

Speed Profile Characterization of Medium-Sized Vehicles and iRAP Star Rating Assessment on Mountainous Rural Roads: Loja-Ecuador Corridor Case Study

Abstract– Road safety in mountainous rural highways such as Loja-Catamayo (Ecuador) presents significant engineering challenges due to geometric deficiencies and pavement surface conditions that increase risks for medium-sized vehicle operators. This study analyzed the influence of road geometry (grade and horizontal curve radius), International Roughness Index (IRI), and iRAP star rating classification on operating speed through 50 speed profiles recorded with Speed Tracker (iPhone 15 Pro), pavement roughness measurements via Roughometer III, and iRAP coding in ViDA. Analysis of Variance (ANOVA) in Minitab revealed a mean operating speed of 56.48 km/h, with statistically significant effects from grade ($p<0.001$, $F=19.07$), curve radius ($p<0.001$, $F=27.53$), and IRI ($p<0.001$, $F=14.66$), but not from iRAP classification ($p=0.711$). Minimum speeds were recorded on tight curves (43.85 km/h), uphill grades (47.17 km/h), and poor pavement surface conditions (41.40 km/h). The results highlight a statistically significant relationship between mean operating speed of medium-sized vehicles and both horizontal curve radius and grade, as well as pavement surface condition; however, no statistically significant relationship was found with the results of the road safety assessment in the study corridor.

Keywords– Road safety, speed profiles, iRAP, International Roughness Index, medium-sized vehicles.

Caracterización de Perfiles de Velocidad de Vehículos Medianos y Evaluación de Clasificación por Estrellas iRAP en Carreteras Rurales Montañosas: Estudio de Caso del Corredor Loja-Ecuador

Rivas Mora Eraldo Mauricio¹; Segarra Morales María Soledad²

¹Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, emrivas@utpl.edu.ec

²Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, mssegarra@utpl.edu.ec

Resumen– La seguridad vial en vías rurales montañosas como Loja-Catamayo (Ecuador) representa un desafío en ingeniería, con características geométricas y condiciones de superficie de pavimento se convierten en un riesgo para los conductores de vehículos medianos. Este estudio analiza la influencia de la geometría vial (pendiente y radio de curva), IRI y clasificación iRAP en la velocidad de operación mediante 50 perfiles registrados con Speed Tracker (iPhone 15 Pro), IRI vía Rugómetro III y codificación iRAP en ViDA. El análisis ANOVA (Minitab) reveló velocidad promedio de 56,48 km/h, con efectos significativos de pendiente ($p<0,001$, $F=19,07$), radio ($p<0,001$, $F=27,53$) e IRI ($p<0,001$, $F=14,66$), pero no de iRAP ($p=0,711$). Velocidades mínimas en curvas cerradas (43,85 km/h), ascensos (47,17 km/h) y mala condición de la superficie del pavimento (41,40 km/h). Los resultados destacan una relación estadísticamente significativa entre la velocidad media de los vehículos medianos y los radios de curvatura y pendiente, así como con el estado de la superficie del pavimento, sin embargo, no se reflejó una relación estadística significativa con los resultados de la evaluación de la seguridad vial, en el tramo de estudio.

Palabras clave- Seguridad vial, perfiles de velocidad, iRAP, IRI, vehículos medianos.

I. INTRODUCCIÓN

La seguridad vial constituye un gran desafío a nivel mundial, cada año mueren alrededor de 1,19 millones de personas y entre 20 y 50 millones resultan lesionadas por accidentes de tránsito [1]. Los accidentes de tránsito también representan un alto impacto económico, generando pérdidas que oscilan entre el 2 y el 6% del Producto Interno Bruto (PIB) en países de ingresos bajos y medianos [2].

Según el informe anual de accidentes de tránsito de la Comunidad Andina, en el 2023 se registraron 203 168 siniestros viales, resultando en 15 751 muertes y 124 764 heridos [3]. Aunque Ecuador redujo su tasa de accidentes en 10,1 puntos entre 2022 y 2023, mantiene la segunda tasa de mortalidad más alta de Latinoamérica con 20,4 muertes por cada 100 000 habitantes [4]. Las principales causas de los accidentes de tránsito son por la impericia e imprudencia del conductor, representando el 39,41%, seguido de no respetar las señales de tránsito con un 21,30%, exceso de velocidad con 16,91% y entre otras causas como embriaguez, mal rebasamiento e imprudencia del peatón [5].

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionó como zona de estudio la vía Loja-Catamayo, una carretera rural de dos carriles de aproximadamente 28 km de longitud, considerando su relevancia estratégica al conectar la región Sierra con la Costa del Ecuador y con el puerto más cercano a la zona sur del país. Esta vía, ubicada en la región sur del Ecuador, pertenece a la Red Vial Estatal, formando parte tanto de la Troncal de la Sierra (E35), como de la Transversal Sur (E50) [6]. Se encuentra ubicada en una zona montañosa y rural, con pendientes entre 4,5 y 7% [7], con promedio de velocidad de operación de aproximadamente 68,4 km/h a 75,9 km/h [8], y con un TPDA de 6 794 vehículos por día [9]. Presenta un conjunto de deficiencias estructurales, geométricas y operativas, aumentando la probabilidad de siniestros viales [10].

Los vehículos medianos constituyen una parte significativa del flujo vehicular en la vía Loja – Catamayo, con un 14,71% del total de vehículos que circulan por esta vía, ocupando el segundo grupo vehicular más frecuente, seguidos de los vehículos livianos con un 81,40%, lo que evidencia la importancia de realizar el estudio con este tipo de vehículos [11].

Una técnica eficaz para analizar la seguridad vial de una carretera rural es mediante la obtención de perfiles de velocidad de operación [8]. Se registraron 50 perfiles de velocidad de vehículos medianos, mediante la aplicación Speed Tracker, instalada en un teléfono inteligente modelo iPhone 15 Pro, la cual permite registrar velocidades, tiempo de viaje, distancia, entre otros parámetros, a través de sensores GPS de alta precisión [12]. La precisión del uso de esta aplicación móvil en comparación con equipos profesionales VBOX, ha sido validada en estudios donde se revela la alta consistencia entre ambos métodos de medición, con un 91,22% que mostraba errores inferiores a 2 km/h [13].

