, afectando directamente la competitividad de productos como los arándanos. La política de desinversión condujo a que, en la actualidad, el costo logístico del país represente hasta el 14% del precio final del producto, mientras que países con fuerte infraestructura férrea mantienen este costo por debajo del 8% (Banco Mundial, 2023). La comprensión de esta evolución histórica justifica la urgencia de este Plan de Mejora como corrección a una falla estructural de la política económica nacional.

La propuesta de incorporar la IA de Google Gemini en los vagones refrigerados de Boyacá está fundamentada en modelos exitosos de optimización de costos y calidad logística a nivel mundial.

Caso de Estudio: Sistemas de Monitoreo Inteligente en Chile y España: Países como Chile, líder en exportación de frutas, han implementado tecnologías de monitoreo y trazabilidad en sus redes ferroviarias, logrando reducir la pérdida de frutas de exportación (ej. bayas y arándanos) en un 4% y disminuir los costos operativos de mantenimiento de la flota en un 15% (ProChile, 2022). Asimismo, las redes europeas (ej. España) utilizan plataformas de inteligencia artificial para la gestión predictiva de la carga (vía férrea), lo que se traduce en una comparativa de costos favorable frente al transporte tradicional. La IA de Gemini propone superar estos modelos al ofrecer no solo monitoreo sino automatización de la cadena de frío, garantizando la calidad de los arándanos y potenciando la ventaja de costos lograda por el transporte férreo. Estos antecedentes validan la robustez tecnológica y la viabilidad económica del SIZFF.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la viabilidad económica y logística del Plan de Mejora SIZFF para el transporte de arándanos, mediante la comparativa de costos entre el sistema terrestre actual y la solución propuesta con la IA de Google Gemini buscando reducir costos, esto con el fin de proponer un proyecto para mejorar la logística de este producto.

Objetivos específicos

1. Analizar los costos operativos asociados al transporte terrestre de arándanos en Boyacá, identificando los puntos de mayor ineficiencia logística.
2. Formular la propuesta tecnológica del SIZFF, detallando los requerimientos técnicos y operativos de los vagones inteligentes asistidos por la IA de Google Gemini para la gestión de la cadena de frío.
3. Desarrollar una propuesta de plan de mejora para la gestión logística que articule a los productores de arándanos de Boyacá con una Zona Franca Permanente Especial (ZFPE), optimizando los procesos de acopio, consolidación y despacho a través de un sistema ferroviario inteligente y sostenible.
4. Cuantificar el ahorro porcentual en la comparativa de costos por tonelada de arándanos que se lograría con la implementación del Plan de Mejora, estableciendo la rentabilidad y la ventaja competitiva para la región.

Justificación

Boyacá enfrenta el desafío de fortalecer su sistema logístico para responder a la creciente demanda de sus sectores productivos, especialmente la agroindustria. Aunque cuenta con una ubicación estratégica y con corredores férreos existentes como el tramo Bogotá–Belencito, estos recursos han sido subutilizados en comparación con las rutas terrestres tradicionales, que con frecuencia enfrentan distintos problemas que influyen en los costos finales para personas y negocios.

En este contexto, el transporte férreo resurge como una alternativa viable: aunque puede tener ligeramente mayores tiempos de tránsito frente al camión, su capacidad para movilizar grandes volúmenes por viaje permite reducir costos logísticos.

Además de los beneficios económicos, el SIZFF-Boyacá generará un impacto social significativo, impulsando la creación de empleo calificado en áreas rurales, promoviendo la formación de mano de obra especializada en logística y tecnologías 4.0, y mejorando la calidad de vida de los habitantes de la región al optimizar el acceso a mercados y reducir la congestión vial. Este proyecto es un catalizador para el desarrollo territorial equitativo y sostenible.

¿Cómo puede Boyacá aprovechar su infraestructura férrea existente, apoyada en tecnologías de automatización e inteligencia artificial, para implementar Zonas Francas Ferroviarias que fortalezcan su competitividad logística y económica?

Esta pregunta será respondida a lo largo del presente proyecto, a través del análisis de rutas, la propuesta de soluciones tecnológicas y la articulación de actores estratégicos dentro del territorio boyacense.

Reseña de la Empresa

La Gobernación de Boyacá, a través de su Secretaría de Desarrollo Empresarial, es una entidad del orden departamental que impulsa políticas públicas orientadas al crecimiento económico sostenible y al fortalecimiento de las capacidades productivas del territorio. Esta dependencia desempeña un papel clave en el acompañamiento a emprendedores, empresas y asociaciones productivas, promoviendo la competitividad regional, la innovación y la internacionalización de la economía boyacense.

La Secretaría articula esfuerzos institucionales para el desarrollo de sectores estratégicos como agroindustria, manufactura, metalmecánica, artesanías y economía naranja. Mediante ferias empresariales, asesorías, capacitaciones y alianzas con entidades como ProColombia, DIAN, Cámara de Comercio, FNG, universidades y centros de innovación, contribuye activamente a la dinamización del ecosistema empresarial del departamento.

Durante el primer semestre del año, la Secretaría ha liderado importantes iniciativas como la Feria Imparable, orientada al empoderamiento económico de mujeres campesinas; ha participado en encuentros interinstitucionales para fomentar la exportación a través de las Sociedades Comercializadoras Internacionales (SCI); y ha acompañado a artesanos en procesos de innovación mediante metodologías de Design Thinking en alianza con instituciones académicas.

Adicionalmente, se ha desarrollado documentación clave para la orientación de emprendedores en temas como requisitos de certificación, planes exportadores, y estudios de mercado, consolidando a la Gobernación como un referente en el acompañamiento técnico y estratégico a unidades productivas locales.

La Secretaría de Desarrollo Empresarial se consolida, así como una plataforma institucional que impulsa el crecimiento empresarial del departamento, con enfoque territorial, inclusión social y visión de mercado global.

Indicadores de Gestión Relevantes para el Proyecto SIZFF: La pertinencia del Plan de Mejora SIZFF, centrado en la optimización de la cadena logística de los arándanos, se ancla en los indicadores de gestión que demuestran la priorización de la Secretaría de Desarrollo Empresarial por la competitividad y la exportación. Estos datos confirman la alineación del proyecto con la agenda institucional.

Índice de Crecimiento de las Exportaciones No Minero-Energéticas: La Secretaría ha promovido un incremento del 20% en el número de empresas de Boyacá que han incursionado o aumentado sus volúmenes de exportación en el último bienio (DANE, 2024). Este indicador es fundamental, ya que el sostenimiento de este crecimiento exige una infraestructura logística más eficiente y de menor costo que el transporte terrestre. Por lo tanto, el Plan de Mejora del SIZFF se convierte en una herramienta estratégica institucional para materializar y consolidar dicho aumento.

Proyectos Financiados en Infraestructura Logística Regional: La inversión directa de la Secretaría y sus aliados en proyectos de mejoramiento de la capacidad de transporte e infraestructura logística superó los COP 8.000 millones en el periodo en curso (Gobernación de Boyacá, Plan de Desarrollo, 2023). Este indicador no solo demuestra la capacidad de gestión y cofinanciación, sino que subraya el compromiso institucional para asumir proyectos de alto impacto tecnológico, como la automatización de vagones mediante la IA de Google Gemini, que garantizan la trazabilidad y la calidad de los arándanos.

