



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA EN EL  
TRAZADO GEOMÉTRICO DE 2 VÍAS RURALES EN  
TERRENOS MONTAÑOSOS DE LA PROVINCIA DEL AZUAY**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

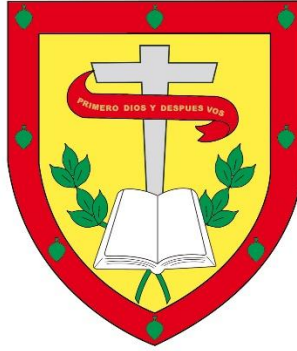
**AUTOR: JOHANNA PRISCILA GUALAN ANDRADE**

**DIRECTOR: CÉSAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA EN EL TRAZADO  
GEOMÉTRICO DE 2 VÍAS RURALES EN TERRENOS MONTAÑOSOS  
DE LA PROVINCIA DEL AZUAY**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**AUTOR: JOHANNA PRISCILA GUALAN ANDRADE**

**DIRECTOR: CÉSAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA**

**CUENCA - ECUADOR**


**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Johanna Priscila Gualan Andrade portador de la cédula de ciudadanía N° 1401062169. Declaro ser el autor de la obra: "Evaluación de la consistencia en el trazado geométrico de 2 vías rurales en terrenos montañosos de la provincia del Azuay", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 7 de abril de 2025

  
F: .....  
Johanna Priscila Gualan Andrade  
1401062169

## **CERTIFICACIÓN**

Yo, Ing. M.Sc César Humberto Maldonado Noboa, certifico que el presente trabajo de titulación realizado por la Srta. Johanna Priscila Gualan Andrade, egresada de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, fue desarrollado bajo mi supervisión y tutoría con el tema **“EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA EN EL TRAZADO GEOMÉTRICO DE 2 VÍAS RURALES EN TERRENOS MONTAÑOSOS DE LA PROVINCIA DEL AZUAY”**.

Atentamente,

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



Escanea el código QR para verificar la autenticidad de la firma digital.  
**CESAR HUMBERTO  
MALDONADO NOBOA**

.....  
**Ing. MSc. César Maldonado Noboa**

**C.I: 0102260916**

**DOCENTE - TUTOR**

## DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación realizado con esfuerzo, dedicación y rigor se lo dedico principalmente a Dios, por acompañarme y guiarme durante este trayecto de estudio, quien me impulsa día a día a seguir, a vencer y a superar obstáculos que se han presentado a lo largo de mi vida.

Expreso mi gratitud y dedico este logro principalmente a ustedes familia Loja Zhiñin, que han sido siempre como mis padres, que fueron mis pilares fundamentales y han sabido una enseñanza en mi vida, quienes me han brindado su apoyo incondicional en todo momento y me han impulsado a seguir adelante. Pero nunca conté que la vida me quitara tan pronto a ti papi como te solía llamar, a pocos meses de culminar mi meta el cual fuiste mi apoyo principal para llegar entrar a la universidad y estudiar. Ahora desde arriba celebrarás este gran logro que estoy por cumplir gracias a ti.

A mi tía María, por el cariño, apoyo y sacrificio que me supo brindar durante estos años de estudio, quien me supo brindar consejos y palabras de aliento para superar los desafíos que se fueron dando durante mi formación académica y personal.

A mi mami Carmen, por el apoyo moral que nunca faltó para conseguir este objetivo.

A mis primos y ñaños, por el apoyo incondicional en mi etapa universitaria y por los buenos consejos y cariño en esta etapa, en especial a mi ñañita Jackeline por darme su amor, cariño y siempre estar ahí pendiente de mí, que nada me faltara para mis estudios.

A mis amigas, les agradezco por el apoyo y cariño que me supieron dar, por las risas y compañía que me han aligerado durante este tiempo de estudio, transformándolo en una experiencia inolvidable.

Johanna Priscila Gualan

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca, en especial a la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios académicos.

A mi tutor, el Ing. Mag. César Humberto Maldonado Noboa, por brindarme su tiempo, paciencia, orientación y conocimientos que han sido fundamentales durante todo este proyecto de investigación. Igualmente, a la Ing. Daniela Ortiz Abril, por sus valiosas observaciones, sugerencias y sobre todo su paciencia que han sido esenciales para llevar a cabo este trabajo.

Y a todos los docentes que supieron instruirme con sus conocimientos, experiencias y sabiduría para mi formación académica como estudiante.

## **Resumen**

La presente investigación evalúa la consistencia del diseño geométrico en dos vías rurales de la parroquia Ricaurte, en la provincia del Azuay, mediante el análisis de velocidades de operación, con el objetivo de identificar inconsistencias que afecten la seguridad vial y proponer mejoras. En Ecuador, los accidentes de tránsito en carreteras rurales están asociados a la falta de correspondencia entre la velocidad de diseño y la velocidad real de operación, lo que genera cambios bruscos en la conducción y aumenta el riesgo de accidentes. La justificación de este estudio se fundamenta en la necesidad de optimizar la infraestructura vial para reducir la siniestralidad y garantizar una circulación segura y eficiente. La metodología empleada combina un enfoque cuantitativo y cualitativo, utilizando levantamientos topográficos con RTK, reconstrucción geométrica en AutoCAD Civil 3D y mediciones de velocidad en campo en el centro de las curvas. Se utilizó la velocidad de operación a partir de los recorridos realizados en los tramos de estudio y se comparó con la velocidad de diseño establecida, siguiendo los criterios propuestos por Lamm para evaluar la consistencia del trazado geométrico.

El tramo de la vía a Bibin presenta un diseño geométrico que cumple con las expectativas de los conductores por la buena consistencia que tiene la vía. En cuanto a la vía Ricaurte-Llacao se identificó que no presenta un buen diseño geométrico adecuado ya que existen radios muy pequeños que provoca que los conductores tiendan a realizar cambios en su velocidad de operación por la mala consistencia que presenta.

*Palabras Clave:* Consistencia, diseño geométrico, velocidades de operación, curvas horizontales, Método de Lamm

## **Abstract**

This research evaluates the consistency of the geometric design of two rural roads in the parish of Ricaurte, province of Azuay, by analyzing operating speeds to identify inconsistencies that affect road safety and propose improvements. In Ecuador, traffic accidents on rural roads are associated with a mismatch between the design speed and the actual operating speed, which leads to abrupt changes in driving behavior and increases the risk of accidents. The justification for this study is based on the need to optimize road infrastructure to reduce accidents and ensure safe and efficient circulation. The methodology combines quantitative and qualitative approaches, using topographic surveys with RTK, geometric reconstruction in AutoCAD Civil 3D, and field speed measurements at the center of curves. The operating speed was determined based on the routes taken in the study sections and compared with the established design speed, following the criteria proposed by Lamm to evaluate the consistency of the geometric layout.

The Bibin Road section features a geometric design that aligns with drivers' expectations due to the good consistency of the road. In contrast, the Ricaurte-Llacao road lacks a good geometric design since there are minimal radii which causes drivers to make changes in their operating speed due to the poor consistency of the road.

