

Impact of Road Roughness (IRI) on Banana Transport Logistics: Rural Roads in Ecuador

Chuchuca-Aguilar, Fidel¹; Aguilar Cando, Stefany¹; Parrales-Klinger, Nimia¹; Guerrero Grijalva, Juan¹;
Cajamarca Palma, Luis¹; Garcia Cevallos, Jorge¹

¹Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Ecuador, fchuchuca@uteg.edu.ec, stefyawilar@gmail.com,
nimia1295@gmail.com, facultadingenierias@uteg.edu.ec, docenteprofesionalizacion@uteg.edu.ec,
tecnico_docente01@uteg.edu.ec

Abstract– Rural road infrastructure, critical for the logistics "first mile", is a critical determinant for the competitiveness of agricultural supply chains in developing countries. This study evaluates the impact of road surface conditions on the logistics efficiency of banana transport in the San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja corridor, Ecuador. A mixed-method approach was employed, integrating technical measurement of the International Roughness Index (IRI) using accelerometric sensors and GPS (RoadLab Pro), with a qualitative analysis based on interviews with local logistics stakeholders. The results reveal a significant structural gap: the unpaved section presents a weighted average IRI of 9.17 m/km (classified as "Very Poor"), severely limiting operating speeds and damaging vehicle fleets, whereas the paved section records an IRI of 4.34 m/km ("Fair"). The analysis confirms that high roughness, exacerbated by the lack of drainage works at critical points, leads to total supply chain disruption during the rainy season, causing product loss and cost overruns. It is concluded that priority intervention must integrate hydraulic works alongside pavement rehabilitation to ensure the logistical resilience of the export sector.

Keywords– Rural logistics, International Roughness Index (IRI), Agricultural supply chain, Freight transport, RoadLab Pro.

Impacto de la Rugosidad Vial (IRI) en la Logística del Transporte de Banano: Vías Rurales del Ecuador

Chuchuca-Aguilar, Fidel¹; Aguilar Cando, Stefany¹; Parrales-Klinger, Nimia¹; Guerrero Grijalva, Juan¹
Cajamarca Palma, Luis¹; Garcia Cevallos, Jorge¹

¹Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Ecuador, fchuchuca@uteg.edu.ec, stefyawilar@gmail.com,
nimia1295@gmail.com, facultadingenierias@uteg.edu.ec, docenteprofesionalizacion@uteg.edu.ec,
tecnico_docente01@uteg.edu.ec

Resumen— La infraestructura vial rural crítica para la “primera milla” logística, constituye un factor crítico para la competitividad de las cadenas de suministro agrícola en países en vías de desarrollo. Este estudio evalúa el impacto de la condición superficial de la vía en la eficiencia logística del transporte de banano en el corredor San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja, Ecuador. La metodología adoptó un enfoque mixto, integrando la medición técnica del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) mediante sensores acelerométricos y GPS (RoadLab Pro), con un análisis cualitativo basado en entrevistas a actores logísticos locales. Los resultados revelan una marcada brecha estructural: el tramo no pavimentado presenta un IRI promedio ponderado de 9.17 m/km (clasificado como “Muy Malo”), lo que limita severamente la velocidad de operación y daña la flota vehicular; por otro lado, el tramo pavimentado registra un IRI de 4.34 m/km (“Regular”). El análisis confirma que la alta rugosidad, agravada por la inexistencia de obras de drenaje en puntos críticos, provoca la interrupción total de la cadena de suministro durante la temporada invernal, generando pérdidas de producto y sobrecostos. Se concluye que la intervención prioritaria debe integrar obras hidráulicas junto con la rehabilitación del pavimento para garantizar la resiliencia logística del sector exportador.