El análisis competitivo debe demostrar la ventaja estratégica que el SIZFF otorga a Boyacá frente a otras

regiones productoras de arándanos. La ventaja se define exclusivamente por la comparativa de costos logísticos que se logra con la reactivación del corredor férreo.

Posicionamiento Estratégico Frente al Monopolio Terrestre: El principal factor de competitividad en la agroexportación de arándanos es el costo logístico por unidad de carga. Los principales competidores de Boyacá dependen enteramente del transporte carretero, cuyo costo promedio es de COP 250 por tonelada-kilómetro. Al proponer un sistema ferroviario inteligente, asistido por Gemini IA para la gestión predictiva de la cadena de frío, el Plan de Mejora proyecta un costo operativo de solo COP 120 por tonelada-kilómetro (MinTransporte, 2023). Esta diferencia del 52% se convierte en la única ventaja competitiva sostenible para la región, respaldando la necesidad del proyecto institucional.

Impacto de Gemini IA en la Competencia de Calidad: El sistema automatizado con Google Gemini IA no solo impacta la reducción de costos, sino que también establece un estándar de calidad. La IA permite monitorear y ajustar las condiciones de temperatura y humedad en tiempo real, minimizando la pérdida de producto, lo que es un diferenciador clave para los arándanos frente a la competencia internacional.

Tabla 1.

Plan de Trabajo del SIZFF-Boyacá enfocado en la logística de arándanos y la reducción de costos:

Fases del Proyecto	Actividades clave	Entregables
Diagnóstico y Análisis de Viabilidad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar la infraestructura ferroviaria del corredor Bogotá-Belencito. 2. Analizar y comparar los costos, del transporte terrestre de arándanos vs. el transporte ferroviario. 3. Identificar los principales municipios productores de arándanos en Boyacá (Sotaquirá, Duitama, Villa de Leyva, Paipa). 	<ul style="list-style-type: none"> • Informe de diagnóstico y comparativa de costos. • Justificación técnica y económica del proyecto.
Diseño Tecnológico y Propuesta de Vagones	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diseñar el modelo conceptual de vagones refrigerados para arándanos, adaptados al corredor férreo. 2. Integrar la IA Gemini de Google para el monitoreo de la cadena de frío y la optimización de la logística. 3. Definir la sensorización IoT para la trazabilidad de la 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño conceptual de vagón inteligente. • Especificaciones técnicas del sistema de IA.

	temperatura y la humedad en tiempo real.	
Análisis de Impacto y Estrategia	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estimar la reducción de costos logísticos. 2. Evaluar el impacto económico en los productores de arándanos de Boyacá. 3. Identificar y proponer alianzas estratégicas con la ANI y actores del sector privado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz de impacto y beneficios. • Propuesta de alianzas estratégicas y plan de financiamiento.
Elaboración de Informe Final y Conclusiones	<ol style="list-style-type: none"> 1. Redactar el informe final consolidando los hallazgos, la propuesta tecnológica y los resultados proyectados. 2. Formular conclusiones basadas en el análisis de costos y la viabilidad del proyecto. 3. Presentar los resultados a la Secretaría de Desarrollo Empresarial y Universidad Santo Tomas Seccional Tunja. 	<ul style="list-style-type: none"> • Documento final del proyecto de grado. • Presentación ejecutiva. • Plan de recomendaciones para la implementación.

Nota. Esta tabla presenta el plan de trabajo del proyecto SIZFF-Boyacá con un enfoque en el transporte de arándanos y la reducción de costos.

Diagnóstico y Recolección de Información

De acuerdo con Cambio Colombia (2025), la ruta férrea Bogotá–Belencito, con una longitud aproximada de 257 kilómetros, se posiciona como un eje logístico estratégico para el centro-oriente colombiano, pues conecta la capital con municipios como Facatativá, Madrid,

Mosquera, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tocancipá, Gachancipá, Sesquilé, Suesca, Chocontá, Villapinzón, Ventaquemada, Tunja, Oicatá, Tuta, Paipa, Duitama y Sogamoso. Históricamente, esta línea ha sido utilizada principalmente para el transporte de carga, en particular cemento desde Acerías Paz del Río en Belencito hacia Bogotá (Uniandes, 2021). Sin embargo, en los últimos años el corredor ha enfrentado un creciente deterioro de su infraestructura, lo cual limita su capacidad operativa y lo aleja de los estándares logísticos actuales (Uniandes, 2021).

En respuesta a estas necesidades, el Gobierno Nacional, a través de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), inició un plan de modernización del corredor. De acuerdo con la ANI (2025), en mayo de 2025 se anunció el inicio de obras para reforzar 40 kilómetros del tramo entre Paipa y Belencito, con una inversión superior a \$150.000 millones; dichas obras incluyen la instalación de rieles de alta capacidad, el reemplazo de traviesas y la mejora de la velocidad de operación, con un plazo estimado de ejecución de 10 meses. Asimismo, se han finalizado los estudios y diseños técnicos necesarios para llevar a cabo estos trabajos, lo que demuestra un compromiso claro con la reactivación y fortalecimiento del transporte férreo en la región (ANI, 2025).

Este proceso de modernización no solo busca mejorar la eficiencia operativa del corredor, sino también posicionar al transporte ferroviario como una alternativa sostenible y competitiva frente al transporte terrestre, especialmente en contextos de congestión vial y restricciones ambientales. Por lo tanto, la revitalización del corredor férreo Bogotá–Belencito representa una oportunidad estratégica para optimizar la logística regional, reducir costos de transporte y promover un desarrollo económico más sostenible en el centro-oriente colombiano.

Contexto del Corredor Bogotá–Belencito

El trayecto que se busca optimizar con el proyecto SIZFF-Boyacá tiene una extensión de aproximadamente 257 kilómetros por vía férrea, una distancia comparable a la ruta por carretera. La reactivación de este corredor ferroviario ha sido un proceso gradual, con las primeras operaciones comerciales en 2020, que transportaron 23,000 toneladas en 2023. El proyecto se beneficiará de la inversión de más de 150,000 millones de pesos para la modernización de 40 kilómetros del tramo entre Tuta y Belencito en 2025. El objetivo principal de esta modernización es mejorar la velocidad operativa y la capacidad de carga de los trenes, lo que se traduce directamente en un aumento de las ganancias y una reducción de costos en el transporte de arándanos.

Tabla 2.

Comparativa de costos de transporte refrigerado para arándanos en la ruta Bogotá-Belencito:

Medio de Transporte	Costo total (COP)	Equivalente USD	Ahorro vs. camión (%)
Camión	~ 3.500.000	~ 730	-
Tren	2.100.000 – 2.600.000	440 – 550	15 – 26

Nota. Datos promedio para el período 2020–2025. El costo por camión corresponde a una tractomula de 36 toneladas, y el costo por tren refleja economías de escala al transportar entre 400 y 600 toneladas por viaje. La refrigeración agrega un 15-20% al costo por el consumo energético y el equipo especializado.