De forma complementaria, se realizó la evaluación del estado del pavimento a lo largo del mismo tramo mediante el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), el cual es un parámetro estandarizado a nivel mundial que se utiliza para cuantificar la regularidad superficial del pavimento y la comodidad de rodadura [14]. La incorporación del IRI permitió analizar como la condición superficial del pavimento influye en

las velocidades de operación y en el nivel de seguridad vial. Ambas mediciones se realizaron desde el redondel de El Plateado hasta el antiguo peaje, garantizando un levantamiento integral del comportamiento vehicular y del estado físico de la infraestructura.

Posterior a la obtención de los perfiles de velocidad, se realizó la evaluación de la seguridad de la vía mediante la metodología iRAP (International Road Assessment Programme), la cual es una organización benéfica que busca la reducción de siniestros viales clasificando las carreteras en función del nivel de seguridad que ofrecen a los usuarios, utilizando un sistema de estrellas de 1 a 5, para vías de alto y bajo riesgo respectivamente [15]. El proceso de evaluación iRAP se basa en la codificación de los atributos de la infraestructura vial, para luego ser procesados en el software ViDA, una plataforma en línea que facilita el análisis y la generación de reportes de manera eficiente y precisa [16]. Para su análisis, se recopilaban las características geométricas de la vía mediante la información proporcionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y se registró un video del recorrido con un teléfono inteligente como cámara de video, siguiendo las pautas de iRAP que permiten usar dispositivos no especializados en recorridos cortos (<100 km) [17]. Aunque su campo de visión es menor al recomendado, el equipo ofrece buena calidad de imagen y cumple con los estándares básicos [18][19]. Además, su uso demuestra cómo los teléfonos inteligentes pueden ser una alternativa práctica y económica para evaluar la seguridad vial en zonas con recursos limitados [20].

En este contexto, el presente estudio analiza la seguridad vial de la vía Loja – Catamayo integrando perfiles de velocidad de vehículos medianos como variable principal, junto con la geometría vial (radios de curvatura y pendiente), el IRI y la metodología iRAP. Los resultados revelan que la geometría vial y el IRI influyen de forma estadísticamente significativa en la velocidad de operación, mientras que el iRAP resulta no significativo estadísticamente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Zona de estudio

La presente investigación se desarrolló en la vía Loja – Catamayo, corredor perteneciente a la Troncal de la Sierra E35 y principal conexión entre la ciudad de Loja, el cantón Catamayo y el aeropuerto Ciudad de Catamayo [21]. Esta vía, corresponde a una carretera rural de dos carriles que concentra un flujo vehicular significativo dado su rol estratégico en la movilidad regional. Como se muestra en la Fig. 1, el tramo analizado comprende desde el redondel de El Plateado hasta el antiguo peaje de Catamayo, con una longitud aproximada de 27,8 km, se localiza entre las coordenadas geográficas -3,982193 de latitud sur y -79,234318 de longitud oeste en el extremo inicial, y 3,983297 de latitud sur y -79,333349 de longitud oeste en el extremo final, abarcando un corredor vial de dos carriles (uno por sentido) y una anchura variable acorde a la topografía y el diseño vial.

La zona presenta un relieve predominantemente montañoso con pendientes moderadas a fuertes, que varían entre 4,5% y 7% [7]. El clima local es templado, con temperaturas que varían entre 9°C y 21°C, y un régimen de lluvias que concentra la mayor parte de la precipitación entre finales de otoño e inicios de primavera [22]. El Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) de la vía es de 6 794 vehículos por día [9].

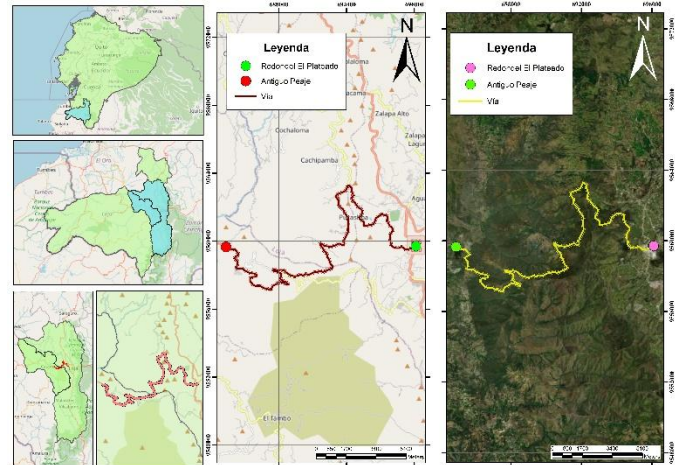


Fig. 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio

B. Materiales

La caracterización geométrica se basó en la información oficial disponible para el corredor Loja – Catamayo, proporcionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), incluyendo radios de curva, pendientes longitudinales, progresivas y longitudes de tramos.

Se utilizó la aplicación móvil Speed Tracker, instalada en un iPhone 15 Pro para la obtención de los perfiles de velocidad, la cual tiene la capacidad de presentar en tiempo real los resultados en varios formatos, incluyendo coordenadas, velocidad y elevaciones [13]. Conjuntamente el dispositivo móvil integra un receptor GPS de alta precisión que incorpora posicionamiento de doble frecuencia y soporte para múltiples constelaciones [19].

La rugosidad del pavimento se midió utilizando el dispositivo Rugómetro III, desarrollado por ARRB Group. Este equipo está diseñado como una solución portátil y de bajo costo para obtener datos de rugosidad en carreteras pavimentadas y no pavimentadas, midiendo el movimiento del eje mediante un acelerómetro y registrando la distancia recorrida para calcular el IRI a partir del perfil longitudinal de la vía [23]. El equipo se instaló en un vehículo tipo SUV (Vitara 5 puertas 4x4), cumpliendo las recomendaciones del fabricante respecto al montaje del sensor, configuración del medidor de distancia y rango de velocidades de operación.