Palabras clave— Logística rural, Índice Internacional de Rugosidad (IRI), Cadena de suministro agrícola, Transporte de carga, RoadLab Pro.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión logística constituye un elemento central en la administración moderna de las cadenas de suministro, actuando como el sistema integrador que planifica, implementa y controla el flujo eficiente de bienes, servicios e información desde el punto de origen hasta el consumo final [1]. En este contexto, el transporte no funciona simplemente como un medio de movilidad física, sino como un determinante estratégico de la competitividad territorial; tal como lo define la geografía del transporte, las variables de distancia, espacio y tiempo condicionan directamente la organización de los sistemas productivos y su capacidad de inserción en los mercados globales [2].

Sin embargo, en las economías emergentes de América Latina, la logística enfrenta desafíos estructurales severos en lo que se conoce como la “primera milla” o logística rural. A pesar de que la región es una potencia agroexportadora, la infraestructura vial terciaria, aquella que conecta las fincas con las redes estatales principales, suele presentar altos niveles de precariedad. Evidencia reciente del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) sugiere que la falta de pavimentación y el mantenimiento deficiente no solo elevan los costos operativos

vehiculares, sino que incrementan las mermas de productos perecederos y limitan la participación de pequeños productores en cadenas de valor dinámicas [3].

El caso de Ecuador es paradigmático en este escenario. Siendo el banano uno de los principales rubros de exportación no petrolera del país, la eficiencia de su cadena de suministro es vital para la economía nacional. No obstante, la realidad operativa en zonas rurales de la Costa, como la provincia del Guayas, demuestra que la infraestructura no siempre acompaña al volumen productivo. Aunque durante la década 2007-2016 el país ejecutó una inversión pública significativa en vialidad, estimada en más de USD 1.600 millones para provincias estratégicas, estudios posteriores indican que la mera construcción de carreteras es insuficiente si no se garantiza su resiliencia y transitabilidad permanente [4]. La literatura especializada señala que la infraestructura vial es una condición necesaria, pero no suficiente para el desarrollo rural si no se gestiona integralmente su mantenimiento frente a factores climáticos y cargas pesadas [5].

La problemática se agudiza por la falta de herramientas objetivas para diagnosticar el estado de estas vías secundarias. Tradicionalmente, la evaluación de la regularidad superficial se realiza mediante el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), un estándar establecido por el Banco Mundial para cuantificar la desviación del perfil longitudinal de la vía y su impacto en la dinámica vehicular [6]. Históricamente, la medición del IRI requería perfilómetros láser o equipos inerciales de alto costo, inaccesibles para los gobiernos locales o gestores de caminos rurales. Sin embargo, la evolución de la tecnología móvil ha permitido el surgimiento de herramientas de “Clase III” como *RoadLab Pro*, que utilizan los acelerómetros y GPS de teléfonos inteligentes para realizar auditorías viales de bajo costo y alta precisión relativa [7], [8].

El presente estudio aborda esta brecha técnica y operativa mediante un análisis del tramo “San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja”. Este corredor logístico presenta una dicotomía estructural: combina segmentos pavimentados que conectan con puertos de aguas profundas, con tramos de tierra críticos que, durante la temporada invernal, sufren interrupciones por desbordamientos hidráulicos. El objetivo de la investigación es evaluar cuantitativamente la influencia de la rugosidad vial (IRI) en la eficiencia del transporte de banano, contrastando las mediciones técnicas con la percepción de los actores logísticos locales. Se busca demostrar que la degradación de la infraestructura actúa como un “costo oculto” que erosiona la competitividad agrícola,

proponiendo intervenciones basadas en datos para asegurar la continuidad del flujo logístico.

II. METODOLOGÍA

La investigación se fundamentó en un diseño riguroso de carácter no experimental y alcance descriptivo, dado que no hubo manipulación deliberada de las variables independientes, sino que se procedió a la observación y registro de los fenómenos en su entorno natural y en un contexto operativo real. El corte temporal fue transversal, recolectando la data en un periodo único y específico para generar un diagnóstico situacional del estado de la infraestructura.

El enfoque metodológico adoptado fue de naturaleza mixta (cualitativo-cuantitativo), integrando la precisión de las mediciones técnicas de ingeniería con la profundidad del análisis social de los actores involucrados en la cadena de suministro.