Ventajas Comparativas

El transporte ferroviario presenta ventajas comparativas significativas frente al transporte terrestre, especialmente en el contexto del SIZFF-Boyacá y la logística de arándanos. Las economías de escala son el principal factor diferenciador, ya que un solo tren puede movilizar hasta 6,000 toneladas, lo que equivale a la carga de aproximadamente 250 camiones en una única operación. Esta capacidad masiva se traduce en un menor costo unitario y una reducción en el personal requerido por tonelada transportada. Adicionalmente, la implementación de la inteligencia artificial Gemini de Google en los vagones inteligentes potenciará estas ventajas, optimizando la gestión de la carga, la trazabilidad y la eficiencia operativa, lo que redundará en una mayor competitividad y una reducción de costos aún más pronunciada para los productores de arándanos de la región, competitividad que profundizaremos más adelante.

Monitoreo Continuo

Para validar la eficiencia en la reducción de costos, el SIZFF-Boyacá propone la implementación de un monitoreo continuo mediante un panel de indicadores clave de rendimiento (KPI) enfocado en los costos. Este sistema permitirá evaluar en tiempo real la reducción de gastos operativos y logísticos proyectada, validando las mejoras entre los años 2020 y 2025. El ferrocarril Bogotá-Belencito demuestra ser una opción preferente para cargas de gran volumen, gracias a costos un 15-26% menores en comparación con el transporte terrestre. La expansión y modernización del tren, complementada con la inteligencia artificial Gemini de Google, debe liderar la estrategia logística y de inversión para maximizar la competitividad en las zonas francas férreas.

El arándano es el producto clave para el SIZFF-Boyacá, y su conservación es fundamental para el éxito del proyecto. Para este fruto, que se cultiva en municipios como Sotaquirá, Duitama, Villa de Leyva y Paipa, la cadena de frío requiere un estricto control de la temperatura para minimizar pérdidas. Los arándanos, deben mantenerse en un rango de temperatura de entre 2°C y 5°C durante el transporte para preservar su calidad organoléptica y nutricional. La implementación de vagones refrigerados inteligentes, potenciados por la inteligencia artificial Gemini de Google, es crucial para este propósito.

Gemini analizará datos de sensores de Internet de las Cosas (IoT) de temperatura y humedad, que muestrean las condiciones internas de los vagones cada 5-10 minutos, para optimizar el consumo energético del sistema de refrigeración. Además, a través de algoritmos de machine learning, la IA monitoreará y analizará registros de temperatura y vibraciones del equipo de refrigeración y del chasis. Este mantenimiento predictivo le permitirá proyectar fallas potenciales con semanas de anticipación, lo que evita paradas no planificadas en la operación y los altos costos asociados a la pérdida de producto y retrasos en la cadena de suministro. Con esta solución tecnológica, el SIZFF-Boyacá no solo garantiza la conservación de la frescura de los arándanos, sino que también reduce de manera significativa los costos operativos.

Para asegurar el monitoreo efectivo y la medición del desempeño del SIZFF-Boyacá, se establecen indicadores

SMART (específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con un plazo definido). Cada indicador se formula con una línea base, una meta cuantificable, una unidad de medida, una frecuencia de reporte y una fuente verificable.

Tabla 3

Indicadores de desempeño para la reducción de costos en el transporte de arándanos:

Indicador	Línea base	Meta	Unidad de medida	Frecuencia de medición	Fuente de verificación
Costo logístico por tonelada de arándanos	Costo actual de transporte terrestre \$ 3 – 3.5 millones de pesos para carga refrigerada	Reducción del 52% en 24 meses	Porcentaje (%) / COP	Trimestral	Reportes financieros, sistema TMS integrado
Pérdidas postcosecha de arándanos	12% (FAO, 2023)	≤ 5% en los primeros 12 meses	Porcentaje (%)	Semestral	Informes trazabilidad IoT, operadores logísticos
Ocupación promedio de vagones inteligentes	Sin dato (nuevo sistema)	85% en el primer año	Porcentaje (%)	Mensual	Sistema WMS/TMS con sensores IoT (Rivera et al., 2023)

Empresas productoras de arándanos integradas	0 (Nuevo Sistema)	50 empresas en el primer año	Número absoluto	Trimestral	Registros ZFPE – DIAN, actas de vinculación
---	----------------------	------------------------------	-----------------	------------	---

Tabla 4

Matriz DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas, Amenazas) del proyecto SIZFF-Boyacá:

Tipo	Factores
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> - Infraestructura férrea existente en el corredor Bogotá-Belencito. - Enfoque innovador con la integración de la IA Gemini de Google en vagones refrigerados para optimizar la cadena de frío y reducir costos. - Sustento teórico sólido, basado en fuentes oficiales y académicas actualizadas. - Estructura metodológica con un plan de trabajo coherente y una lógica de implementación clara.
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> - Deterioro creciente de la infraestructura ferroviaria que limita su capacidad operativa. - La viabilidad económica inicial depende de una demanda constante de arándanos para lograr economías de escala.
Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> - Voluntad política y plan de modernización del Gobierno Nacional para la reactivación férrea.

	<ul style="list-style-type: none"> - Creciente demanda nacional e internacional de arándanos que requieren transporte especializado y eficiente. - Posibilidad de establecer una Zona Franca Ferroviaria para la consolidación de la carga de arándanos, lo que genera eficiencias operativas y fiscales.
Amenazas	<ul style="list-style-type: none"> - Posible baja demanda inicial de transporte de arándanos que podría afectar la viabilidad financiera del proyecto. - Competencia significativa con el transporte terrestre, que ofrece flexibilidad puerta a puerta. - Resistencia al cambio por parte de actores tradicionales del sector logístico.

Tabla 5

Matriz PEYEA (Posición Estratégica y Evaluación de la Acción) del proyecto SIZFF-Boyacá

Tipo	Factores
Políticos	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerte apoyo del Gobierno Nacional y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) a la modernización del corredor férreo Bogotá-Belencito. - El marco normativo para Zonas Francas Ferroviarias permite el desarrollo del proyecto.
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> - El costo del transporte ferroviario es significativamente menor que el terrestre. - El proyecto proyecta una reducción de hasta el 52% en costos logísticos para el transporte de arándanos.

	- La inversión inicial requiere financiación público-privada.
Sociales	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial para la generación de empleo calificado y la formación de mano de obra especializada en tecnologías 4.0. - Mejora en la calidad de vida de los habitantes al optimizar el acceso a mercados y reducir la congestión vial. - Posible resistencia al cambio por parte de transportadores tradicionales y comunidades locales.
Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Alta viabilidad del uso de la IA Gemini de Google, Internet de las Cosas (IoT) y blockchain para la optimización logística de arándanos. - Diseño conceptual de vagones refrigerados con sensores IoT para el control de la cadena de frío.
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> - Impacto positivo en la reducción de emisiones de CO2 (hasta un 70% menos que el transporte por carretera). - Fomenta una logística más sostenible y competitiva, alineada con metas de carbono neutralidad.
Administrativos	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere una articulación robusta entre la Gobernación de Boyacá, ANI, MinTransporte, DIAN, ProColombia y asociaciones productivas. - La capacidad operativa local y la coordinación interinstitucional son cruciales para una implementación fluida.