El levantamiento visual para la evaluación de la seguridad vial se utilizó nuevamente el iPhone 15 Pro, registrando video e imágenes del entorno vial a intervalos regulares de 100 m con

ayuda de la aplicación Avenza Maps, siguiendo las recomendaciones de los manuales de inspección de iRAP [17].

Para el procesamiento preliminar de los datos se utilizó el software Microsoft Excel y para el análisis estadístico se empleó Minitab versión 22.

C. Metodología

Recolección de datos de campo

Las mediciones de los perfiles de velocidad se realizaron en condiciones de flujo libre y clima seco, descartando días con precipitaciones y evitando horas pico, con el fin de garantizar velocidades de flujo libre representativas para evitar alteraciones en el comportamiento de conducción que puedan afectar la velocidad de operación de los vehículos.

Se recolectaron un total de 50 perfiles de velocidad de vehículos medianos, lo que garantiza una muestra representativa para el análisis estadístico y la elaboración de modelos de velocidad de operación [24]. Para el análisis de los perfiles de velocidad, se consideraron principalmente los segmentos de curvas horizontales, debido a que estos representan las condiciones más críticas desde el punto de vista de la seguridad vial [25]. Se seleccionaron días hábiles con tráfico normal, evitando feriados, fines de semana o días con eventos especiales que puedan alterar el flujo vehicular y las velocidades de operación. Para la obtención de los perfiles se instaló la aplicación Speed Tracker en un iPhone 15 Pro. El dispositivo se ubicó en un soporte fijo dentro del vehículo, para minimizar vibraciones y asegurar lecturas precisas durante todo el recorrido. La aplicación registró de forma continua la velocidad instantánea y la trayectoria, generando archivos que posteriormente se exportaron en formato CSV para su integración con las demás bases de datos. Esta aplicación móvil ha sido validada en otros estudios en donde se la compara con equipos profesionales de medición VBOX, destacando la alta consistencia entre ambos métodos, confirmando que esta aplicación ofrece una alternativa fiable, accesible y rentable a los costosos equipos tradicionales, convirtiéndola en una herramienta valiosa para estudios de seguridad vial en entornos con recursos limitados [13].

Para la obtención del IRI, primeramente, se instaló el Rugómetro III en un vehículo Vitara 5 puertas 4x4, conforme a las indicaciones del manual de ARRB Group [23]. Luego se procedió con el recorrido a velocidades constantes entre 40 y 60 km/h, para lograr una correcta obtención de los valores de rugosidad del pavimento. Se registraron valores del IRI a lo largo del tramo estudiado, clasificando el estado del pavimento en categorías desde Muy Bueno hasta Malo, según el manual del Rugómetro III.

Para la evaluación de la seguridad vial mediante iRAP se efectuó un inventario visual continuo del tramo, registrando imágenes y video con el iPhone 15 Pro y marcando la posición cada 100 m con la ayuda de la aplicación Avenza Maps, en concordancia con la guía de usuario de ViDA para la codificación de atributos, tales como características geométricas, tipo y ancho de carriles, presencia de obstáculos

laterales, intersecciones, uso del suelo adyacente, entre otros. La información codificada se ingresó en la plataforma ViDA, que utiliza modelos de riesgo desarrollados por iRAP para estimar la probabilidad y severidad de siniestros por tipo de usuario y asignar una calificación por estrellas de 1 a 5 a cada segmento evaluado.

Procesamiento y limpieza de datos

Para el procesamiento y limpieza de datos, en primer lugar, los archivos CSV generados por la aplicación Speed Tracker y por el Rugómetro III, así como las plantillas de codificación iRAP y la información geométrica, se integraron en una base consolidada en Excel. Se verificó la integridad de los registros, se eliminaron valores irregulares asociados a condiciones no representativas del flujo libre como detenciones, arranques, maniobras atípicas o interferencias de otros vehículos. Adicionalmente, se excluyeron los tramos en tangentes y se trabajó únicamente con segmentos en curvas horizontales, ya que estos concentran las mayores variaciones de velocidad y representan condiciones críticas para la evaluación de la seguridad vial [25]. Para cada segmento se calcularon la velocidad media de los vehículos medianos, el valor del IRI y la calificación por estrellas de iRAP, de forma que cada tramo contara con un conjunto de variables comparables. La revisión gráfica mediante perfiles de velocidad y gráficos de dispersión permitió identificar posibles errores de registro antes del análisis estadístico. Los datos se clasificaron en rangos de valores definidos por las características geométricas del tramo como se puede observar en la Tabla I.

TABLA I
Rangos de valores definidos para el análisis

Factor	Niveles	Valores
Pendiente	4	A -8 a -5; B -0,5 a -5; C 0,5 a 5 y D 5 a 8
Radio	5	B 40 a 50; C 50 a 70; D 70 a 100; E 100 a 150 y F 150 a 200
IRI	5	A Muy Bueno; B Bueno; C Regular y D Pobre y E Malo
iRAP	2	1 a 2 estrellas; 3 a 4 estrellas

Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico se realizó con Minitab para determinar si los datos obtenidos siguen una distribución normal, lo cual es un requisito indispensable para validar el posterior análisis de varianza ANOVA. Se empleó un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia del 5%. Tanto en el análisis de normalidad como en el de varianza ANOVA existe una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_1). En el análisis de normalidad la hipótesis nula indica que los datos provienen de una distribución normal y en cambio la hipótesis alternativa indica que los datos no provienen de una distribución normal [26]. Cuando el valor p es mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula y se rechaza la alternativa, indicando que, si existe una distribución normal de los datos, por el contrario cuando el valor de p es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa indicando que no existe una distribución normal de los datos.