A. Enfoque Lógico de Investigación

Para el procesamiento de la información y la generación de inferencias, se aplicaron dos métodos lógicos complementarios descritos en el marco procedimental del estudio:

1) *Método inductivo*: Se partió de la observación de hechos particulares, como la presencia de baches específicos, la falta de señalética en puntos críticos y los testimonios individuales de conductores, para identificar patrones generales de comportamiento en la logística rural.

2) *Método deductivo*: Se contrastaron los hallazgos empíricos de campo con los principios teóricos universales de la logística de transporte y las normativas de ingeniería vial, permitiendo validar si el caso de estudio cumple o se desvía de los estándares esperados.

B. Zona de Estudio y Caracterización del Corredor

El análisis espacial se centró en el corredor logístico ubicado en la provincia del Guayas, delimitado por el trayecto que conecta la unidad productiva "Finca San Jorge" con la terminal portuaria de Posorja. La selección de este tramo respondió a un muestreo intencional estratégico, ya que representa la ruta crítica para la exportación de banano en la zona.

El corredor atraviesa las comunidades de San Lorenzo del Mate y El Progreso, presentando una dualidad estructural que permitió el análisis comparativo: una sección de "primera milla" sin pavimentar, altamente susceptible a factores hidrometeorológicos, y una sección de conexión pavimentada que enlaza con la red estatal primaria

C. Fases del Proceso Investigativo

La ejecución del estudio se sistematizó en un esquema secuencial de seis etapas, conforme al diseño de investigación planteado.

1) *Diseño de la investigación*: Establecimiento del marco teórico y definición de variables (IRI, eficiencia logística).

2) *Recolección de datos de campo*: Levantamiento de información primaria in situ mediante recorridos técnicos.

3) *Medición técnica instrumental*: Aplicación de herramientas digitales para la cuantificación de la rugosidad.

4) *Investigación social (entrevistas)*: Diálogo directo con partes interesadas para validar hipótesis operativas.

5) *Evaluación de seguridad vial*: Auditoría visual de la señalización vertical y horizontal existente.

6) *Procesamiento y análisis*: Triangulación de datos para la generación de conclusiones y propuestas de mejora.

D. Instrumentación y Protocolo Cuantitativo (IRI)

Para la evaluación objetiva de la regularidad superficial de la calzada, se empleó el Índice Internacional de Rugosidad (IRI). La medición se realizó utilizando la aplicación técnica RoadLab Pro, instalada en un dispositivo móvil con sistema operativo Android y sensores acelerométricos calibrados.

1) *Configuración y toma de datos*: El dispositivo operó como un sistema de respuesta tipo RTRRMS (*Response Type Road Roughness Measuring Systems*) de Clase III. Se registraron las aceleraciones verticales del vehículo de prueba inducidas por el perfil de la vía, correlacionándolas con la velocidad y posición obtenidas mediante GPS. Los datos fueron exportados a plataformas de Sistemas de Información Geográfica (Google Earth) para su mapeo y georreferenciación precisa.

2) *Modelo matemático de ponderación*: Dado que la longitud de los intervalos de medición (L_i) varió en función de la velocidad de operación y la cobertura satelital, se descartó el uso de promedios aritméticos simples. Para obtener un indicador representativo del desempeño global de cada tramo, se aplicó la fórmula del IRI Promedio Ponderado

$$IRI_{\text{promedio}} = \frac{\sum (IRI_i * L_i)}{(\sum L_i)} \quad (1)$$

Donde:

IRI_i = Valor de rugosidad (m/km) medido en el intervalo i

L_i = Longitud del intervalo i en metros

$\sum L_i$ = Longitud total evaluada del tramo

E. Protocolo de Evaluación de Seguridad Vial

De manera paralela a la medición de rugosidad, se realizó un inventario exhaustivo de la infraestructura de seguridad vial. Se clasificaron los elementos encontrados según la normativa técnica internacional vigente, evaluando su presencia, visibilidad y estado de conservación en seis categorías específicas:

- Señales Preventivas: Dispositivos de advertencia de peligros (forma de rombo, fondo amarillo).
- Señales Reglamentarias: Dispositivos de regulación de tráfico y prohibiciones (circulares, borde rojo).