Tabla 6*Matriz MEFE para el proyecto SIZFF-Boyacá*

Factores Externos Clave	Peso	Calificación	Puntuación Ponderada
Oportunidades			
Voluntad política para la modernización férrea	0.20	4	0.80
Creciente demanda de arándanos de Boyacá	0.25	4	1.00
Oportunidad de establecer Zonas Francas Ferroviarias	0.15	4	0.60
Amenazas			
Baja demanda inicial de carga de arándanos	0.10	2	0.20
Competencia con el transporte terrestre	0.10	3	0.30
Posible resistencia al cambio por parte de actores tradicionales	0.05	3	0.15
Total Puntuación Ponderada		3.05	

Diseño de Propuesta Logística

El diseño del Sistema de Inteligencia para Zonas Francas Ferroviarias en Boyacá (SIZFF-Boyacá) se articula en tres ejes fundamentales para el transporte de arándanos: el aprovechamiento de la infraestructura férrea existente, la articulación con los productores regionales y la integración de tecnología para maximizar la reducción de costos. Esta propuesta parte de la premisa de que el transporte ferroviario, potenciado por la inteligencia artificial Gemini de Google, es una solución viable para optimizar la cadena de suministro de arándanos y descongestionar el sistema carretero, que impacta negativamente en la rentabilidad del producto.

1. Ubicación estratégica: Corredor Bogotá-Belencito

La ruta férrea Bogotá-Belencito es la columna vertebral de esta propuesta. Este corredor de 257 km conecta zonas altamente productivas de Boyacá, donde se cultivan arándanos, con centros de consumo nacional (Bogotá) e internacional a través de la interconexión con corredores multimodales. La reciente inversión del Gobierno Nacional para modernizar 40 km del tramo Paipa-Belencito refuerza la viabilidad del proyecto, demostrando un compromiso claro con la reactivación y el fortalecimiento del transporte férreo en la región.

2. Tipo de Zona Franca propuesta y Articulación con Productores

De acuerdo con la normativa vigente, se propone la creación de una Zona Franca Permanente Especial Ferroviaria de carácter logístico y agroindustrial. Esta zona se ubicaría estratégicamente entre Paipa y Duitama, aprovechando la cercanía a la infraestructura férrea y la alta concentración de productores de arándanos. Sus funciones principales estarían enfocadas en la consolidación de la carga de arándanos de pequeños y medianos productores, la aplicación de

procesos especializados de clasificación, refrigeración y embalaje, y la salida y recepción de trenes con trazabilidad digital de la carga.

El modelo se centra exclusivamente en el transporte de arándanos, que requieren un control estricto de la cadena de frío para mantener su frescura y calidad. La implementación de un sistema intermodal tren-camión, con vagones inteligentes potenciados por la IA Gemini de Google, garantizará las condiciones de temperatura controlada desde el punto de origen hasta el cliente final, lo que resultará en una reducción significativa de costos logísticos y pérdidas post-cosecha.

3. Integración con productos locales:

El modelo SIZFF-Boyacá se centra en optimizar el transporte de arándanos, un producto que requiere condiciones especializadas de conservación y transporte para mantener su calidad y valor comercial. Boyacá es un productor clave de arándanos, que actualmente se transportan por camión, un método que no siempre garantiza la integridad de la cadena de frío. La dependencia de este transporte aumenta los riesgos de pérdidas pos-cosecha y eleva los costos logísticos, afectando la competitividad de los productores en los mercados.

En respuesta a esta problemática, el SIZFF-Boyacá propone un sistema intermodal tren-camión, con vagones refrigerados inteligentes que garantizan un monitoreo preciso y automatizado de la temperatura. Esta solución tecnológica, impulsada por la inteligencia artificial Gemini de Google, asegura la trazabilidad y las condiciones controladas desde el punto de origen hasta el cliente final, lo que se traduce en una significativa reducción de costos logísticos y una mejora en la calidad del producto entregado.

4. Componentes logísticos y tecnológicos:

El SIZFF-Boyacá se fundamenta en un conjunto de componentes logísticos y tecnológicos diseñados para optimizar el transporte de arándanos y reducir los costos asociados. Estos elementos son interdependientes y trabajan en conjunto para crear un sistema eficiente y competitivo.

1. **Vagones refrigerados inteligentes:** Se proponen vagones adaptados específicamente para el transporte de arándanos, con un rango de temperatura controlado entre 0 °C y 8 °C. Estos vagones integran sensores de Internet de las Cosas (IoT) que monitorean en tiempo real la temperatura y la humedad, asegurando la integridad del producto durante todo el trayecto. La información recopilada es analizada por la inteligencia artificial Gemini de Google.
2. **Plataforma de gestión logística con IA:** Se implementará un software avanzado de gestión logística que, impulsado por la inteligencia artificial Gemini de Google, optimizará la planificación de rutas y la gestión de la cadena de frío. La IA analizará datos de los vagones y de la demanda para predecir los flujos de carga, lo que permitirá una asignación más eficiente de recursos y una reducción de los costos operativos.
3. **Centros de acopio y consolidación:** Se establecerán centros de acopio en puntos estratégicos de Boyacá, equipados con cámaras frías para mantener los arándanos a la temperatura adecuada antes de su despacho. Estos centros facilitarán la consolidación de la carga de diferentes productores, optimizando la capacidad de los vagones y reduciendo los costos de transporte por tonelada.
4. **Interfaz con la DIAN y trámites de exportación:** El sistema contará con una interfaz integrada con la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) para

automatizar los trámites aduaneros y de exportación directamente en la Zona Franca Ferroviaria. Esta funcionalidad agilizará los procesos, minimizando los tiempos de espera y los costos administrativos.

5. Participación institucional y escalabilidad:

La implementación exitosa del SIZFF-Boyacá requiere de la articulación estratégica entre diversos actores, tanto del sector público como privado. La colaboración es fundamental para garantizar el desarrollo, la operación y la futura replicación del modelo. Los principales actores involucrados son:

1. **Gobernación de Boyacá y Secretaría de Desarrollo Empresarial:** Serán los principales gestores y promotores del proyecto, facilitando la integración con las políticas de desarrollo regional y atrayendo la inversión necesaria.
2. **Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y Ministerio de Transporte:** Actores clave para la rehabilitación y gestión de la infraestructura ferroviaria del corredor Bogotá-Belencito.
3. **Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN):** Su participación es vital para la regulación aduanera y la integración del sistema de despacho en la Zona Franca Ferroviaria.
4. **Asociaciones de productores de arándanos:** Su colaboración es esencial para asegurar la oferta de exportación y la alineación del proyecto con las necesidades reales del sector.

El proyecto se enfoca en los arándanos, que requieren un transporte eficiente para conservar su cadena de frío y cumplir con las normas de calidad. Actualmente, su transporte por carretera

aumenta los costos y el riesgo de daños. Con la tecnología de inteligencia artificial Gemini de Google, el SIZFF-Boyacá no solo busca reducir estos costos, sino también establecer un modelo de transporte sostenible y tecnológicamente avanzado, que puede ser replicado en otros corredores para fortalecer la competitividad de las exportaciones de Boyacá.

Diseño Tecnológico y Propuesta de Vagones

1. Características térmicas requeridas

Los arándanos, como producto principal de este proyecto, requieren un estricto control de temperatura para conservar su frescura, calidad y valor comercial. Para garantizar su integridad durante el transporte, es fundamental mantenerlos en un rango de temperatura ideal de entre 2 °C y 5 °C. La tecnología de vagones refrigerados inteligentes propuesta para el SIZFF-Boyacá, potenciada por la inteligencia artificial Gemini de Google, estará diseñada para mantener este rango térmico de manera precisa y constante, minimizando las pérdidas poscosecha y optimizando la cadena de frío desde el punto de origen hasta el destino final.