Una vez verificado que exista normalidad en los datos se procedió a realizar el análisis de varianza ANOVA para saber si existe relación entre la variable dependiente (velocidad) y las independientes (iRAP, IRI, pendiente y radio). En este caso cuando el valor de p es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, concluyendo que el factor evaluado tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las velocidades de los vehículos. Por el contrario, si el valor p es mayor a 0,05 no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no se detectan diferencias estadísticamente significativas asociadas a dicho factor.

Luego de ser recolectados y analizados los datos, se elaboraron gráficos de probabilidad, que sirvieron como herramienta visual para verificar el grado de ajuste de los datos a una distribución normal.

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Mediciones de perfiles de velocidad

Se recopilaron un total de 50 perfiles de velocidad de vehículos medianos en tramos de curvas en la vía Loja-Catamayo, desde el redondel de El Plateado hasta el antiguo peaje de Catamayo, como se puede ver en la Figura 2. El análisis estadístico de las velocidades registradas reveló una velocidad promedio de 56,48 km/h, con una velocidad mínima de 40,31 km/h y una máxima de 68,07 km/h. La distribución de velocidades obtuvo una desviación estándar de 7,50 indicando una variabilidad moderada en el comportamiento de los conductores de vehículos medianos a lo largo del tramo estudiado.

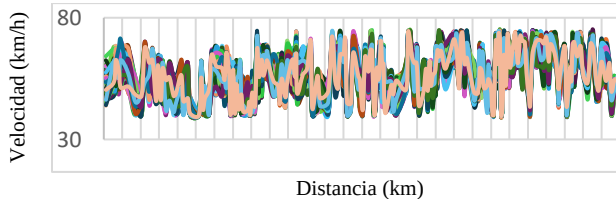


Fig. 2 Perfiles de velocidad de vehículos medianos.

La variabilidad en los perfiles de velocidad se atribuye principalmente a los cambios en las características geométricas de la vía, particularmente las pendientes y radios de curva, que influyen significativamente en la capacidad de operación de los vehículos. Los conductores tienden a ajustar sus velocidades en función de la percepción del riesgo y las demandas que la infraestructura impone.

Relación entre la velocidad de operación y pendientes.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado mediante Minitab demostró que la pendiente es un factor estadísticamente significativo en la determinación de la velocidad de operación, con $p = 0,000$ y $F = 19,07$. Los resultados de la distribución de datos se pueden observar en la Figura 3 “Gráfica”, en donde todos los rangos de pendientes tienen un valor de p superior a 0,05 lo que significa que siguen una distribución normal.

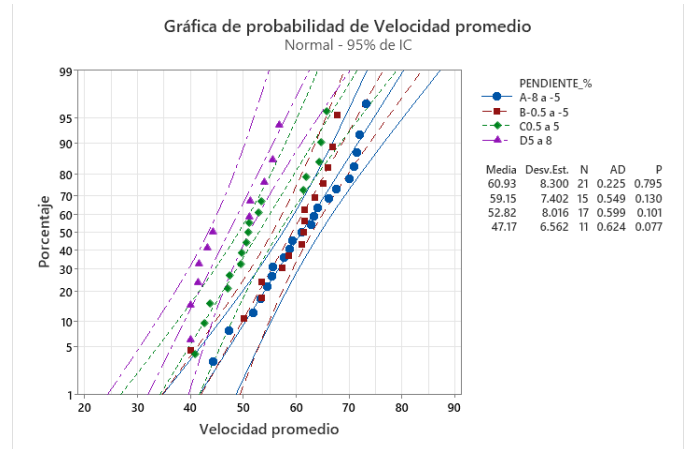


Fig. 3 Gráfica de probabilidad de Velocidad promedio vs Pendiente

Las pendientes descendentes severas (-8% a -5%), tienen una velocidad promedio de 60,93 km/h, las pendientes descendentes moderadas (-0,5% a -5%), su velocidad promedio es de 59,15 km/h, las pendientes ascendentes leves (0,5% a 5%), tienen una velocidad promedio 52,82 km/h, y por último para las pendientes ascendentes moderadas (5% a 8%), su velocidad promedio es de 47,17 km/h.

Estos resultados muestran que los conductores de vehículos medianos reducen su velocidad en pendientes ascendentes. Esto es consistente con el comportamiento esperado de los vehículos, ya que requieren mayor esfuerzo del motor para ascender pendientes pronunciadas. En cambio, en pendientes descendentes, los conductores tienden a incrementar su velocidad.

Influencia de los radios de curva en la velocidad de operación.

El análisis ANOVA también confirmó que el radio de curva es un factor estadísticamente significativo, con $p = 0,000$ y $F = 27,53$, siendo incluso más influyente que la pendiente en la determinación de la velocidad de operación. Los resultados de la distribución de datos se pueden observar en la Figura 4, en donde todos los rangos de radios de curva tienen un valor de p superior a 0,05 lo que significa que siguen una distribución normal.

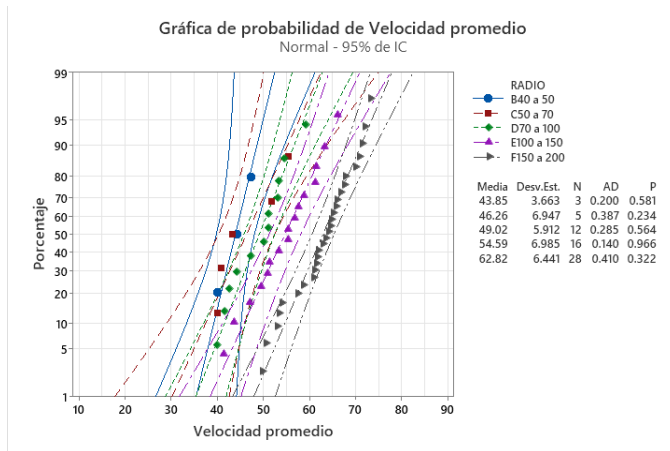


Fig. 4 Gráfica de probabilidad de Velocidad promedio vs Radio de curva

Los radios muy cerrados (40m a 50m), tienen una velocidad promedio de 43,85 km/h, para los radios cerrados (50m a 70m), su velocidad promedio es de 46,26 km/h, los radios moderados (70m a 100m), tienen una velocidad promedio 49,02 km/h, para los radios amplios (100m a 150m), su velocidad promedio es de 54,59 km/h, y por ultimo los radios muy amplios (150m a 200m) tienen una velocidad promedio de 62,82 km/h.