- Señales Informativas: Guías de destino y servicios (fondo azul o verde).
- Señales Transitorias: Advertencias temporales por obras o eventos (fondo naranja).
- Señalización Horizontal: Marcas viales sobre el pavimento (líneas, símbolos).
- Dispositivos Complementarios: Elementos de seguridad física como barandas de protección, tachones reflectivos, reductores de velocidad y balizas luminosas.

F. Diseño Cualitativo y Muestra

El componente cualitativo buscó validar el impacto socioeconómico de la infraestructura. Se aplicó una técnica de muestreo no probabilístico intencional para seleccionar a los participantes, garantizando la representatividad de los diferentes roles dentro de la cadena logística.

Para triangular la data técnica, se aplicó un muestreo intencional seleccionando a 5 actores clave ($n = 5$), clasificados en tres niveles de impacto para cubrir la totalidad de la cadena de valor.

1) *Nivel estratégico*: Administradores de unidades productivas (visión de costos).

2) *Nivel operativo*: Conductores y trabajadores agrícolas (visión de funcionalidad).

3) *Nivel social*: Residentes de las comunidades afectadas (visión de bienestar y acceso).

III. RESULTADOS

El levantamiento de información se estructuró en tres fases complementarias: diagnóstico visual in situ, medición instrumental de rugosidad y validación social mediante entrevistas. A continuación, se detallan los hallazgos de cada componente.

A. Diagnóstico Visual y Condiciones de Operabilidad

La inspección técnica realizada a lo largo de los 38.9 km del corredor permitió identificar patologías severas que varían según la tipología de la superficie.

1) *Tramo Finca San Jorge – San Lorenzo del Mate (no pavimentado)*: Este segmento crítico de "primera milla" se caracteriza por una superficie de rodadura en suelo natural (tierra/lastre), carente de obras de drenaje longitudinal y transversal. Durante el recorrido, se evidenció que la calzada presenta una pérdida significativa de material granular debido a la fricción constante de los neumáticos de vehículos pesados (tráileres de 3 ejes). Un hallazgo fundamental fue la identificación de la vulnerabilidad hidráulica en el acceso principal a la unidad productiva. Como se documenta en la Fig. # 1 y Fig. # 2, existe un canal de riego adyacente que opera sin márgenes de seguridad. La evidencia visual confirma que el nivel freático del canal se encuentra peligrosamente cerca de la cota de la rasante. En ausencia de un sistema de alcantarillado, este punto se convierte en un dique de contención durante la temporada invernal, provocando el

anegamiento total de la vía e impidiendo el ingreso de camiones y motocicletas.



Fig. 1 Tramo Finca San Jorge – San Lorenzo del Mate



Fig. 2 Canal de la entrada a la Finca San Jorge

2) *Tramo San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja (pavimentado)*: Aunque este segmento cuenta con carpeta asfáltica, el diagnóstico visual reveló un deterioro funcional avanzado. Se identificaron fallas estructurales tipo "piel de cocodrilo" y hundimientos localizados (baches) de profundidad considerable (ver Fig. # 3 y Fig. # 4). Estos defectos obligan a los conductores a realizar maniobras

evasivas invasivas al carril contrario, incrementando el riesgo de colisión frontal. Adicionalmente, se detectó una deficiencia crítica en la seguridad vial. En el acceso a la localidad de San Lorenzo del Mate, existe un reductor de velocidad físico sin señalización vertical ni pintura reflectiva (Fig. # 5), lo cual representa un peligro latente para la suspensión de los vehículos de carga que transitan en horarios nocturnos.