2. Dimensiones y estructura del vagón

El diseño conceptual del vagón inteligente para el transporte de arándanos parte de un modelo estándar de caja cerrada de 40 pies, adaptado con tecnologías avanzadas para optimizar la cadena de frío y reducir los costos logísticos. Sus características principales son:

- 1. Aislamiento térmico de alta eficiencia:** El vagón contará con un aislamiento de paneles de poliuretano (PU) de 100 mm de grosor. Este material minimiza la pérdida de frío, asegurando que la temperatura ideal para los arándanos (2 °C a 5 °C) se mantenga con el menor consumo energético posible, lo cual impacta directamente en la reducción de costos operativos.

2. **Sistema de refrigeración inteligente:** Se implementará un sistema de refrigeración activo, alimentado por una fuente de energía híbrida (eléctrica y diésel). Este sistema será gestionado por un algoritmo de la IA Gemini de Google, que ajustará la potencia de refrigeración en función de las condiciones internas y externas para optimizar el consumo de energía y mantener la temperatura óptima de los arándanos.

3. **Sensorización IoT y monitoreo en tiempo real:** El vagón estará equipado con sensores IoT de temperatura, humedad y estado de puertas. La IA Gemini de Google procesará estos datos en tiempo real, lo que permitirá una trazabilidad completa del producto y alertará sobre cualquier desviación de las condiciones ideales. Este monitoreo reduce el riesgo de pérdidas de la carga y los costos asociados a productos deteriorados.

4. **Capacidad optimizada y seguridad:** El vagón tendrá una capacidad estimada de 20 a 24 toneladas netas de arándanos. Además, estará dotado de un piso de aluminio sanitario antideslizante y un sistema de drenaje para la condensación, lo que garantiza la higiene y la seguridad de la carga.

Véase Figura 1 y Figura 2

3. Integración con estaciones de carga

La operación eficiente del SIZFF-Boyacá requiere de la integración de las estaciones logísticas con los vagones inteligentes para el transporte de arándanos. Cada subcentro logístico estratégico (por ejemplo, en Duitama, Paipa o Nobsa) estará equipado con plataformas de carga que incluyan muelles niveladores y puertas térmicas herméticas. Esto permitirá un trasbordo directo desde las cámaras frías fijas hacia los vagones, garantizando que el tiempo de carga no supere los 45 minutos. Este proceso optimizado, respaldado por la planificación de la IA Gemini de Google, es crucial para minimizar el riesgo de ruptura de la cadena de frío, lo cual es vital para

la calidad de los arándanos, y para reducir los costos asociados a los tiempos de espera y a la pérdida de producto (Cárdenas & Pérez, 2022).

4. Consideraciones técnicas de diseño en altura

El transporte de arándanos en el departamento de Boyacá enfrenta el desafío técnico de las altas altitudes, que superan los 2.500 m.s.n.m. En estas condiciones, la menor densidad del aire y las fluctuaciones de la temperatura ambiente exigen que el sistema de refrigeración de los vagones inteligentes sea capaz de adaptarse automáticamente. Para resolver este problema, la inteligencia artificial Gemini de Google será la encargada de gestionar los ajustes de presión y compensación térmica del sistema. La IA analizará en tiempo real las condiciones ambientales externas e internas para asegurar la estabilidad térmica necesaria para los arándanos, tanto en zonas de clima templado como en las altitudes más elevadas. Esto garantiza una cadena de frío ininterrumpida, reduciendo el riesgo de pérdidas del producto y los costos asociados a su deterioro (FAO, 2023).

Véase Figura 3

5. Compatibilidad con normativas sanitarias y logísticas

El modelo de vagón cumple con:

- Resolución 2674 de 2013 (Invima) sobre transporte de alimentos refrigerados.
- Normas ISO 1496-2 e ISO 17712 para contenedores y sellos de seguridad.
- Compatibilidad con el registro ICA y el Certificado de Origen para facilitar procesos de exportación (DIAN, 2022).

Véase Figura 1, Figura 2 y Figura 3



Figura 1. Representación de vagón refrigerado con paneles solares

Nota: Imagen generada con IA mediante el prompt “Side view of a modern refrigerated train wagon painted white, with solar panels on top and the official logo of the Gobernación de Boyacá, parked on railway tracks under a blue sky.” usando DALL·E 3 (OpenAI, 2025).



Figura 2. Representación de la entrada al vagón refrigerado

Imagen generada con IA mediante el prompt “Rear view of a white refrigerated train wagon with a metallic door and access ladder, on railway tracks in a rural setting, minimalist design.” usando DALL·E 3 (OpenAI, 2025).



Figura 3. Representación del interior del vagón refrigerado

Imagen generada con IA mediante el prompt “Interior of a refrigerated train container with neatly stacked cardboard boxes labeled “BLUEBERRY” placed on wooden pallets along both sides, clean and sterile lighting, smooth white walls, gray non-slip flooring, security cameras mounted on the ceiling, and a well-lit, temperature-controlled environment designed for fresh produce storage.” usando DALL-E 3 (OpenAI, 2025).

Para garantizar la operatividad eficiente y la trazabilidad del transporte de arándanos, el proyecto SIZFF-Boyacá integra tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y sensores inteligentes. Los vagones refrigerados estarán equipados con sensores de temperatura y humedad que muestrean las condiciones internas cada 5-10 minutos, lo que permite a la inteligencia artificial Gemini de Google detectar de forma proactiva cualquier desviación de los rangos críticos (2–5 °C) para los arándanos y generar alertas tempranas (Rivera, González & Castillo, 2023). Adicionalmente, se utilizarán etiquetas RFID activas asociadas a cada lote de arándanos, las cuales transmiten la ubicación y la hora de paso en cada estación. La IA Gemini de Google procesa esta

información para agilizar el control de inventarios, optimizar la planificación de rutas y reducir los errores de registro, lo que se traduce en una reducción de costos y una mejora de la eficiencia logística del 40% (Cárdenas & Pérez, 2022).

Mantenimiento predictivo basado en IA:

Una de las ventajas competitivas clave del SIZFF-Boyacá es la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en la inteligencia artificial Gemini de Google. A través de algoritmos de machine learning, la IA analizará continuamente los datos de vibración y los registros de temperatura de los equipos de refrigeración y el chasis de los vagones. Esta capacidad de análisis le permitirá a la IA proyectar fallas potenciales con semanas de anticipación, lo que evita paradas no planificadas, reduce drásticamente los costos de reparación y garantiza la continuidad del servicio de transporte de arándanos (Fernández & Suárez, 2023). Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye directamente a la reducción de los costos logísticos a largo plazo.

De la misma manera, se proponen 3 fases para estructurar el cronograma en fases multianuales:

Fase 1 (2025): Pilotaje en Paipa–Belencito

Durante esta fase inicial, el objetivo es validar la propuesta tecnológica y económica con un piloto enfocado en el transporte de arándanos. Las actividades clave incluyen la instalación de rieles de alta capacidad, la configuración de los vagones inteligentes con la tecnología de la IA de Google Gemini y los sensores IoT, y la realización de pruebas operativas con carga real de arándanos. Los responsables de esta fase serán la Gobernación de Boyacá, la ANI y el Operador Ferroviario (Acerías Paz del Río), con los hitos de la finalización de las obras a mitad de 2025 y

el primer viaje de prueba para finales de año, lo que permitirá la recolección de datos sobre la reducción de costos, tiempos y emisiones.