Estos resultados demuestran que los conductores de vehículos medianos ajustan significativamente su velocidad en función de la curvatura de la vía. Las curvas cerradas inducen reducciones importantes de velocidad debido a limitaciones de tracción lateral y control dinámico del vehículo. Los vehículos medianos, con su mayor altura del centro de gravedad comparado con vehículos livianos, son particularmente sensibles a los cambios de curvatura. Esta relación confirma la importancia de las características geométricas en la seguridad vial de vías rurales montañosas, particularmente en carreteras que presentan curvas cerradas sin elementos adicionales de seguridad.

B. Evaluación del estado del pavimento mediante el IRI

La distribución de los valores obtenidos del IRI se pueden observar en la Tabla II, los cuales fueron clasificados en categorías desde Muy Bueno hasta Malo, según el manual del Rugómetro III.

TABLA II
Rangos de valores definidos para el análisis

Clasificación	Porcentaje de secciones
Muy bueno	28,13%
Bueno	31,25%
Regular	15,62%
Pobre	12,5%
Malo	12,5%

Relación entre IRI y velocidad de operación.

El análisis estadístico entre el IRI y la velocidad de operación indica que el estado del pavimento también es un factor que influye estadísticamente en la velocidad, con $p =$

0,000 y $F = 14,66$. Los resultados de la distribución de datos se pueden observar en la Figura 5, en donde todos los rangos de IRI tienen un valor de p superior a 0,05 lo que significa que siguen una distribución normal.

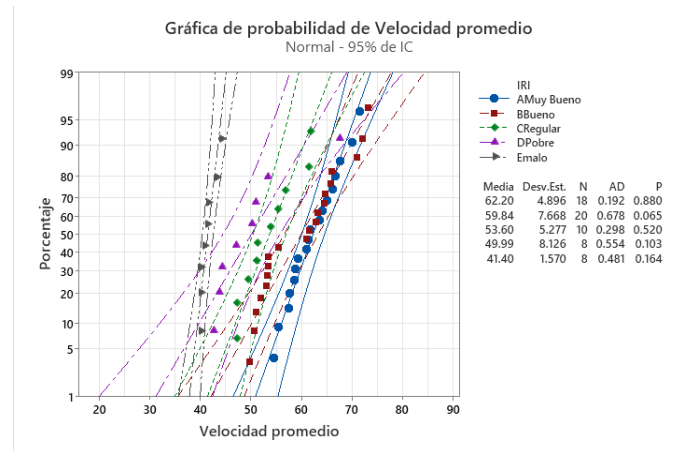


Fig. 5 Gráfica de probabilidad de Velocidad promedio vs IRI

La clasificación del estado del pavimento considerada como “Muy Bueno”, tiene una velocidad promedio de 62,20 km/h, para la clasificación “Bueno”, su velocidad promedio es de 59,84 km/h, la clasificación “Regular”, tienen una velocidad promedio 53,60 km/h, para la clasificación “Pobre”, su velocidad promedio es de 49,99 km/h y para la clasificación “Malo” su velocidad promedio es de 41,40 km/h.

Estos resultados confirman que el deterioro superficial del pavimento afecta el comportamiento de los conductores, aunque el efecto sobre la velocidad no siempre es lineal. Valores moderados de IRI tienden a inducir reducciones leves de la velocidad, mientras que superficies muy deterioradas pueden generar maniobras evasivas que incrementan la inestabilidad del vehículo sin lograr una desaceleración proporcional.

C. Evaluación de la seguridad vial mediante la metodología iRAP

La evaluación iRAP del tramo Loja-Catamayo identificó variaciones significativas en el nivel de seguridad de la vía. Los resultados de la clasificación por estrellas se pueden observar en la Figura 6 y en la Tabla III.

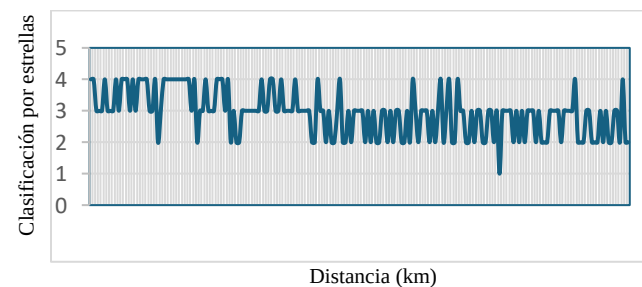


Fig. 6 Clasificación por estrellas del tramo de estudio

TABLA III
Rangos de valores definidos para el análisis

Calificación por estrellas	Porcentaje de secciones
1 a 2 estrellas	42,19%
3 a 4 estrellas	57,81%

El análisis reveló que la vía presenta principalmente un nivel de seguridad intermedio a bueno (3-4 estrellas), aunque existen secciones críticas clasificadas como 1-2 estrellas, principalmente en zonas donde concurren factores de riesgo geométricos.

Relación entre velocidad de operación y evaluación iRAP

El análisis de varianza entre la velocidad de operación y la calificación iRAP, contrariamente a lo esperado determinó que la evaluación de la seguridad vial mediante la metodología iRAP no es un factor estadísticamente significativo que influye en la velocidad de los conductores, con $p = 0,711$ y $F = 0,14$. Los resultados de la distribución de datos se pueden observar en la Figura 7, en donde todos los rangos de la calificación iRAP tienen un valor de p superior a 0,05 lo que significa que siguen una distribución normal.