*Keywords:* consistency, geometric design, operating speeds, horizontal curves, Lamm's

Method

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b> .....	IV
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	V
<b>Resumen</b> .....	VI
<b>Abstract</b> .....	VII
<b>Capítulo I</b> .....	1
1. Generalidades.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes generales .....	2
1.3 Área de estudio .....	3
1.4 Planteamiento del problema.....	4
1.5 Justificación del problema .....	6
1.6 Objetivo general y específicos .....	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivo específico .....	7
<b>Capítulo II</b> .....	8
2. Marco teórico .....	8
2.1 Consistencia de una vía.....	8
2.2 Diseño geométrico .....	9
2.2.1 Alineamiento horizontal en carreteras .....	9
2.2.2 Alineamiento vertical.....	11
2.3 Distancia de visibilidad.....	15
2.4 Variables que influyen en la seguridad de una carretera .....	16
2.5 Velocidad .....	17
2.5.1 Velocidad de diseño.....	17
2.5.2 Velocidad de operación.....	18
2.5.3 Velocidad específica de un elemento de trazado .....	19

2.6	Perfil de velocidades .....	19
2.7	Modelos para estimar la velocidad de operación .....	20
2.7.1	Velocidad en curvas .....	20
2.7.2	Velocidad en tangentes .....	22
<b>Capítulo III</b> .....		24
3.	Metodología .....	24
3.1	Método de investigación .....	24
3.2	Tipo de investigación .....	24
3.3	Métodos para valorar la consistencia en el trazado geométrico de una vía .....	25
3.3.1	Método basado en la geometría de la carretera .....	25
3.3.2	Métodos basados en la velocidad de los vehículos .....	27
3.3.3	Método de la carga de trabajo del conductor .....	33
3.3.4	Método basado en la estabilidad del vehículo .....	35
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	38
<b>Capítulo IV</b> .....		40
4.	Evaluación de la consistencia en tramos viales .....	40
4.1	Datos recolectados de la geometría de los tramos de estudio .....	40
4.2	Velocidad de operación estimada con modelos .....	47
4.2.1	Velocidad de operación en curvas horizontales .....	47
4.3	Velocidades medidas de operación en curvas horizontales .....	50
4.4	Perfil de velocidades .....	53
4.5	Comparativa de velocidad calculadas vs velocidad medidas en campo .....	54
4.6	Comparación de la velocidad de operación con la velocidad diseño .....	56
4.7	Análisis de resultados .....	59
<b>Conclusiones</b> .....		68
<b>Recomendaciones</b> .....		69
<b>Bibliografía</b> .....		70

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Índice de la consistencia según Lamm del criterio I</i> .....	30
Tabla 2 <i>Índice de la consistencia según Lamm del criterio II</i> .....	31
Tabla 3 <i>Ecuaciones para estimar la velocidad de operación de los vehículos</i> .....	32
Tabla 4 <i>Niveles de consistencia basados en la estabilidad del vehículo</i> .....	37
Tabla 5 <i>Condiciones del tramo de la vía Bibin</i> .....	45
Tabla 6 <i>Coordenadas del inicio y fin de la vía</i> .....	45
Tabla 7 <i>Condiciones del tramo Ricaurte-Llacao</i> .....	47
Tabla 8 <i>Coordenadas del inicio y fin de la vía</i> .....	47
Tabla 9 <i>Características geométricas y velocidades de operación con modelos de la vía a Bibin</i> .....	49
Tabla 10 <i>Características geométricas y velocidades de operación con modelos de la vía Ricaurte-Llacao</i> .....	50
Tabla 11 <i>Velocidades tomadas en campo y velocidad de diseño del tramo de la vía a Bibin</i> .	52
Tabla 12 <i>Velocidades tomadas en campo y velocidad de diseño del tramo Ricaurte-Llacao</i> .	53
Tabla 13 <i>Principio del criterio I de Lamm et al, de la vía a Bibin</i> .....	57
Tabla 14 <i>Principio del criterio I de Lamm et al, de la vía Ricaurte-Llacao</i> .....	57
Tabla 15 <i>Principio del criterio II de Lamm et al, de la vía a Bibin</i> .....	58
Tabla 16 <i>Principio del criterio II de Lamm et al, de la vía Ricaurte-Llacao</i> .....	58
Tabla 17 <i>Promedio de la diferencia entre velocidades de las curvas de la vía a Bibin</i> .....	60
Tabla 18 <i>Promedio de la diferencia entre velocidades de las curvas de la vía a Ricaurte-Llacao</i> .....	60
Tabla 19 <i>Estimación de la consistencia del criterio I de Lamm et al. de la vía Bibin</i> .....	61

Tabla 20 <i>Estimación de la consistencia del criterio I de Lamm et al. de la vía Ricaurte-Llacao</i> .....	61
Tabla 21 <i>Estimación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al, vía a Bibin</i> .....	64
Tabla 22 <i>Estimación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al, vía Ricaurte-Llacao</i> .....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Rutas a ser analizadas</i> .....	4
Figura 2 <i>Perfil de velocidad</i> .....	19
Figura 3 <i>Ubicación del tramo de las carreteras que comunica a Ricaurte con las parroquias aledañas</i> .....	41
Figura 4 <i>Configuración del equipo RTK (base)</i> .....	42
Figura 5 <i>Toma de puntos en el eje de la vía con el Rober</i> .....	43
Figura 6 <i>Radios mínimos y grados máximos de curvas horizontales para distintas Velocidades de Diseño</i> .....	44
Figura 7 <i>Radios mínimos y grados máximos de curvas horizontales para distintas Velocidades de Diseño</i> .....	46
Figura 8 <i>Restitución del alineamiento horizontal</i> .....	48
Figura 9 <i>Toma de velocidades de operación en la vía a Bibin</i> .....	51
Figura 10 <i>Toma de velocidades de operación en la vía Ricaurte-Llacao</i> .....	52
Figura 11 <i>Gráfica de velocidades calculadas y las velocidades medidas en un punto de la curva (Vía a Bibin)</i> .....	54
Figura 12 <i>Gráfica de velocidades calculadas y las velocidades medidas en un punto de la curva (Ricaurte-Llacao)</i> .....	55
Figura 13 <i>Estimación de la consistencia Criterio I de Lamm, vía a Bibin</i> .....	62
Figura 14 <i>Estimación de la consistencia Estimación de la consistencia Criterio I de Lamm, vía Ricarte-Lllacao</i> .....	63
Figura 15 <i>Estimación de la consistencia Criterio II de Lamm, vía a Bibin</i> .....	66
Figura 16 <i>Estimación de la consistencia Criterio II de Lamm, vía Ricarte-Lllacao</i> .....	66

## Capítulo I

### 1. Generalidades

#### 1.1 Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), en su publicación acerca del panorama global de la seguridad en las carreteras, el número de muertes anuales debido a incidentes viales alcanzó 1,19 millones en el año 2021, se ha visto una disminución del 5% desde 2010. Algunos de los Estados Miembros de las Nacionalidades dedujeron que el 92% de las muertes se producen en países de ingresos bajos y medio. Se estima que las muertes causadas por el tránsito el 69% de los fallecidos son personas entre 18 y 59 años y el 23% tiene 60 años o más (Organización Mundial de la Salud, 2023).

La Agencia Nacional de Tránsito en el Ecuador ha registrado un total de 20,994 de accidentes de los cuales 2,373 personas fallecidas en el 2023 en vías interurbanas. El número de víctimas mortales es mayor en estas carreteras interurbanas que en vías convencionales en los últimos años. En el Ecuador la mayor parte de vías son de dos carriles lo que genera que estas cobren un papel importante en el diseño geométrico para que tengan una buena seguridad vial.

Hay tres elementos clave que causan colisiones de vehículos: el ser humano, la infraestructura y el automóvil. Se calcula que el 30% de los siniestros que suceden en las carreteras es por el aspecto de la infraestructura. De este modo, los accidentes se dan en ciertos segmentos de la carretera, uno de los elementos son las curvas horizontales. Las causas que con mayor frecuencia que se reportan es por exceso de velocidad en el diseño de la vía, estado de la vía, entre otros (Llopis Castelló David, 2017).