Fase 2 (2026): Evaluación y expansión a Bogotá

En la segunda fase, se analizarán los resultados del piloto para realizar los ajustes técnicos necesarios que garanticen una mayor reducción de costos y eficiencia. Se capacitará al personal operativo y aduanero de la DIAN para el manejo del sistema inteligente. Esta fase se centrará en la expansión de la infraestructura en las terminales de Bogotá y Tunja para ampliar la capacidad de transporte de arándanos. Los responsables serán la Secretaría de Desarrollo Empresarial, el MinTransporte, la DIAN y ProColombia. El hito principal será el inicio de las operaciones ampliadas en el corredor Bogotá–Belencito para finales de 2026.

Fase 3 (2027 en adelante): Escalamiento nacional e integración multimodal

Esta fase de escalabilidad busca consolidar el SIZFF-Boyacá como un modelo logístico replicable a nivel nacional, maximizando la reducción de costos para el transporte de arándanos en otros corredores. Se definirán nuevos corredores ferroviarios prioritarios (como Medellín o Cali) y se firmarán convenios público-privados para la financiación del proyecto. Los responsables de esta etapa serán la Gobernación de Boyacá, la ANI, la DIAN, el Ministerio de Hacienda y las Asociaciones Productivas. El principal hito será la puesta en marcha del primer hub intermodal tren-camión, lo que permitirá una mayor flexibilidad y eficiencia en la cadena de suministro de arándanos, además de la implementación de incentivos para el transporte ferroviario.

Impactos y Limitaciones

Impactos esperados del proyecto

El SIZFF-Boyacá está diseñado para generar una transformación multidimensional en la economía y logística de Boyacá, con impactos positivos que van más allá del ámbito técnico. El proyecto se centra en crear una cadena de suministro de arándanos que sea no solo eficiente, sino también económicamente viable y sostenible. La implementación de vagones inteligentes con la IA Gemini de Google servirá como el eje central para alcanzar estos objetivos, permitiendo una trazabilidad precisa y una gestión optimizada de la cadena de frío, lo cual es vital para el valor de este producto.

La principal contribución del proyecto es la reducción de costos logísticos. Al utilizar el transporte ferroviario, que es significativamente más económico que el terrestre, el SIZFF-Boyacá promete un ahorro de hasta el 52% en los costos por tonelada. Este ahorro se traduce directamente en una mayor rentabilidad para los productores de arándanos, lo que les permite ser más competitivos en los mercados de exportación. Además, la IA de Google Gemini minimizará las pérdidas post-cosecha al garantizar que los arándanos se mantengan en su temperatura ideal (2°C-5°C), lo que reduce los gastos asociados al deterioro y al desperdicio de la carga.

En el ámbito económico, el proyecto impulsará el crecimiento regional al generar nuevas oportunidades de empleo especializado en logística y tecnología. Esto posicionará a Boyacá como un centro logístico clave y fomentará el desarrollo de capacidades técnicas locales. El SIZFF-Boyacá, con la IA Gemini de Google como su cerebro operativo, representa un modelo de desarrollo que es económicamente inteligente, socialmente equitativo y ambientalmente responsable.

Impacto socioeconómico

1. Generación de empleo local

La implementación del SIZFF-Boyacá impulsará la creación de empleo directo e indirecto en el departamento, con un enfoque en la especialización de la mano de obra para el transporte de arándanos. La construcción de la infraestructura, incluyendo la instalación de rieles y el desarrollo de centros logísticos equipados con tecnología de Google Gemini, activará sectores como la ingeniería y la manufactura de vagones. En la fase de operación, el sistema demandará personal técnico capacitado en la gestión de la cadena de frío, el mantenimiento de los vagones inteligentes y la supervisión del software de la IA. Estos nuevos roles contribuirán a formalizar el empleo regional y a fortalecer las capacidades locales, lo que posicionará a Boyacá como un centro logístico clave y competitivo.

2. Competitividad exportadora

El SIZFF-Boyacá potenciará la competitividad de Boyacá para la exportación de arándanos. Al reducir los costos logísticos por tonelada hasta en un 52% en comparación con el transporte terrestre, el proyecto amplía significativamente el margen competitivo de los productores en mercados internacionales. La eficiencia del sistema, habilitada por la IA Gemini de Google, no solo garantiza una cadena de frío ininterrumpida y una reducción de pérdidas, sino que también ofrece una opción de transporte más sostenible. Esta conectividad más eficiente y de menor huella de carbono incentivará la inserción de los arándanos boyacenses en cadenas globales de valor que demandan productos de alta calidad y con procesos logísticos responsables.

3. Bienestar social y equidad

El SIZFF-Boyacá, al formalizar empleo en el sector de la logística y la tecnología, impulsa la movilidad laboral hacia trabajos de mayor estabilidad y seguridad para la región. Este enfoque en la capacitación técnica, especialmente en el manejo de sistemas inteligentes y la IA Gemini de Google, contribuirá al desarrollo de un capital humano especializado. Además, la mejora en la sostenibilidad ambiental y la reducción de la congestión vial, al priorizar el transporte ferroviario de arándanos, impactan positivamente la calidad de vida de las comunidades locales. El proyecto, por lo tanto, no solo es una propuesta técnica y económica, sino un catalizador para el bienestar social y la equidad en el departamento.

- Cambios operativos y logísticos: Se espera que el SIZFF-Boyacá genere una transformación operativa y logística significativa. La implementación del sistema de vagones inteligentes y el uso de la IA de Google Gemini para la planificación de rutas reducirán el tiempo de tránsito y elevarán la eficiencia operativa en el transporte de carga. Esto se traduce en una mejora en los tiempos de entrega de los arándanos y una mayor fiabilidad del servicio, lo que es esencial para un producto perecedero, y contribuye a la reducción de costos de toda la cadena de suministro.
- Beneficios socioeconómicos locales: La integración de empresas productoras locales de arándanos en el SIZFF-Boyacá dinamizará la economía regional, fomentará el empleo y mejorará la competitividad de las exportaciones. La reducción de costos que ofrece el sistema permitirá a los productores aumentar su margen de ganancia y acceder a nuevos mercados.
- Reducción de pérdidas postcosecha: La implementación de vagones inteligentes con la IA de Google Gemini, que aseguran la cadena de frío, permitirá reducir las pérdidas de arándanos postcosecha. Se estima que las pérdidas podrían disminuir del 12% a menos del

5% en el primer año de operación, lo que representa un ahorro significativo y una mejora en la calidad del producto.

Limitaciones identificadas

Escalabilidad limitada por presupuesto y financiación

La principal limitación del proyecto SIZFF-Boyacá es su dependencia de la financiación, tanto pública como privada, para su expansión. La viabilidad de la escalabilidad del sistema, desde el corredor inicial hasta la conexión con Bogotá y otros centros logísticos, está condicionada a la obtención de recursos. Para mitigar este riesgo, el proyecto propone la búsqueda activa de alianzas público-privadas estratégicas y la diversificación de fuentes de cofinanciación, como créditos verdes o incentivos ambientales. La probada reducción de costos en el transporte de arándanos que ofrece el modelo, con el respaldo de la IA de Google Gemini, se presenta como un argumento sólido para atraer esta inversión, garantizando la sostenibilidad financiera y la expansión del modelo.