Fig. 3 Hundimiento en la vía



Fig. 4 Vía deteriorada



Fig. 5 Reductor de velocidad sin pintura ni señalización en el acceso a San Lorenzo del Mate

B. Análisis Cuantitativo del Perfil de Rugosidad (IRI)

La medición instrumental procesada con *RoadLab Pro* generó un total de 409 intervalos válidos de datos. El análisis estadístico descriptivo, desglosado por tramos, revela la magnitud técnica de la brecha de infraestructura.

1) *Análisis del tramo 1 (sin pavimentar)*: Se procesaron 49 intervalos de medición. El cálculo del IRI ponderado arrojó un valor de 9.17 m/km, situando a la vía en la categoría de "Muy Malo" (> 8.0) según la escala del Banco Mundial.

Sin embargo, el promedio oculta la severidad de los picos. Al analizar la base de datos granular, se observa que múltiples intervalos superan los 10 m/km, indicando falla funcional total:

- Intervalo 18: IRI de 11.16 m/km.
- Intervalo 21: IRI de 9.78 m/km.
- Intervalo 11: IRI de 9.65 m/km.

Estos valores demuestran que el vehículo de carga está sometido constantemente a fuerzas de torsión y vibración destructiva, lo que explica las quejas sobre daños mecánicos reportadas por los usuarios.

2) *Análisis del Tramo 2 (pavimento)*: Se procesaron 360 intervalos. Aunque el IRI promedio ponderado fue de 4.34 m/km (Clasificación: Regular), la desviación estándar es alta, lo que indica una superficie heterogénea.

Mientras que gran parte de la vía presenta condiciones aceptables ($IRI < 3.5$), existen puntos de ruptura crítica que coinciden con los baches identificados visualmente. El registro detallado de intervalos muestra picos alarmantes en plena vía asfaltada:

- Intervalo 444: IRI de 10.65 m/km (Pico máximo en asfalto).
- Intervalo 424: IRI de 9.52 m/km.
- Intervalo 458: IRI de 8.65 m/km.

La presencia de segmentos con $IRI > 9$ en una vía donde la velocidad de operación esperada es de 60 km/h constituye un factor de riesgo mortal, ya que la capacidad de frenado se ve comprometida por la pérdida de contacto neumático-superficie.

TABLA I
RESUMEN ESTADÍSTICO DEL IRI POR TRAMO

Indicador	Tramo 1 (Sin pavimentar)	Tramo 2 (Asfalto)
IRI Promedio Ponderado	9.17 m/km	4.34 m/km
Clasificación Técnica	Muy Malo	Regular
IRI Máximo Registrado	11.16 m/km	10.65 m/km
IRI Mínimo Registrado	6.97 m/km	1.25 m/km
Longitud Evaluada	~3.0 km	~38.9 km
Velocidad Operativa Prom.	< 15 km/h	40 - 60 km/h

C. Resultados del Análisis Cualitativo (Entrevistas)

La triangulación con la información recabada de los 5 actores clave ($n = 5$) permitió validar el impacto socioeconómico de los datos técnicos. Las respuestas se categorizaron en cuatro dimensiones de análisis.

1) *Percepción del estado de la vía*: Existe un consenso absoluto sobre la degradación de la infraestructura. El 80% de los entrevistados calificó la vía como "Destruída" y el 20% como "Crítica", como se muestra en la Fig. # 6.

- Testimonio Nivel Operativo (Trabajador 1): "La vía está destruida. Los tráileres hacen huecos grandes y cuando llueve se vuelve intransitable".
- Testimonio Nivel Social (Habitante San Lorenzo): "Pésimo. En seco es difícil pasar, pero en invierno es imposible". Esta percepción valida que el IRI de 9.17 m/km no es solo un dato numérico, sino una realidad operativa que impide el tránsito normal.