En el Ecuador existen tres regiones plenamente diferenciadas, estos son la Costa, la Sierra y la Amazonía, la presente investigación se centra en la región Sierra, en donde la

orografía del terreno es muy accidentada con pendientes longitudinales variables llegando en algunos casos al 14 y 16 % en vías de segundo orden. En el diseño geométrico, la velocidad de diseño esta influenciada por las condiciones topográficas del terreno. Esta velocidad es la base para determinar las características principales de los elementos geométricos tanto como los radios de curvatura y las pendientes de un corredor vial y debe ser aquella en la que los conductores no sean sorprendidos por cambios bruscos en la velocidad con la que circulan.

La protección es uno de los factores más cruciales al diseñar la geometría de una carretera, la misma debe contar con armonía entre los elementos geométrico, el terreno, la topografía y las expectativas del conductor. En esta investigación se pretende analizar la consistencia en el trazado geométrico en dos tramos de vías ubicados en la parroquia de Ricaurte del cantón Cuenca.

Se ejecutará mediante el análisis de la velocidad de operación de los vehículos que circulan por la vía de estudio, para ello se hará un análisis de velocidades de operación, con las de diseño, realizando una comparación entre ellas. Se busca determinar que los trayectos examinados sean consistentes, identificando aquellos probables de tener accidentes en la circulación de los vehículos.

## **1.2 Antecedentes generales**

La consistencia geométrica de las carreteras rurales en las regiones montañosas es un factor crucial en la planificación y el diseño de la carretera, ya que tiene un impacto directo en la seguridad y la operación del sistema de transporte. La topografía escarpada del terreno en la provincia de Azuay presenta desafíos significativos en el diseño de carreteras, lo que hace necesario implementar regulaciones técnicas que regulen los parámetros geométricos de las vías. En Ecuador, la Normativa Ecuatoriana Vial (NEVI) 12 define las pautas de diseño de carreteras que consideran la seguridad, la comodidad y la eficiencia operativa, con un énfasis

particular en la adaptación a las condiciones del terreno. Además, la ley orgánica de Transporte, Tránsito y Seguridad Vial define el marco legal que rige la planificación, la construcción y el mantenimiento de la infraestructura vial, con un enfoque en garantizar la seguridad y la reducción de los accidentes de tráfico

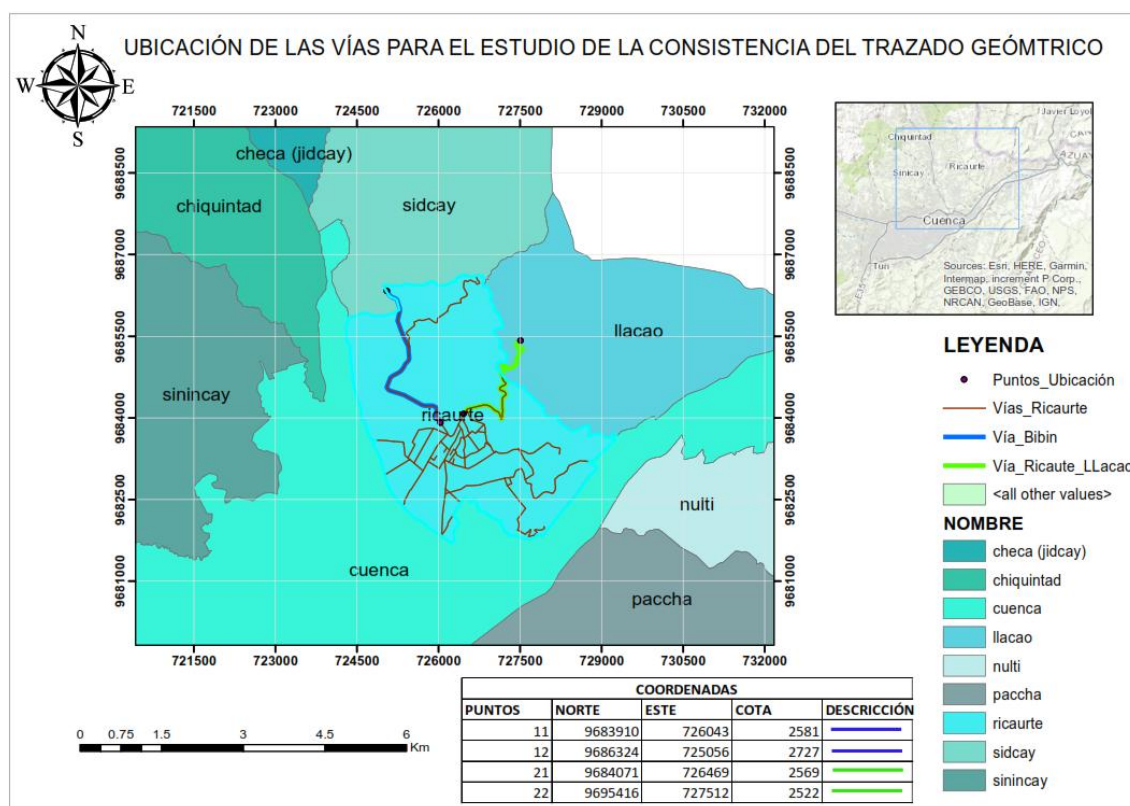
La evaluación de la consistencia geométrica en este escenario permite la identificación de variaciones entre el diseño teórico de la carretera y el comportamiento práctico del conductor, que puede tener un impacto en la seguridad vial. El riesgo de accidentes aumenta con movimientos repentinos causados por una ruta geoméricamente variable. En resultado, el análisis de la consistencia geométrica es necesario para garantizar que las alineaciones horizontales y verticales sean predecibles y adecuadas para las velocidades de operación anticipadas. La implementación de estos criterios en la provincia de Azuay es necesaria para mejorar la conectividad y la accesibilidad de las comunidades rurales, al tiempo que garantiza un sistema de carreteras con condiciones geográficas y al comportamiento del tráfico del área.

### **1.3 Área de estudio**

La zona de estudio se ubica al sur del Ecuador, en la provincia del Azuay, al noreste de la ciudad de Cuenca en la parroquia Ricaurte, (Figura 1). Esta zona se caracteriza por tener pendientes altas, debido a que se encuentra en la región interandina. Las 2 vías de estudio constan de una sola calzada de dos carriles, uno por cada sentido de circulación.

Figura 1

*Rutas a ser analizadas*



Fuente: La Autora

#### 1.4 Planteamiento del problema

Las vías en Ecuador son creadas con un enfoque geométrico, basándose principalmente en la velocidad para la que han sido planteadas, muchas de las veces los usuarios no se acomodan a dicha velocidad. Los accidentes están relacionados al exceso de la velocidad, a no llevar la respectiva distancia entre vehículos, por desobediencia a las señales de tránsito, etc. De este modo, Radimsky et al., (2016) menciona que los tramos más propensos a accidentes con un 55% se produce en las tangentes de las carreteras, el segundo son en las intersecciones con un 30% y con el 20% de accidentes se presentan en las curvas horizontales. Muchos de los accidentes se dan por la baja consistencia que existe en el diseño, entendiéndose la consistencia en un diseño geométrico como los cambios que se dan en la velocidad de operación de los

vehículos en tramos de vías a lo largo del proyecto, en algunas ocasiones dichos cambios pueden ser significativos por geometría de la vía, señalización, zonas consolidadas y deterioro de la capa de rodadura de la estructura de pavimento, de modo que la velocidad de diseño no sea modificada por la velocidad de condición.