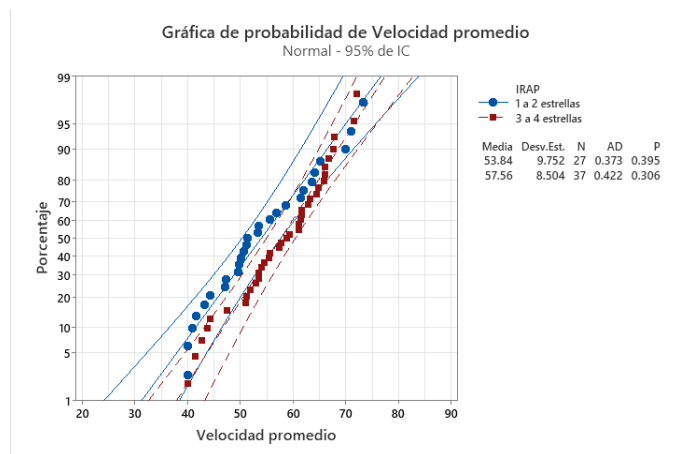


Fig. 7 Gráfica de probabilidad de Velocidad promedio vs iRAP

En los tramos con una calificación de 1 a 2 estrellas la velocidad promedio es de 53,84 km/h, mientras que en los tramos con una calificación de 3 a 4 estrellas la velocidad promedio es de 57,56 km/h. Estos resultados indican que las secciones clasificadas como más seguras (3-4 estrellas) no muestran velocidades significativamente diferentes de aquellas clasificadas como 1-2 estrellas. Esto sugiere que los conductores pueden no estar completamente conscientes de la percepción de peligro determinada con los atributos de infraestructura que el protocolo iRAP evalúa. Más bien la velocidad parece estar más fuertemente determinada por factores geométricos como el radio de curvatura y la pendiente, que por la evaluación de seguridad que proporciona iRAP.

D. Discusión

La velocidad de operación promedio de los vehículos medianos en la vía Loja-Catamayo fue de 56,48 km/h,

influenciada principalmente por radios de curvatura reducidos y pendientes pronunciadas. Esta velocidad es coherente con estudios como el de Gómez y Paz [27], quienes reportaron velocidades promedio de aproximadamente 44 km/h para camiones tipo C2 en el trayecto Pasto-Chachagüi cuya topografía es montañosa con pendientes pronunciadas, similar a la vía de estudio Loja-Catamayo.

Echaveguren y Díaz, al analizar perfiles de velocidad en curvas de carreteras chilenas de dos carriles, señalan que los conductores tienden a mantener velocidades relativamente altas en tramos de montaña, reduciendo solo parcialmente la velocidad en curvas cerradas, lo que coincide con el comportamiento observado en Loja-Catamayo [28].

La metodología adoptada para el análisis de perfiles de velocidad, con énfasis en los segmentos de curvas horizontales, se fundamenta en la amplia evidencia de la literatura que identifica a las curvas horizontales como los elementos geométricos de mayor criticidad en el ámbito de la seguridad vial. Según la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), la tasa de accidentes en curvas horizontales es aproximadamente tres veces superior a la de los segmentos rectos, y más del 25% de los accidentes fatales en carreteras rurales ocurren en curvas [25].

En cuanto a la influencia de la pendiente, el análisis de ANOVA confirmó que este factor es estadísticamente significativo ($p = 0,000$ y $F = 19,07$), con velocidades promedio que disminuyen de 60,93 km/h en pendientes descendentes severas (-8 a -5%) a 47,17 km/h en pendientes ascendentes moderadas (5 a 8%). Este patrón es coherente con la literatura, donde se describe que en tramos ascendentes los vehículos requieren mayor potencia y reducen su velocidad, mientras que en descensos los conductores tienden a aumentar la velocidad, especialmente si no existen restricciones geométricas adicionales. Estudios sobre parámetros que definen la velocidad de diseño en carreteras colombianas, por ejemplo, reportan comportamientos similares y resaltan que las pendientes longitudinales, combinadas con la curvatura, condicionan fuertemente la velocidad de operación [29].

El radio de curva resultó ser incluso más influyente que la pendiente ($p = 0,000$; $F = 27,53$), con velocidades promedio que varían desde 43,85 km/h en radios muy cerrados (40–50 m) hasta 62,82 km/h en radios muy amplios (150–200 m). Este comportamiento coincide con investigaciones que analizan la consistencia geométrica de curvas horizontales, donde se evidencia que los conductores reducen significativamente la velocidad en curvas de radio reducido para mantener la estabilidad lateral del vehículo, y que la discrepancia entre velocidad de operación y velocidad de diseño aumenta el riesgo de siniestros [30]. En estudios de calibración de ecuaciones de velocidad de operación en carreteras rurales de montaña se ha encontrado igualmente que el radio de curva es una de las variables más determinantes en la explicación de la velocidad, con coeficientes similares a los obtenidos en este trabajo [31].

Respecto al estado superficial, la distribución del IRI mostró que cerca de un tercio de los tramos se encuentran en

condición Muy buena, otro tercio en condición Buena y el resto se reparte entre Regular y Mala. El ANOVA entre IRI y velocidad de operación confirmó que la rugosidad también influye significativamente en la velocidad, con promedios de 62,20 km/h para tramos Muy buenos y 48,18 km/h para tramos Malos. Este resultado se alinea con lo reportado en estudios sobre el impacto del IRI en la operación y seguridad: valores bajos de rugosidad se asocian a mayor confort y mayores velocidades, mientras que valores altos tienden a inducir reducciones de velocidad o maniobras evasivas [32].

Un resultado particularmente relevante del estudio es que la calificación iRAP no mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la velocidad de operación, a pesar de que el tramo presenta una proporción no despreciable de secciones con 1–2 estrellas (42,19%). Las velocidades promedio en secciones 1–2 estrellas (53,84 km/h) y en secciones 3–4 estrellas (57,56 km/h) son relativamente cercanas y no difieren de forma significativa. Esto contrasta con algunos estudios de aplicación de iRAP en autopistas mexicanas y carreteras rurales de bajo volumen, donde se ha observado que los tramos con menor calificación tienden a corresponder a zonas con mayores velocidades y tasas de siniestralidad [33]. En la vía Loja–Catamayo, los resultados sugieren que el comportamiento de los conductores está más fuertemente determinado por la geometría (radio y pendiente) que por los atributos de seguridad que captura iRAP y que los usuarios no necesariamente perciben ni ajustan su velocidad en función del nivel de riesgo que refleja la calificación por estrellas.