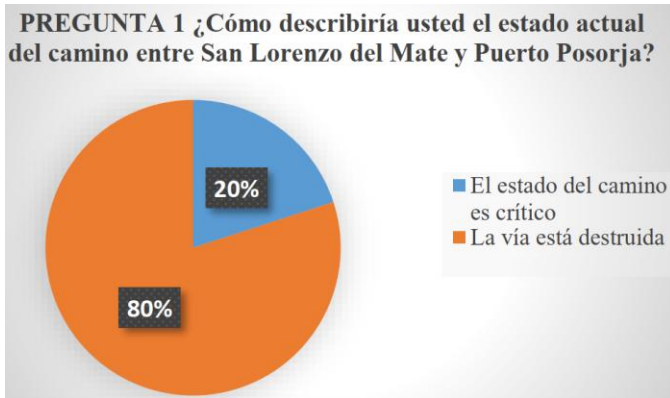


Fig. 6 Percepción de los actores locales sobre el estado actual de la vía

2) *Impacto de la estacionalidad (invierno)*: El 60% de los actores identificó el "desbordamiento del canal" como el problema principal, por encima del mal estado del suelo, como se muestra en la Fig. # 7.

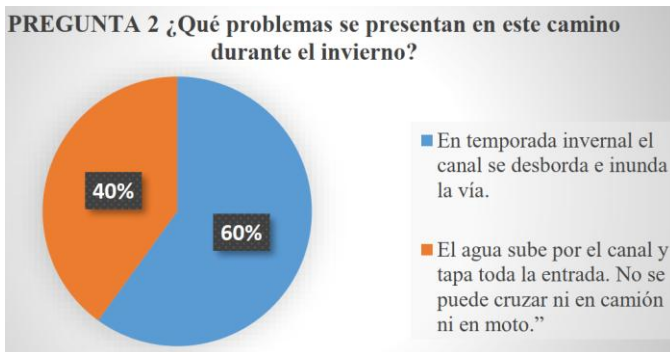


Fig. 7 Percepción de los actores locales sobre problemas en el invierno

- Testimonio Nivel Gerencial (Administrador): "En temporada invernal el canal se desborda... Los vehículos pesados como tráileres no pueden pasar, y se paraliza el transporte de la carga".
 - Testimonio Nivel Operativo (Trabajador 2): "Cuando el canal se desborda, el agua cubre por completo la entrada, no se puede pasar ni siquiera con camión ni en moto". Este hallazgo es crucial: confirma que la inversión en asfaltado será inútil si no se soluciona primero la obra hidráulica de drenaje.
- 3) *Afectación a la cadena de suministro*: La interrupción física de la vía genera pérdidas económicas directas. El 40%

de los encuestados señaló la pérdida de cosecha como la principal consecuencia, como se muestra en la Fig. # 8.

- Perspectiva Logística (Administrador): "El banano tiene que salir fresco. Cuando el camión no puede ingresar, se pierde la cosecha del día y eso representa pérdidas grandes".
- Perspectiva Social (Habitante El Progreso): "Estamos aislados. Nadie puede entrar ni salir, y eso nos afecta en salud, comercio y empleo"

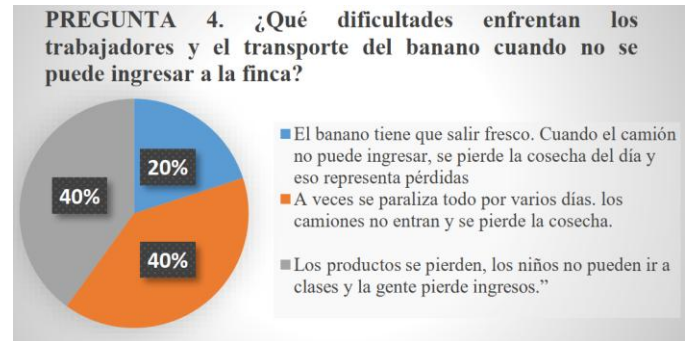


Fig. 8 Percepción de los actores locales sobre dificultades del transporte

4) *Soluciones demandadas por la comunidad*: Contrario a la creencia de que las comunidades rurales piden soluciones genéricas, los entrevistados mostraron un conocimiento técnico empírico de la solución necesaria. El 40% sugirió específicamente "Eleva la vía y reforzar estructura", como se muestra en la Fig. # 9.