Es necesario buscar un diseño geométrico consistente que establezca una correcta conexión entre los componentes de la carretera y las propiedades geométricas de diseño sobre el terreno, favoreciendo así a los conductores a lograr una movilidad adecuada sobre la vía, de modo que se tenga una homogeneidad en el trazado y no experimentar variaciones repentinas en los tiempos de recorrido, pues los conductores tendrán una sensación de tranquilidad, comodidad y seguridad, disminuyendo así los accidentes.

Una mala consistencia en la geometría de la vía, provoca cambios bruscos de la velocidad, accidentes lo que causa conflictos y fricciones laterales entre vehículos y con los peatones (Llopis Castelló, 2020).

La investigación se enfoca en identificar y aplicar el método más apropiado para analizar la consistencia del diseño de las carreteras en dos vías rurales, tomando en cuenta tanto la percepción y experiencia del conductor como los aspectos técnicos de la infraestructura. Para ello, se analizarán las velocidades de operación que los conductores realmente alcanzan y cómo estas se correlacionan con la geometría y características del trazado actual de las carreteras, tales como curvas, pendientes y ancho de calzada. El objetivo es lograr un análisis integral que permita verificar si el diseño de las vías cumple con los parámetros de seguridad y confort desde la perspectiva del usuario, asegurando una armonía entre la infraestructura y el comportamiento del vehículo.

Se realizará mediante el análisis de metodologías como: son la velocidad del vehículo, geometría de la carretera, carga de trabajo y la estabilidad del vehículo, después de la revisión

bibliográfica se seleccionará una de ella para ser ejecutada en las vías. Se busca determinar que los trayectos examinados sean consistentes, identificando aquellos trayectos probables de tener accidentes debido a la circulación de los vehículos.

### **1.5 Justificación del problema**

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2024) en el Ecuador se han registrado 490 personas fallecidas en los tres primeros meses del 2024, comparando con el mes de abril- junio se ha observado 548 fallecidos debido a accidentes de tránsito, esto se debe a la imprudencia de los conductores, en especial por exceso de velocidades y no respetar señales de tránsito los cuales son los principales factores de accidentes en la patria. Este problema puede ocurrir por la falta de consistencia en el trazado geométrico.

La construcción de vías sin diseños geométricos adecuados ha sido una preocupación en la ingeniería civil, ya que esto puede generar serios problemas de seguridad y eficiencia en la infraestructura vial. Diversos estudios científicos destacan cómo la falta de planificación técnica, como el diseño de intersecciones, curvas y elementos verticales, puede causar accidentes y congestión vehicular. Por ejemplo, en algunas ciudades, como Bogotá, la falta de planificación ha llevado a la creación de intersecciones mal diseñadas que no consideran la topografía o el drenaje adecuado, lo que afecta tanto la funcionalidad como la seguridad de las vías (Campagnoli, 2017).

En Colombia, se señala que, aunque las normas de diseño para carreteras rurales y urbanas están establecidas por instituciones como INVIAS, existe una falta de directrices específicas para el diseño de vías urbanas. Esto se traduce en que muchos diseñadores usan software para agilizar los cálculos, pero sin integrar los parámetros normativos que garanticen una mayor seguridad y eficiencia en el diseño (Uribe C., 2009).

En Ecuador, otro análisis sobre señalización en carreteras resalta la importancia de líneas centrales y laterales bien mantenidas en el pavimento, que son esenciales para la organización y la seguridad del tráfico. Sin embargo, este mantenimiento suele ser insuficiente, especialmente en vías con alto volumen de tráfico, donde el desgaste de la señalización puede dificultar la visibilidad y provocar accidentes (Paguay & Alarcón, 2014).

Por estos sucesos se han desarrollado métodos en varios países como Alemania y Estados Unidos por diferentes autores para determinar la consistencia en las vías. Por lo tanto, si existe una correspondencia entre el conductor y el trazado geométrico, la velocidad será continua sin sobresaltos, que beneficia a la circulación segura. Por consiguiente, se propone llevar a cabo una investigación en dos tramos viales rurales, aplicando una de las metodologías investigadas.

La investigación entonces, se centra en determinar la metodología más adecuada, para evaluar la consistencia del trazado vial de dos carreteras, que respondan a las perspectivas del conductor, evaluando las velocidades de operación versus la geometría existente.

## **1.6 Objetivo general y específicos**

### **1.6.1 Objetivo general**

Evaluar la consistencia del diseño geométrico de dos vías rurales, mediante una metodología que permita identificar y validar los elementos geométricos y la eficiencia del tránsito, con la finalidad de plantear mejoras en las condiciones de operación.

### **1.6.2 Objetivo específico**

- Revisar bases bibliográficas referente a metodologías de análisis de la consistencia en el diseño geométrico, análisis de casos.

- Determinar una metodología que aplique para la evaluación de la consistencia en el trazado geométrico de vías rurales en terrenos montañosos.
- Aplicar la metodología para el análisis de la consistencia en dos vías de la parroquia Ricaurte.

## Capítulo II

### 2. Marco teórico

#### 2.1 Consistencia de una vía

El trazado geométrico de la vía es el aspecto más crucial de un plan de obra, la idea es lograr dar comodidad al usuario que transita en su vehículo. Para el diseño, hay que tener en cuenta la normativa vigente del país, la utilización de esta y suplementariamente normas o directrices internacionales en algunos casos son fundamentales para lograr proyectos bien diseñados, que prevean una operación y movilidad adecuada a las características como TPDA y jerarquía del viario. En algunos casos, el trazado geométrico no siempre cumple con las expectativas del conductor, haciendo que se sienta inconforme o inseguro en la vía, por lo tanto, nace la necesidad de llevar a cabo un análisis de los elementos geométricos, que se cumplan las expectativas del conductor, la comodidad y seguridad del trazado, y poder brindar a los conductores la posibilidad de realizar los recorridos en tiempos adecuados y favorables.

Cefalo et al., (2024) dice que los elementos de la geometría vial deben actuar, de forma coordinada, de modo que se produzca un rendimiento acorde entre el conductor y el vehículo. Por lo tanto, un diseño es considerado óptimo, si su geometría se encuentra acorde a las expectativas del conductor, de esta manera estos evitan maniobras críticas que puedan dar como resultado un accidente.

Para evaluar la consistencia del trazado geométrico, se han creado diversas metodologías para su análisis, las cuales se fundamentan en factores con la velocidad de operación, carga de trabajo, geometría de la vía, y la estabilidad del automóvil. Chaudhari et al., (2022) manifiesta que en investigaciones anteriores han demostrado que para determinar la consistencia se puede examinar utilizando cinco medidas de valoración: disminución de la velocidad en una curva horizontal en comparación con la tangente o una curva previa, radio medio, proporción entre el radio mínimo y el radio máximo, tasa promedio más bajo y la proporción entre el radio de la curva individual y el radio promedio. Estas medidas están relacionadas significativamente con la frecuencia de accidentes.

## **2.2 Diseño geométrico**

El diseño geométrico de una carretera consiste en la selección y dimensionamiento de sus elementos, considerando factores como la topografía y la orografía del terreno. Su objetivo es garantizar un trazado seguro, funcional y eficiente, adaptándose a las condiciones naturales y a las necesidades del tránsito. El diseñador procura que los conductores mantengan una velocidad constante durante su trayecto, que les induzca a una conducción libre de presión y sobresaltos, procurando lograr una circulación segura (A. L. Altamira, 2020).