Esta divergencia puede explicarse, en parte, porque iRAP evalúa principalmente la capacidad de la infraestructura para perdonar errores, mientras que la decisión de velocidad del conductor depende más de la lectura inmediata del trazado y de la comodidad percibida que de elementos menos visibles o comprendidos. En otras palabras, un tramo puede tener mala calificación iRAP por falta de barreras o presencia de obstáculos laterales, pero si su geometría es relativamente suave, los conductores pueden mantener velocidades altas sin percibir el riesgo adicional. Este hallazgo coincide con trabajos que señalan la necesidad de combinar la evaluación de infraestructura (como iRAP) con información de comportamiento operacional (velocidades, volúmenes) para priorizar intervenciones de manera más realista [33].

En conjunto, los resultados de la vía Loja–Catamayo muestran un patrón similar al de otras carreteras rurales de montaña estudiadas en Latinoamérica y a nivel internacional: las velocidades de operación dependen de manera dominante de la geometría (radio y pendiente), el estado superficial (IRI) tiene un efecto importante pero no estrictamente lineal, y la percepción de riesgo de los conductores no siempre coincide con el nivel de seguridad estructural que se deriva de metodologías como iRAP. Esta comparación refuerza la pertinencia de utilizar, en este tipo de corredores, un enfoque integrado que combine mejoras geométricas puntuales, mantenimiento de pavimento, gestión de velocidad y medidas de infraestructura orientadas a aumentar la calificación por

estrellas, de forma alineada con las recomendaciones de iRAP y con la experiencia acumulada en otras vías rurales de características semejantes.

Implicaciones ingenieriles de los resultados

Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para el diseño geométrico, la gestión de la velocidad y la priorización de intervenciones en carreteras rurales montañosas. En primer lugar, la fuerte influencia del radio de curva sobre la velocidad de operación confirma la necesidad de considerar la consistencia geométrica en el diseño vial. Curvas con radios reducidos, representan puntos críticos que requieren especial atención, ya sea mediante rediseño geométrico, aumento del peralte o implementación de medidas de control como señalización preventiva y reductores de velocidad.

Respecto al estado del pavimento, los resultados evidencian que el IRI no solo afecta la comodidad de rodadura, sino también el comportamiento operacional de los conductores. Esto implica que las estrategias de mantenimiento vial no deben enfocarse únicamente en la durabilidad estructural, sino también en la seguridad, priorizando intervenciones en tramos con rugosidad elevada donde se generan cambios en la estabilidad vehicular.

Un hallazgo relevante es que la clasificación iRAP no mostró una relación significativa con la velocidad de operación, lo que sugiere que los conductores no ajustan su comportamiento en función del nivel de seguridad estructural de la vía. Esto refuerza la necesidad de complementar las evaluaciones de infraestructura con medidas visibles y perceptibles para el usuario, como señalización, demarcación y elementos de reducción de velocidad, que influyan directamente en la toma de decisiones del conductor.

III. CONCLUSIONES

El análisis de 50 perfiles de velocidad de vehículos medianos en la vía Loja–Catamayo reveló una velocidad promedio de operación de 56,48 km/h, con variabilidad moderada (desviación estándar de 7,50 km/h). Los factores geométricos (pendiente y radio de curva) y el IRI influyeron estadísticamente significativo en la velocidad ($p < 0,001$ en ANOVA), con reducciones notables en pendientes ascendentes (hasta 47,17 km/h), curvas cerradas (43,85 km/h en radios 40–50 m) y pavimentos deteriorados (41,40 km/h en condición Mala). En contraste, la clasificación iRAP (42% de tramos con 1–2 estrellas) no mostró efecto significativo ($p = 0,711$), esto debido a que los conductores no perciben el nivel de riesgo que presentan los tramos de la vía.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece a la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) por el financiamiento que hizo posible la realización de este estudio. También se reconoce la valiosa guía y dirección académica de la Mg. Ing. Soledad Segarra, cuya orientación experta fue fundamental para el desarrollo y éxito de la investigación.