Restricciones metodológicas o técnicas

Una limitación técnica inherente al proyecto radica en la fiabilidad de las variables críticas para el transporte de arándanos, como la integridad de la cadena de frío y la eficiencia energética. Los sistemas de monitoreo basados en sensores IoT pueden presentar fallos tecnológicos, desviaciones en la calibración o degradación con el tiempo, lo que podría introducir sesgos o imprecisiones en los datos recolectados. Para prevenir que estos problemas afecten la calidad del producto y la promesa de reducción de costos, el SIZFF-Boyacá propone una solución proactiva.

La inteligencia artificial Gemini de Google no solo procesará la información de los sensores en tiempo real, sino que también implementará algoritmos de validación cruzada. Esto significa

que la IA comparará las lecturas de múltiples sensores en cada vagón para detectar anomalías o discrepancias de forma inmediata. A través del aprendizaje automático, Gemini será capaz de identificar patrones de falla o el "drift" (la desviación gradual de la lectura de un sensor) mucho antes de que se produzca una ruptura de la cadena de frío. Esto permitirá un mantenimiento predictivo más avanzado, ya que el sistema no solo alertará sobre una falla, sino que también sugerirá una recalibración o reemplazo del componente específico. De esta manera, se garantiza una precisión metodológica superior, asegurando la calidad del producto final y la fiabilidad de la data utilizada para la comparativa de costos.

Limitaciones temporales y operativas

El cronograma multianual del SIZFF-Boyacá, aunque planificado detalladamente, enfrenta el riesgo de demoras operativas o temporales causadas por factores externos como la obtención de licencias, la ejecución de obras de infraestructura o desacuerdos institucionales. Para mitigar estos riesgos y asegurar la puntualidad del proyecto, que es crucial para el transporte de arándanos y la promesa de reducción de costos, se establece la necesidad de una gestión rigurosa. Es indispensable definir cláusulas contractuales claras con los actores responsables desde el inicio, como la ANI y los operadores ferroviarios, y establecer indicadores de avance trimestrales que permitan un monitoreo constante y una rápida toma de decisiones. Este enfoque proactivo permitirá ajustar las fases del proyecto de manera oportuna, garantizando su culminación dentro de los plazos establecidos.

Factores externos e incertidumbre regulatoria

Cambios en política pública, regulaciones ambientales o tarifas de transporte pueden afectar las proyecciones, ya que los resultados del modelo podrían no mantenerse bajo nueva

normativa así que se ha de diseñar el sistema con flexibilidad técnica y legal, anticipando escenarios regulatorios.

Plan de Mejora

Fortalecimiento de la Infraestructura Ferroviaria

El plan de mejora del SIZFF-Boyacá inicia con una acción fundamental: acelerar la ejecución del plan de modernización del corredor férreo Bogotá-Belencito. El indicador clave (KPI) para esta acción es la reducción significativa de los tiempos de tránsito, lo que hará el transporte ferroviario de arándanos más competitivo frente al terrestre. La adecuación de los rieles a un estándar de alta capacidad permitirá que los trenes alcancen una mayor velocidad operativa y transporten una mayor cantidad de vagones inteligentes. Este beneficio directo, de gran impacto en la reducción de costos y la eficiencia de la cadena de suministro, es un pilar fundamental para demostrar la viabilidad del proyecto.

Integración Tecnológica Avanzada

El plan de mejora del SIZFF-Boyacá incluye una acción estratégica: recolectar y analizar datos históricos de la producción y exportación de arándanos en Boyacá. El objetivo es proyectar la demanda futura y, con base en esta información, determinar la capacidad de vagones y recursos necesarios para el transporte. El indicador clave (KPI) de esta acción será la precisión de la proyección de la demanda. El beneficio principal es la alineación de la capacidad de transporte del sistema inteligente con la demanda real del sector, previniendo así cuellos de botella y optimizando el uso de la infraestructura y los recursos, lo que contribuye directamente a la reducción de costos operativos.

Promoción y Articulación Estratégica

Para asegurar la sostenibilidad del SIZFF-Boyacá y la reducción de costos, se promoverán alianzas público-privadas con actores clave como la Gobernación, la ANI y las asociaciones de productores de arándanos. Estas alianzas son fundamentales para incentivar la construcción de infraestructura adyacente a la vía férrea y para el desarrollo de campañas de sensibilización sobre los beneficios del transporte ferroviario. El indicador clave (KPI) será el aumento de las toneladas de arándanos transportadas por ferrocarril, lo que evidenciará la adopción del modelo y la efectividad de la reducción de costos gracias a la gestión inteligente con la IA Gemini de Google.

Conclusiones

Síntesis de los hallazgos

El proyecto SIZFF-Boyacá demuestra una viabilidad técnica y económica superior para optimizar la logística de transporte de arándanos en la región de Boyacá. Los hallazgos del estudio confirman que la modernización del corredor férreo Bogotá-Belencito, apoyada por la innovación tecnológica, no solo es una alternativa competitiva, sino una solución transformadora. El uso de vagones refrigerados inteligentes, gestionados por la inteligencia artificial Gemini de Google, es el pilar tecnológico que garantiza una cadena de frío ininterrumpida y una trazabilidad precisa, aspectos críticos para la integridad de un producto de alto valor como el arándano. Esto se traduce en una reducción significativa de las pérdidas postcosecha y, consecuentemente, en una mejora sustancial de la rentabilidad para los productores locales.

Los datos comparativos validan la premisa de la reducción de costos logísticos como principal beneficio del proyecto. La transición del transporte terrestre al ferroviario no solo ofrece un ahorro económico tangible, proyectado en una disminución de los costos de hasta un 52%, sino que también genera un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental, al reducir las emisiones de CO₂. Esta propuesta de valor dual, centrada en la eficiencia y la responsabilidad ambiental, posiciona al SIZFF-Boyacá como un modelo de negocio sostenible y atractivo para futuras alianzas público-privadas.

En un nivel estratégico, el proyecto trasciende la simple optimización logística y se erige como un catalizador para el desarrollo regional. Al vincular la producción agroindustrial de arándanos con una infraestructura de transporte inteligente, el SIZFF-Boyacá establece un precedente para la competitividad exportadora de Boyacá. La capacidad de escalabilidad del

modelo, demostrada a través de un plan por fases, sugiere que esta solución podría replicarse con éxito en otros corredores del país, consolidando a Boyacá como un referente en logística inteligente y un líder en la implementación de tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial.

Recomendaciones concretas

Para asegurar el éxito y la sostenibilidad del SIZFF-Boyacá, se recomienda implementar las siguientes acciones, enfocadas en consolidar las alianzas, fortalecer el capital humano y garantizar la viabilidad a largo plazo del proyecto.

1. Establecer alianzas estratégicas con actores clave: Es fundamental consolidar convenios formales con la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) para el uso del corredor férreo y con Acerías Paz del Río, operador habilitado de la línea, para asegurar la operación logística. Estas alianzas son vitales para el desarrollo de la infraestructura y para la reducción de costos que el proyecto promete para el transporte de arándanos.
2. Gestionar formación técnica local: La implementación de un sistema de vagones inteligentes con la IA Gemini de Google requiere un capital humano especializado. Se recomienda implementar planes de capacitación en logística ferroviaria, operación de sensores IoT y mantenimiento de sistemas de refrigeración en alianza con instituciones de educación superior como la UPTC. Esto asegurará que el proyecto tenga el talento local necesario para su operación eficiente.
3. Diseñar una hoja de ruta para la escalabilidad y sostenibilidad: Se debe desarrollar un plan multianual con metas claras e indicadores de desempeño monitoreables. Esta hoja de ruta debe incluir la exploración de fuentes de cofinanciación, como créditos verdes o beneficios tributarios, que permitan la expansión del sistema a otros corredores y consoliden su posición como un modelo logístico sostenible. El éxito demostrado en la

reducción de costos para el transporte de arándanos será el principal argumento para atraer esta financiación.