### **2.2.1 Alineamiento horizontal en carreteras**

En el alineamiento horizontal, para enlazar tramos rectos con curvas en el diseño vial, se utiliza una transición gradual que parte de una tangente recta y conecta con una curva horizontal mediante puntos clave como el punto de curvatura (PC) y el punto de tangencia (PT). Esta transición busca asegurar la continuidad geométrica del trazado, garantizando condiciones de seguridad y confort para los conductores. Se recomienda la implementación de curvas de transición (como clotoides) para suavizar el cambio en la aceleración lateral y evitar movimientos bruscos al entrar o salir de la curva.

## **Curvas Horizontales**

El radio mínimo es un valor límite de la curvatura que está dado en función del valor máximo del peralte y el factor máximo de fricción lateral para una velocidad de diseño determinado. Existen fuerzas centrífugas que actúan en contra de la operación segura de los vehículos cuando entran y circulan por la curva (Norma Ecuatoriana Vial, 2013)

### **Curvas circulares simples**

Las curvas horizontales circulares simples son segmentos de circunferencia caracterizados por tener un radio constante, utilizados para enlazar dos alineaciones tangentes consecutivas dentro del diseño geométrico de una vía. Estas curvas representan la proyección horizontal de los trazados reales en el espacio tridimensional. No obstante, en la práctica, las curvas espaciales no siempre adoptan una forma estrictamente circular, ya que pueden verse influenciadas por variaciones en la topografía, el peralte y otros factores de diseño vial (Cárdenas Grisales, 2013).

### **Curvas circulares compuestas**

Las curvas circulares compuestas están integradas por dos o más curvas circulares simples que se enlazan entre sí.

Si bien no son de uso habitual, representan una solución eficiente en zonas montañosas, ya que permiten adaptar la vía a la topografía natural, reduciendo significativamente el movimiento de tierras. Asimismo, su implementación resulta conveniente en escenarios con restricciones geométricas, como en los accesos a puentes, pasos a desnivel e intersecciones, donde es necesario optimizar el diseño para ajustarlo a las condiciones del entorno (Cárdenas Grisales, 2013).

## **Peralte**

Es una sobre elevación de la parte exterior de un tramo de la vía en curva con relación a la parte interior del mismo con el fin de contrarrestar la acción de la fuerza centrífuga, por tal razón las curvas horizontales deben ser peraltadas. En vías rurales montañosas la tasa de sobrelevación es del 10% (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

## **Sobre ancho en curvas**

Los sobreanchos se emplean principalmente en curvas horizontales con radios pequeños y carriles estrechos, con el fin de facilitar las maniobras de los vehículos de manera eficiente, segura, cómoda y económica. Estos son necesarios para permitir que el eje trasero de vehículos pesados siga correctamente la trayectoria de la curva sin invadir el carril contrario, además de compensar la dificultad que experimenta el conductor para mantenerse centrado en su carril. Aunque en las carreteras modernas con carriles de 3.65 metros y alineamientos adecuados la necesidad de sobreanchos se ha reducido, sigue siendo esencial en situaciones donde las condiciones de la vía requieren ajustes adicionales para mantener la seguridad vial (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

### **2.2.2 Alineamiento vertical**

El alineamiento vertical debe garantizar una adecuada visibilidad para los conductores, controlando las variaciones abruptas en las pendientes para evitar esfuerzos excesivos en los vehículos. Además, es importante que las pendientes máximas y mínimas se ajusten a las normativas vigentes, que establecen valores para asegurar la operatividad eficiente y segura de la vía.

## **Curvas verticales**

El terraplén, por su parte se conforma de secciones rectas o tangentes, unidas mediante curvas parabólicas, teniendo como objetivo suavizar los cambios de las pendientes en el alineamiento vertical. La medida de cada componente del alineamiento vertical se toma en cuenta en base a la proyección horizontal, es decir, no se incluyen distancias en desnivel. El diseño de estas curvas debe asegurar las distancias de visibilidad adecuadas (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

### **Curvas verticales convexas**

La longitud mínima de la curva se establece en función de las necesidades de distancia de visibilidad para parar un vehículo, teniendo en cuenta una altura de ojo del conductor de 1.15 metros y una altura de objeto que se puede ver en la carretera de 0.15 metros. Esta longitud se establece en base a las exigencias de la distancia de visibilidad para parar un vehículo (Aldás Sánchez & Jami Maigua, 2022).

### **Curvas verticales cóncavas**

Por razones de seguridad, deben tener la longitud adecuada, de tal manera que la longitud de los rayos de la luz de los faros de un vehículo sea cerca de la distancia de visibilidad requerida para parar un vehículo (Aldás Sánchez & Jami Maigua, 2022).

## **Pendiente**

La pendiente de las tangentes verticales y la longitud de las curvas dependen principalmente de la topografía del terreno, del alineamiento horizontal, de la visibilidad, de la velocidad de diseño, etc. La pendiente mínima es de 0.5% para asegurar que el tramo de la calzada se pueda drenar las aguas superficiales (Alvaron Robles, 2022). Por otro lado, las

pendientes máximas dependen de la orografía del terreno y de la velocidad de diseño. En carreteras arteriales o de alto volumen de tráfico, se recomienda que la pendiente máxima no supere el 6%, para vías con terrenos montañosos es del 10% de pendiente máximo (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

Las inclinaciones a lo largo de una carretera son un componente fundamental del trazado vertical de una vía y tienen un impacto directo en la velocidad de operación, incidiendo en los mecanismos de aumento y disminución de la velocidad de los automóviles. En secciones con la pendiente descendente, la fuerza gravitacional genera un empuje adicional que ayuda a incrementar la velocidad. En cambio, en pendientes ascendentes, la fuerza de resistencia generada por el peso dificulta el progreso, lo que puede resultar en una disminución de la velocidad de operación. Como consecuencia, el comportamiento del conductor varía según la dirección de la pendiente: en descensos, la percepción de estabilidad y menor esfuerzo de conducción puede inducir mayores velocidades, mientras que en ascensos, la necesidad de compensar la resistencia al movimiento lleva al conductor a ajustar su aceleración para intentar mantener la velocidad deseada (Arias & Renolina, 2018).

### **2.2.3 Sección Transversal**

El diseño geométrico transversal de una carretera implica definir las dimensiones y la disposición de los elementos que conforman la vía, considerando su relación con el terreno natural en cada sección transversal perpendicular al alineamiento horizontal. Este proceso establece la rasante, el ancho de la calzada y otros componentes, como cunetas, taludes y bermas, permitiendo calcular de manera precisa los volúmenes de corte y relleno requeridos para la construcción. Este enfoque técnico es clave para garantizar que la carretera sea funcional, económica y adecuada a las características topográficas del entorno (Cárdenas Grisales, 2013).

## **Calzada**

Es la parte de la capa de rodadura. Es decir, es la sección transversal destinada a la circulación de los vehículos. Para el ancho y el número de carriles es acorde a la capacidad y el nivel de servicio de la vía. El proyectista analiza mediante la velocidad de diseño para un ancho del carril que va 3.00 m – 3.65 m respectivamente (Cárdenas Grisales, 2013).

## **Bermas**

La berma es la franja del borde entre la calzada y la cuenta, que proporciona protección al pavimento y a sus capas inferiores. Provee un espacio o adicional a los conductores para realizar maniobras en un caso de emergencia generando seguridad. Para el ancho de la berma depende de la categoría de la carretera (Ministerio de Transporte Instituto Nacional de vías, 2008).