REFERENCES

- [1] Organización Mundial de la Salud, “Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2023,” Ginebra, Suiza, 2024. Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/379049>
- [2] Banco Mundial, “Una década salvando vidas a través de inversiones en seguridad vial,” Mar. 2024. Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/results/2024/03/25/a-decade-of-saving-lives-through-road-safety-investments>
- [3] Comunidad Andina, “Informe Anual: Accidentes de Tránsito en la Comunidad Andina,” 2023.
- [4] B. Oviedo-Bayas, E. López-Robayo, P. Guevara-Torres, D. Alexandra Carpio-Vera, and C. Vera, “Epidemiología de los accidentes de tránsito en Ecuador: un enfoque en la tecnología y la seguridad vial,” *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, vol. 8, no. S1, pp. 148–153, Mar. 2025, doi: 10.62452/VB2RR283.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Anuario de Estadísticas de Transporte, 2023,” Aug. 2024.
- [6] J. L. Sánchez Montero, “Uso de túneles para el desarrollo del transporte en la sierra ecuatoriana, con énfasis en el eje vial E35 - E50 Loja – Catamayo,” Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, 2022.
- [7] L. S. Vásquez Serrano, “Obtención de las variables fundamentales de tráfico y cálculo de las variables de segundo orden de la vía Loja - Catamayo, en los tramos km. 4+000 al km. 11+300, km. 11+300 al km. 22+000 y km. 22+000 al km. 33+300,” Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, 2018. Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/22414>
- [8] Y. García-Ramírez, B. Zárate, S. Segarra, and J. González, “Variación Diaria y Horaria de la Velocidad de Operación en Carreteras Rurales de Dos Carriles en el Cantón Loja,” *Revista Politécnica*, vol. 40, no. 1, Oct. 2017.
- [9] D. F. Arévalo Maldonado, “Caracterización del volumen de tránsito vehicular en las vías Loja- Catamayo y Loja-Zamora,” Universidad Particular de Loja, Loja, 2015. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/13172>
- [10] R. C. Mestanza Rosero, “Estudio de la mejora de la seguridad vial en la carretera E35/E50, tramo Loja-Catamayo de la provincia de Loja, Ecuador,” Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2019.
- [11] B. A. Zárate Torres, “Variables de tráfico de la vía Loja - Catamayo,” Aug. 2018. [Online]. Available: <http://smartland.utpl.edu.ec/es/observatorio>
- [12] Oxagile LLC, “Speed Tracker: GPS Speedometer [Aplicación móvil].” Accessed: Jan. 24, 2026. [Online]. Available: <https://apps.apple.com/us/app/speed-tracker-gps-speedometer/id604836034>
- [13] H. González Armijos and S. Segarra-Morales, “Validation of Mobile Applications as Cost-Effective Tools for Operating Speed Measurement on Mountainous Roads: Evidence from Ecuador,” in *10th International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE 2025)*, London: Avestia Publishing, Jul. 2025, pp. 254-1-254-8. doi: 10.11159/iccste25.254.
- [14] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and C. A. V Queiroz, “The International Road Roughness Experiment,” *World Bank Technical Papers*, vol. 45, 1986.
- [15] iRAP, “Star Ratings - iRAP.” Accessed: May 22, 2025. [Online]. Available: <https://irap.org/rap-tools/infrastructure-ratings/star-ratings/>
- [16] A. Hurtado-Beltrán, M. Serna-Rodríguez, and J. A. Chávez-Cárdenas, “Aplicación de la metodología iRAP y el software ViDA-iRAP en un tramo de autopista en México,” *Infraestructura Vial*, vol. 17, no. 29, pp. 5–12, 2015, Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-37052015000100005&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- [17] iRAP, “Manual de inspección del iRAP,” Mar. 2022. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://irap.org/specifications/>
- [18] iRAP, “Sistema de inspección del iRAP,” Mar. 2022. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://irap.org/specifications/>
- [19] Apple, “iPhone 15 Pro - Tech Specs.” Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://support.apple.com/en-us/111829>
- [20] Maintain-AI, “Improving Road Safety With AI By Using Computer Vision In Your Automated Road Survey Strategy,” Maintain-AI. Accessed: Dec. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.maintain-ai.com/post/improving-road-safety-with-ai>
- [21] D. F. Aguilar Cárdenas, “Estimación de la aceleración lateral cómoda en curvas horizontales de la carretera Loja-Catamayo,” Thesis, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, 2019. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: https://dspace.utpl.edu.ec/visorHub/?handle=20.500.11962_24625
- [22] Weather Spark, “El clima y el tiempo promedio en todo el año en Loja,” Weather Spark. Accessed: Jan. 11, 2026. [Online]. Available: https://es.weatherspark.com/y/19339/Clima-promedio-en-Loja-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o#google_vignette
- [23] ARRB Group Ltd, *Manual de usuario - Rugosímetro III*. Vermont South, VIC: ARRB Group Ltd, 2016. Accessed: Jan. 11, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/774487805/Roughometer-III-User-Manual>
- [24] H. D. Robertson, “Spot Speed Studies - Manual of Transportation Engineering Studies,” Washington, D.C., 1994.
- [25] Federal Highway Administration, “Horizontal Curve Safety.” Accessed: Apr. 14, 2026. [Online]. Available: <https://highways.dot.gov/safety/rwd/keep-vehicles-road/horizontal-curve-safety>
- [26] A. Soetewey, “ANOVA in R.” Accessed: Jan. 23, 2026. [Online]. Available: https://statsandr-com.translate.goog/blog/anova-in-r/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [27] J. A. Gómez Chamorro and D. F. Paz Villota, “Estudio de la velocidad de operación y análisis del perfil de velocidades del trayecto Pasto - Chachagüi (Aeropuerto) Km 19+000 - Km 32+500 mediante la utilización de radar,” Universidad de Nariño, 2014.
- [28] T. Echaveguren and Á. Díaz, “Perfiles de Velocidad de Operación en Curvas Horizontales Aisladas,” *INGENIERÍA DE TRANSPORTE*, vol. 18, no. Sistemas de Transporte, pp. 25–32, Apr. 2016, Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.estudiosdetransporte.org/sochitran/article/view/159>
- [29] C. E. Oñate-Bastidas and C. A. Calero-Valenzuela, “Parámetros que definen la velocidad de diseño de carreteras en terreno ondulado,” *Respuestas*, vol. 28, pp. 18–32, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.22463/0122820X.2792>
- [30] W. A. Casanova Zavala, D. Galindo Aguilar, I. Sarmiento Castellanos, E. Abarca Pérez, and A. Mendoza Díaz, “Evaluación de la consistencia en curvas horizontales a través de la velocidad de operación, en carreteras tipo A2 de la red carretera federal,” Sanfandila, 2021.
- [31] Y. García-Ramírez and F. Alverca, “Calibración de Ecuaciones de Velocidades de Operación en Carreteras Rurales Montañas de Dos Carriles: Caso de Estudio Ecuatoriano,” *Revista Politécnica*, vol. 43, Jul. 2019, Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000300037
- [32] A. C. Vargas Sobrado and A. Ulate Castillo, “EVALUACIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS POR MEDIO DEL RUGOSÍMETRO III,” *Programa de Infraestructura del Transporte-PITRA*, vol. 5, May 2014.
- [33] M. En, I. A. Hurtado-Beltrán, I. M. Serna-Rodríguez, I. Julio, and A. Chávez-Cárdenas, “Aplicación de la metodología iRAP y el software ViDA-iRAP en un tramo de autopista en México,” *Infraestructura Vial*, vol. 17, no. 29, pp. 5–12, Jun. 2015, doi: 10.15517/IV.V17I29.16062.