- Propuesta (Trabajador 1): "Que arreglen la vía para que soporte peso y construyan un puente o paso elevado en el canal".
- Propuesta (Administrador): "Se necesita una intervención seria: elevar la vía, reforzar la estructura para carga pesada y controlar el canal".

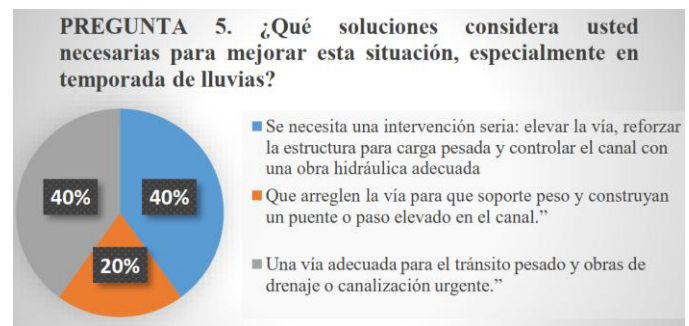


Fig. 9 Percepción de los actores de las soluciones a tomar sobre la vía

IV. LIMITACIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Aunque el presente estudio aporta evidencia empírica relevante sobre la logística rural, es necesario reconocer ciertas limitaciones metodológicas que condicionan la

generalización de los resultados, las cuales abren, a su vez, nuevas oportunidades de investigación

A. Limitaciones del Estudio

1) *Alcance geográfico*: La investigación se circunscribió a un único corredor logístico (San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja) en la provincia del Guayas. Si bien este caso es representativo de la realidad costera ecuatoriana, las condiciones geofísicas y de infraestructura podrían variar significativamente en otras zonas productivas, como la región Sierra o la Amazonía, limitando la extrapolación directa de los hallazgos

2) *Temporalidad (corte transversal)*: Al tratarse de un diseño transversal, la medición del IRI se realizó en un momento específico. No se capturó la evolución progresiva del deterioro del pavimento a lo largo de un ciclo hidrológico completo (verano vs. invierno extremo). Esto impide cuantificar con precisión la tasa de degradación anual de la vía bajo cargas repetidas.

3) *Precisión instrumental*: Si bien la herramienta *RoadLab Pro* (Clase III) es efectiva para la gestión de activos viales, tiene un margen de error mayor en comparación con perfilómetros láser inerciales (Clase I). Los datos deben interpretarse como indicadores de desempeño funcional y no como insumos para diseño geométrico de precisión.

B. Agenda para Futuras Investigaciones

A partir de los hallazgos, se sugieren las siguientes líneas de trabajo para la comunidad académica y profesional:

1) *Estudios longitudinales*: Se recomienda replicar la medición del IRI en intervalos trimestrales para modelar la curva de deterioro de la vía rural. Esto permitiría correlacionar la intensidad de las lluvias con la pérdida de la funcionalidad del pavimento.

2) *Análisis de costo-beneficio*: Futuros estudios deberían cuantificar económicamente el impacto del IRI en la carga. Es decir, investigar la correlación entre el nivel de vibración (m/s^2) medido en la caja del camión y el porcentaje de rechazo de la fruta (banano) en puerto por "daño mecánico" o magulladuras.

3) *Evaluación de políticas públicas*: Sería valioso analizar los modelos de gobernanza para el mantenimiento vial rural. Investigar qué esquemas (público, alianzas público-privadas o gestión comunitaria) resultan más eficientes para garantizar la sostenibilidad de la infraestructura vial rural.

V. CONCLUSIONES

El análisis integral del corredor logístico San Lorenzo del Mate – Puerto Posorja permite concluir que existe una brecha técnica crítica en la "primera milla" que compromete la eficiencia de toda la cadena de suministro. Los resultados demuestran cuantitativamente que el tramo de acceso no pavimentado opera con un IRI promedio ponderado de 9.17 m/km, superando el umbral de falla funcional establecido por el Banco Mundial. Esta condición obliga a la flota de

transporte a operar a velocidades inferiores a 15 km/h para mitigar daños mecánicos, validando la hipótesis de que el eslabón inicial constituye el punto de mayor vulnerabilidad y costo operativo en la logística rural de la zona.