## **Cunetas**

Son canales que se construyen en áreas de cortafuegos, a uno o ambos costados de una vía, con el objetivo de capturar el agua lluvia que se desprenda de la corona del camino, del pendiente de corte y pequeñas zonas circundantes. De acuerdo a su forma, pueden ser triangulares, rectangulares o trapezoidales, posiblemente debido a su sencillez en la construcción y mantenimiento (Aldás Sánchez & Jami Maigua, 2022).

## **Bombeo en recta**

El bombeo es la pendiente transversal de la capa de rodadura, se plantea de modo que se evacue con facilidad las aguas lluvias procurando que no exista encharcamientos. La inclinación transversal es del 2% mínimo que debe tener ambos lados (Ministerio de transporte, 2020).

## **Taludes**

Las pendientes o taludes son las áreas inclinadas que definen el nivel de una vía que no se expanda. En las secciones en corte, los taludes comienzan a partir del borde de la cuneta, mientras que en las secciones en terraplén se inician desde el extremo de la berma. La inclinación de estos taludes se determina con base en los estudios geológicos y geotécnicos realizados en el lugar, con el objetivo de garantizar la estabilidad del terreno y la seguridad estructural de la vía (Cárdenas Grisales, 2013).

## **2.3 Distancia de visibilidad**

### **Visibilidad en carreteras**

Unas de las características de las carreteras es que deberían ofrecer a los conductores una visibilidad suficiente como para poder ejecutar con seguridad las diversas maniobras, que puede surgir en el trascurso del recorrido por la carretera. “La distancia de visibilidad se define como la longitud continua de la carretera que es visible hacia delante por el conductor de un vehículo que circula por ella” (Cárdenas Grisales, 2013). Por ello, el usuario requiere de un tiempo de percepción y reacción para decidir la maniobra a ejecutar y un tiempo para llevarlo a cabo.

### **Distancia de Visibilidad de parada**

La visibilidad de parada en un carril se define como la distancia disponible entre un vehículo y un obstáculo en su trayectoria, en el momento en que el conductor lo detecta y este permanece dentro de su campo visual. Esta distancia se mide a lo largo del eje del carril y es fundamental para garantizar que el conductor pueda reaccionar y detenerse de manera segura ante cualquier eventualidad en la vía (Ministerio de transporte, 2020).

“Cuando el obstáculo es esperado, el tiempo de reacción puede ser desde 0.6 segundos hasta 2.0 segundos para los conductores más lentos en reaccionar. En situaciones inesperadas, el tiempo de reacción puede incrementarse en un 35 por ciento, elevando el dato más restrictivo a 2.7 segundos” (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

### **Distancia de visibilidad de adelantamiento**

La distancia de visibilidad de adelantamiento es el espacio mínimo que necesita el conductor de un vehículo para rebasar a otro que se desplaza en el mismo sentido a una velocidad menor. Durante esta maniobra, el conductor invade temporalmente el carril opuesto, asegurándose de que no afecta la trayectoria ni la velocidad del vehículo que se aproxima en dirección contraria. Además, esta distancia debe ser suficiente para que el conductor identifique al vehículo que viene en sentido opuesto desde el inicio de la maniobra y complete el adelantamiento de forma segura y cómoda ((Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

### **Distancia de visibilidad de encuentro**

En carreteras terciarias con calzada única y sin separación de carriles, la distancia de visibilidad de encuentro (De) corresponde a la longitud mínima del tramo de vía que permite a los conductores que viajan en direcciones opuestas detectar la presencia del otro con suficiente anticipación para ejecutar maniobras de evasión de manera segura (Cárdenas Grisales, 2013).

Esta distancia debe ser lo suficientemente extensa para que los vehículos que se desplazan a la velocidad de diseño puedan reducir su velocidad hasta 10 km/h y realizar la maniobra de cruce sin comprometer la seguridad de la circulación (Cárdenas Grisales, 2013).

## **2.4 Variables que influyen en la seguridad de una carretera**

Un diseño eficiente de las vías y la implementación de medidas de seguridad son cruciales para el desarrollo y bienestar del Ecuador. Esto demanda una planificación integral

que contemple las características geográficas y sociales del país, además de adopción de políticas y acciones que minimicen los riesgos de accidentes de tráfico (Zambrano-Palma et al., 2023).

El radio de las curvas, es otro elemento clave en un trazado de geometría, puesto que afecta de manera directa con la velocidad que opera y la manera en que los automóviles se comportan en la carretera. En estos giros con diámetros inferiores a 200 metros, la posibilidad de accidentes es el doble en comparación con ellas que tienen radios superiores a 400 metros. (Pinzon Martínez & Devia Urueña, 2015).

Las inclinaciones inferiores al 6% tienden a un impacto reducido en la probabilidad de incidentes. Sin embargo, cuando las pendientes superan el 6% se evidencia un aumento considerable en la tasa de accidentes. Las zonas en descenso son más peligrosas que las áreas planas, dado que en estos tramos se producen la mayor parte de los accidentes (Pinzon Martínez & Devia Urueña, 2015).

El ancho de los carriles y por ende de calzada es un aspecto crucial, ya que mejora la seguridad vial, al facilitar el cruce entre vehículos que circulan en direcciones opuestas. Varios estudios indican que, a mayor ancho de la calzada, se reduce la frecuencia de accidentes. Asimismo, en rutas de doble vía, un adecuado indicador de sobreaviso resulta fundamental para optimizar la seguridad de la vía (Pinzon Martínez & Devia Urueña, 2015).

## **2.5 Velocidad**

### **2.5.1 Velocidad de diseño**

La velocidad de diseño se basa en la importancia de la vía, del Tráfico Promedio Diario Anual, de la topografía del suelo y de las condiciones ambientales. La velocidad de proyecto es la velocidad máxima segura y confortable que se mantiene en un tramo de vía, está

relacionada directamente con las características geométricas tales como radios de curvas horizontales, radios de curvas verticales, ancho de carriles, distancia de visibilidad, etc. (Cárdenas Grisales, 2013).

La velocidad de diseño se determina considerando diversos factores, entre ellos las condiciones topográficas y su uniformidad. En terrenos más escarpados, la velocidad de diseño tiende a ser menor debido a las restricciones impuestas por la geografía del lugar. También influye la importancia o clasificación de la vía, ya que en autopistas o carreteras de primer orden se requiere una velocidad más elevada, generalmente igual o superior a 60km/h. Otro aspecto relevante es el volumen de tránsito previsto, pues un mayor flujo vehicular demanda una velocidad de diseño más alta para garantizar la funcionalidad de la vía, optimizando su capacidad y sosteniendo un desplazamiento continuo o eficiente de los vehículos.

### **2.5.2 Velocidad de operación**

La velocidad de operación es un indicador comúnmente utilizado para evaluar la consistencia del diseño de una vía. Se define como la velocidad a la que los vehículos circulan de manera continua en condiciones normales de flujo de tráfico. El percentil 85 en el área es el más empleado en disponer dicha velocidad, ya que refleja la velocidad a la que el 85% de los vehículos circula o por debajo de ella, y está vinculada directamente relacionada con las propiedades geométricas en la vía (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018).

También se puede interpretar como la velocidad de operación de un determinado tramo de carretera, la velocidad segura y cómoda a la que un vehículo aislado circularía por él, de modo que la velocidad no sea condicionada por factores como la intensidad de tránsito o la meteorología. Es decir, asumiendo un determinado nivel de velocidad en función solamente de las características de la vía.