Hallazgos y Recomendaciones

Hallazgos

El análisis del proyecto SIZFF-Boyacá ha revelado hallazgos significativos que fundamentan su viabilidad y necesidad. El transporte ferroviario en el corredor Bogotá-Belencito ofrece una ventaja competitiva al proyectar un ahorro de entre 15% y 26% en los costos de carga en comparación con el transporte terrestre. Esta eficiencia económica posiciona al tren como la opción logística ideal para el transporte de grandes volúmenes de arándanos.

El proyecto se beneficia de una oportunidad de modernización con inversión asegurada por parte de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). La producción de arándanos en Boyacá, que requiere un estricto control de la cadena de frío, hace que el SIZFF-Boyacá sea una solución estratégica para mantener la calidad e inocuidad del producto. La implementación de sensores IoT, gestionados por la IA Gemini de Google, permite el monitoreo en tiempo real, lo que reduce las pérdidas por fluctuaciones de temperatura y mejora la eficiencia operativa.

La sólida evaluación estratégica del proyecto, evidenciada por una puntuación de 3.50 en la Matriz MEFÉ, confirma su posición favorable para capitalizar oportunidades externas, como la creciente demanda de productos de la región y la voluntad política para la modernización ferroviaria. El proyecto se proyecta como una solución multidimensional, ya que la reducción de costos de hasta el 52% por tonelada se complementa con la creación de empleo calificado y una mejora en la competitividad del departamento en los mercados internacionales.

Recomendaciones

Para maximizar el impacto y asegurar el éxito del proyecto SIZFF-Boyacá, se formulan las siguientes recomendaciones estratégicas y operativas:

1. **Priorización de la modernización ferroviaria:** La Gobernación de Boyacá, en coordinación con la ANI, debe asegurar la aceleración de las obras en el corredor Bogotá-Belencito. Es crucial la instalación de rieles de alta capacidad para aumentar la velocidad y capacidad de carga, lo cual impacta directamente en la reducción de costos y la competitividad para el transporte de arándanos. Se recomienda la implementación de un dashboard de monitoreo que valide las mejoras en tiempo real.
2. **Creación de una Zona Franca Ferroviaria Estratégica:** Se recomienda la creación de una Zona Franca Permanente Especial (ZFPE) entre Paipa y Duitama. Esta zona servirá como un punto de consolidación para los arándanos, donde se aplicarán procesos de refrigeración y embalaje con trazabilidad digital. Este enfoque optimiza la logística, reduce la manipulación de la carga y minimiza los riesgos de pérdida de producto.
3. **Integración de tecnologías 4.0 con IA de Google Gemini:** Es fundamental la implementación de vagones refrigerados inteligentes con sensores IoT y sistemas de refrigeración híbridos. La IA Gemini de Google será el componente central para la gestión del WMS y el TMS, optimizando rutas y horarios para reducir tiempos de espera y costos operativos. La IA también se utilizará para el mantenimiento predictivo de los equipos, garantizando una operación continua y sin fallas para el transporte de los arándanos.

4. Articulación institucional y aseguramiento de financiación: La Secretaría de Desarrollo Empresarial debe liderar la coordinación entre todos los actores clave, incluyendo la DIAN y las asociaciones de productores de arándanos. Esta articulación es vital para asegurar la consecución de fuentes de financiación público-privadas que permitan la expansión del modelo, demostrando su viabilidad a través de la probada reducción de costos y su impacto en la competitividad regional.

Referencias

Agencia Nacional de Infraestructura – ANI. (2025, mayo 4). Inicio de obras para reforzar el corredor férreo Bogotá–Belencito. *Agencia Nacional de Infraestructura*. <https://www.ani.gov.co/inicia-reforzamiento-del-corredor-ferreo-bogota-belencito>

Cambio Colombia. (2025, mayo 4). Comienza la renovación de 40 kilómetros del corredor férreo entre Bogotá y Belencito. *Cambio Colombia*. <https://cambiocolombia.com/pais/comienza-la-renovacion-de-40-kilometros-del-corredor-ferreo-entre-bogota-y-belencito>

Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2025, 18 de junio). El DNP le apuesta al fortalecimiento de capacidades técnicas de proyectos ferroviarios [Comunicado de prensa]. https://www.dnp.gov.co/Prensa_/Noticias/Paginas/dnp-apuesta-fortalecimiento-capacidades-tecnicas-proyectos-ferroviarios.aspx

Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales – DIAN. (2022). *Régimen legal de zonas francas en Colombia* [Archivo PDF]. <https://www.dian.gov.co/dian/cifras/Cuadernos%20de%20Trabajo/Caracterizaci%C3%B3n%20del%20r%C3%A9gimen%20de%20zonas%20francas%20en%20Colombia.pdf>

El Colombiano. (2024, 2 de mayo). Reactivar el tren avanza a toda velocidad en Colombia: Empresas ahorrarán plata y contaminarán menos. *El Colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/negocios/transporte-en-tren-mas-barato-menos-congestion-y-menor-huella-de-carbono-CM24397555>

El Tiempo. (2024, 30 de junio). Gobierno habilitó a Acerías Paz del Río como operador de transporte ferroviario de pasajeros. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-7395247>

Kshetri, N. (2021). Blockchain's roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy.

Telecommunications Policy, 45(9), 102198. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102198>

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2021). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.01.003>

Ministerio de Transporte de Colombia. (2020). *Actualización y armonización sobre la política tarifaria de los servicios de transporte de carga en los modos carretero, férreo y fluvial* [Archivo PDF].

<https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Estudios%20BID/20201211%20-%20Pol%C3%ADtica%20Tarifaria%20P5.pdf?ver=2024-08-02-151945-537>

Ministerio de Transporte de Colombia. (2024, 27 de junio). Ministerio de Transporte habilitó a la empresa Acerías Paz del Río para el transporte ferroviario de pasajeros.

<https://mintransporte.gov.co/publicaciones/11762/ministerio-de-transporte-habilito-a-empresa-acerias-paz-del-rio-para-el-transporte-ferroviario-de-pasajeros/>

Portafolio. (2025, mayo 4). Inicio de obras para reforzar el corredor férreo Bogotá–Belencito.

Portafolio. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/inicio-de-obras-para-reforzar-el-corredor-ferreo-bogota-belencito-629348>

ProColombia. (2024). *Exportaciones: Boyacá gana más mercados* [Archivo PDF].

https://procolombia.co/sites/default/files/2024-05/cartilla_boyaca_2014mayo04_2339_baja.pdf

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC. (s. f.). Mintransporte, academia y empresarios le apuntan al corredor férreo en Boyacá. *UPTC Noticias*.

https://www.uptc.edu.co/sitio/portal/cal_not_eve/noticias/det/Mintransporte-academia-y-empresarios-le-apuntan-al-corredor-ferreo-en-Boyaca/