Asimismo, el estudio evidencia que el uso exclusivo del IRI promedio resulta insuficiente para evaluar la calidad del servicio en el transporte de carga sensible como el banano. Aunque el tramo pavimentado registra un índice promedio de 4.34 m/km (clasificado como "Regular"), el análisis granular de los datos reveló la existencia de "picos de rugosidad" superiores a 10.0 m/km en puntos específicos. Se concluye que son estos defectos localizados, invisibles en el promedio general, los que generan las vibraciones destructivas que afectan la calidad de la fruta y la seguridad vial, actuando como trampas operativas en una vía que aparenta estar en buen estado.

Finalmente, se identificó una disonancia estructural entre la inversión en infraestructura y la operatividad real. A pesar de contar con una red estatal pavimentada hacia el puerto, la cadena de suministro enfrenta interrupciones totales en el origen debido a la falta de resiliencia hidráulica frente a factores climáticos. La investigación confirma que el bloqueo logístico invernal no es consecuencia únicamente de la rugosidad superficial, sino de la incapacidad del sistema de drenaje para gestionar los caudales en los accesos a las fincas. Esto demuestra que cualquier mejora en la red vial principal resultará ineficaz para la competitividad exportadora si no se garantiza primero la conectividad permanente en el punto de carga.

VI. RECOMENDACIONES

Basado en el diagnóstico logístico, se sugiere a los gestores viales transitar hacia un modelo de mantenimiento basado en puntos críticos, utilizando metodologías de monitoreo continuo de bajo costo para identificar y reparar prioritariamente los segmentos con $IRI > 6.0$ m/km, optimizando así los recursos frente a intervenciones generalizadas. De igual manera, es fundamental que las políticas de planificación territorial integren la variable de vulnerabilidad climática, promoviendo estudios hidrológicos en los caminos vecinales para asegurar que la gestión del agua sea parte intrínseca de la estrategia de competitividad. Por último, se recomienda reorientar la inversión pública hacia la estabilización funcional de la primera milla, dado que reducir la rugosidad extrema en los tramos de tierra tendría un impacto marginal superior en la eficiencia de la cadena que las mejoras estéticas en la red pavimentada.

REFERENCES

- [1] Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), "CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary", Council of Supply Chain Management Professionals, 2013. [En línea]. Disponible en: https://cscmp.org/CSCMP/cscmp/educate/scm_definitions_and_glossary_of_terms.aspx
- [2] J.-P. Rodrigue, *The Geography of Transport Systems*, 6a ed. London: Routledge, 2024. doi: 10.4324/9781003343196.

- [3] A. Calatayud y L. Montes, *Logistics in Latin America and the Caribbean: Opportunities, Challenges and Courses of Action*. Inter-American Development Bank, 2021. doi: 10.18235/0003278.
- [4] D. Zhangallimbay, y M. Ordoñez, “EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: UN ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS EN ZONAS PRODUCTIVAS DEL ECUADOR”, *Rev. Cuest. Económicas*, vol. 32, núm. 1, ene. 2022, doi: 10.47550/RCE/32.1.3.
- [5] S. Asher y P. Novosad, “Rural Roads and Local Economic Development”, *Am. Econ. Rev.*, vol. 110, núm. 3, pp. 797–823, mar. 2020, doi: 10.1257/aer.20180268.
- [6] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, y C. A. V. Queiroz, “The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements”, The World Bank, Publication WTP45, ene. 1986. [En línea]. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/326081468740204115>
- [7] SoftTeco, *RoadLab Pro: Mobile Road Assessment Tool*. (2025). SoftTeco. [En línea]. Disponible en: <https://softteco.com/projects/roadlab>
- [8] O. G. Dela Cruz, C. A. Mendoza, y K. D. Lopez, “International Roughness Index as Road Performance Indicator: A Literature Review”, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 822, núm. 1, p. 012016, jul. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/822/1/012016.