### 2.5.3 Velocidad específica de un elemento de trazado

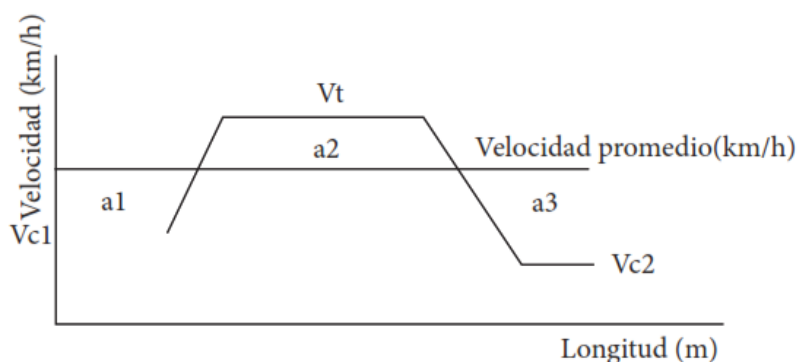
La velocidad específica de un elemento de diseño, es la máxima velocidad que se puede mantener a lo largo de un elemento de trazado en condiciones de confort y comodidad, cuando el pavimento está húmedo y los neumáticos están en buen estado, las condiciones climatológicas, del tráfico y las regulaciones son tales que no imponen limitaciones a la velocidad (Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

### 2.6 Perfil de velocidades

El perfil de velocidades, se trata de una representación gráfica que la distancia de la vía se encuentra en el eje horizontal y las velocidades de operación en el eje vertical. Su construcción se basa en el análisis de las velocidades de circulación a lo largo de los distintos elementos geométricos y los lineamientos tanto verticales como horizontales. En las vías que se encuentran en la fase de diseño o aún no construidas, este perfil se puede estimar mediante modelos de regresión que establecen la relación entre la velocidad de circulación y las características geométricas de las vías. Para carreteras ya en funcionamiento, se obtiene a partir de la distribución de velocidades de los conductores (Posada, 2014).

#### Figura 2

*Perfil de velocidad*



Fuente: (Posada, 2014)

a1: tasa de aceleración en valor absoluto ( $m/s^2$ )

a2: tasa de desaceleración en valor absoluto ( $m/s^2$ )

Vc1: velocidad en la curva anterior a la recta (km/h)

Vc2: velocidad en la curva posterior a la recta (km/h)

Vt: Velocidad en la tangente ubicada entre las dos curvas (km/h)

## **2.7 Modelos para estimar la velocidad de operación**

Como se puede apreciar, la velocidad óptima se calcula considerando la geometría característica de la carretera, su función dentro de la red vial y factores vinculados con los humanos. Esto implica que su variabilidad es considerablemente amplia.

Existen diversos modelos, en el cual, para poder obtener las velocidades en diferentes segmentos de una vía, hay que considerar el comportamiento de los conductores y las condiciones climáticas varían según el país. A continuación, se sintetizan los principales enfoques disponibles para estimar velocidades en recta y también en las curvas, así como los patrones de aceleración y frenado.

### **2.7.1 Velocidad en curvas**

En los últimos años, se han creado varios prototipos para estimar la velocidad de circulación en curvas. Si bien, estos modelos varían en cuanto a su estructura, las variables que consideran y los coeficientes de regresión. Además, el estilo de conducción varía de un país a otro, lo que implica que no existe un modelo universalmente aceptado. Esto da lugar a la ausencia de un modelo único que sea aceptado a nivel mundial. A pesar de las diferencias, los modelos comparten similitudes y se adaptan a las características particulares de cada región, ya que las condiciones de conducción en invierno o en climas más cálidos no son las mismas.

Por lo general, los modelos de predicción de velocidad se basan en las características geométricas de la carretera. En la mayoría de los casos, se utiliza una sola variante, como el radio de la curva o el grado de curvatura, ya que estas variantes permiten formulas ecuaciones sencillas y estrechamente relacionadas entre sí (Castro et al., 2008; Glennon et al., 1985; Kannellaidis et al., 1990; Lamm et al., 1988; Lamm & Choueiri, 1987; Misaghi & Hassan, 2005; Ottesen & Krammes, 2000; Taragin & Leisch, 1954).. Estos prototipos han demostrado un alto nivel de precisión, con valores de ajustes que varían 0.631 y 0.98.

Por otro lado, algunos modelos incorporan la tasa de cambio de Curvatura (CCR) como factor adicional para predecir la velocidad (Gammbard & Louah, 1986; Lamm et al., 1995, 1999; Lamm & Choueiri, 1987; Ottesen & Krammes, 2000; Zuriaga et al., 2010). Estos enfoques también ofrecen altos niveles de ajustes, con rangos que van desde 0.63 hasta 0.82, lo que subraya su efectividad para calcular la velocidad en estos tramos.

Algunos investigadores han considerado la longitud de la curva, así como el grado de curvatura o el radio de la curva para estimar la velocidad de operación (Castro et al., 2011; Krammes et al., 1995; Krammes & Glascock, 1992). Estos modelos han mostrado un alto nivel de ajuste, con coeficientes de correlación que varían entre 0.81 y 0.82.

Otras investigaciones, además de considerar las características geométricas de la alineación, también toman en cuenta aspectos relacionados con la sección transversal de la vía y el ancho de la vía por sentido, como por ejemplo (Dell'Acqua & Russo, 2010; Lamm & Choueiri, 1987) también existen otras investigaciones que le toman la velocidad en la recta próxima, realizados por (Abdul-Mawjoud & Sofia, 2008; McFadden & Elefteriadou, 1997, 2000). En estos trabajos muestran una alta correlación, con valores de R<sup>2</sup> que oscilan desde 0.712 a 0.90.

La mayoría de los análisis previamente citados suponen que la V85 se mantiene persistente a lo largo de toda la curva. Por lo general, la velocidad usada para calibrar los modelos y la que estos predicen corresponden al punto medio de la curva, donde la velocidad de operación es más baja. No obstante, algunos prototipos, como el trabajo de Islam & Seneviratne, (1994) en Estados Unidos, quienes propusieron tres modelos diferentes para estimar la velocidad en distintos puntos de la curva: al inicio, en el centro y al final. Estos modelos mostraron altos niveles de correlación, con valores de 0.99, 0.98 y 0.90, respectivamente.

No obstante, todos los modelos desarrollados han centrado su análisis únicamente en el alineamiento horizontal. No fue sino hasta el año 2000 cuando se introdujo un prototipo capaz de evaluar la V85 en ambas dimensiones, en el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical. Fitzpatrick et al., (2003), en Estados Unidos, incorporaron en sus cálculos la influencia de la inclinación de la rasante y la forma del alineamiento vertical, ya sea cóncavo o convexo. Los resultados obtenidos mostraron coeficientes de correlación que oscilan entre 0.53 y 0.92, evidenciando la relevancia de estos factores en la estimación de la velocidad.

### **2.7.2 Velocidad en tangentes**

La estimación de la velocidad de operación en tramos rectos presenta una mayor complejidad y menor precisión en comparación con las curvas. Esto se debe a que, en ausencia de aceleración lateral, los conductores no necesitan compensar fuerzas que puedan sacarlos del camino, lo que reduce la influencia del riesgo de despiste en la elección de la velocidad. Como consecuencia, la selección de la velocidad se fundamenta en otros factores, como la sección transversal, el entorno de la vía, el flujo de tráfico y la geometría del segmento (incluyendo la longitud de la recta o posibles variaciones en su alineación). Además, dado que estos criterios no están tan estrechamente relacionados a la expectativa de un accidente, su interpretación

varía entre los choferes, lo que genera una mayor dispersión en las velocidades registradas en tramos rectos. Como resultado, no solo se observa una mayor variabilidad en los datos, sino que, en términos generales, la velocidad promedio en estos segmentos tiende a ser más elevada en comparación con las curvas.

Pérez Zuriaga et al., (2011) la velocidad de operación en rectas puede distinguirse en dos tipos de rectas:

Rectas independientes: son segmentos rectos de longitud suficiente que permiten a los conductores alcanzar su velocidad deseada. En estas secciones, los factores que afectan la elección de la velocidad no son solo geométricos, sino que también pueden incluir variables como la sección transversal, el entorno de la vía y el flujo de tráfico. En tales situaciones, la dispersión de las velocidades es máxima, y los modelos obtenidos de diversas investigaciones suelen ser menos concluyentes, con coeficientes de determinación que son menos precisos.

Por otro lado, las rectas no independientes son aquellas de menor longitud, donde los conductores no pueden alcanzar su velocidad deseada debido a las limitaciones impuestas por la geometría general de la carretera o por la proximidad de alineaciones previas y/o posteriores. Dadas las circunstancias, la variabilidad de las velocidades es menor y los prototipos de valoración suelen incluir variantes en algunos elementos geométricos, como la distancia del tramo recto y en las curvas los radios.

En estudios realizados en Estados Unidos, Krammes et al., (1995) propusieron un valor de 97.9 km/h como la velocidad deseada, refiriéndose a aquella que los conductores seleccionan en condiciones de flujo libre, sin verse influenciados por la infraestructura vial. En otra investigación de Fitzpatrick & Collins, (2000), realizada en el mismo país, respaldaron este valor y destacaron que, en muchos casos, las velocidades en tramos rectos pueden incluso superar dicha estimación. En su estudio de 176 tramos rectos de carreteras convencionales,

encontraron que el percentil 85 oscilaba entre 93 y 104 km/h, por lo que consideraron que una velocidad de 100 km/h era adecuada para las rectas independientes.

## **Capítulo III**

### **3. Metodología**

#### **3.1 Método de investigación**

El enfoque de la investigación será aplicado, ya que se orienta a la utilización del conocimiento adquirido sobre las características generales de los factores geométricos de la vía y su relación con la consistencia del diseño geométrico.

La investigación será tipo retrospectiva, donde se investigará de fuentes secundarias, que nos permitirá obtener información de distintos autores que realizaron estudios o temáticas similares, en la evaluación de la consistencia del trazado de la geometría en carreteras rurales. Asimismo, se recurrirá a fuentes primarias, incluyendo la revisión de información de libros, y complementar los datos obtenidos con la información recolectada a través del levantamiento de datos en campo.

Mediante la información recolectada de las diferentes fuentes de información de las metodologías que pueden ser aplicadas para analizar la consistencia del diseño, se escogerá la más óptima y aplicable para nuestro análisis en las vías de la parroquia Ricaurte, permitiendo así lograr un resultado óptimo para la respectiva investigación.

#### **3.2 Tipo de investigación**

La investigación se ajusta a una de tipo aplicada, donde se emplean conocimientos teóricos en relación al tema en estudio, con el fin de obtener datos prácticos al analizar los parámetros de diseño con los que fueron construidas los tramos de las carreteras Ricaurte-Llacao y la vía Ricaurte – Bibin, por otro lado, se realizará un análisis abarcando tanto el

método cuantitativo como el cualitativo, para las dos vías con la finalidad de comparar los resultados finales. El análisis cuantitativo permitirá la obtención de datos numéricos, como mediciones de características geométricas, velocidades operativas y otros índices técnicos que serán fundamentales para la estimación de la consistencia del trazado geométrico de la carretera. Por otro lado, también tiene un enfoque cualitativo que se centrará en la observación directa y la interpretación de los resultados obtenidos. Esto incluirá la descripción de las condiciones operativas, y el análisis del impacto de las características geométricas sobre la experiencia del usuario.

### **3.3 Métodos para valorar la consistencia en el trazado geométrico de una vía**

#### **3.3.1 Método basado en la geometría de la carretera**

Para describir las características generales del diseño geométrico de una carretera, se utilizan índices de trazado, los cuales son herramientas cuantitativas basadas únicamente en los atributos geométricos de la vía. Estos indicadores incluyen parámetros como el radio medio de las curvas y la longitud promedio de los tramos rectos. Algunos están enfocados en elementos específicos, como la tasa de cambio de curvatura, lo que facilita el cálculo e interpretación. Debido a su utilidad en el análisis del diseño vial, diversas investigaciones han recomendado su aplicación, y algunos países han integrado estos índices dentro de sus normativas y procedimientos de planificación y diseño.

Algunos índices de diseño son dados por (Kay Fitzpatrick et al., 2000):

Índice en el trazado horizontal:

- Como principal tenemos el DC (grado de curvatura), que se determina entre la longitud de la curva y su radio.

- Otro es CCR (tasa de cambio de curvatura), se obtiene al sumar los ángulos de deflexión de un tramo y dividirlos por la longitud total del segmento analizado.
- Por otro lado, tenemos la relación del CL:RL (los radios de las curvas y la longitud total del tramo ), indica que porcentaje del trayecto está compuesto por curvas en comparación con la longitud de la vía.
- **Longitud promedio de tramos rectos, se calcula dividiendo la suma de las longitudes de los tramos rectos entre el número total de estos.**
- **El Ar (radio medio)**, es el promedio de los radios de todas las curvas en un tramo entre el número de curvas.
- **Radio entre el radio de una curva y el radio medio (CRR) es la relación entre el radio de una curva específica y el radio medio**

Índice en el trazado en vertical:

- La CCRV (tasa de cambio de curvatura vertical), que representa la variación de inclinación por kilómetro de vía, siendo semejante, en el plano vertical, del índice de cambio de la curvatura en planta.
- **La AVC (curvatura media vertical)**, se expresa como la relación entre la distancia de una curva vertical y la inclinación de cambio. Reflejando la distancia necesaria para logara una variación del 1% en la inclinación.
- La Ag (pendiente media), indica la variación de altitud entre marcas consecutivos de cambio de inclinación por cada kilómetro de carretera

Índices basados en la combinación del trazado en horizontal y vertical:

- En el CCR (combinado), se unifica la tasa de cambio de curvatura en ambas dimensiones para proporcionar una evaluación integral de la consistencia geométrica de la vía.

De los parámetros mencionados, aquellos destacados en negrita fueron los que, según Kay Fitzpatrick et al., (2000), mostraron la mayor correlación con la inconsistencia del diseño geométrico. En el estudio realizado por Castro et al., (2005), centrado exclusivamente en los índices de trazado, se recomienda el uso del VCCR (tasa de cambio de curvatura vertical), la CCR tasa de variación o una combinación entre ambos como parámetros para evaluar la consistencia.

### **3.3.2 Métodos basados en la velocidad de los vehículos**

La velocidad de operación es ampliamente reconocida como uno de los métodos más comunes y efectivos para valorar la consistencia en proyectos viales. Esto se debe a su facilidad de cuantificación y a que refleja de manera directa el comportamiento de los conductores. Según la American Association of State Highway and Transportation Officials, (2018) se define como: “La velocidad a la que se observa a los conductores operando sus vehículos durante las condiciones de flujo libre”. De manera práctica, se refiere a la V85 de la asignación de las velocidades, es decir, la velocidad alcanzada por el 85% de los vehículos en condiciones de tráfico fluido sin limitaciones externas.

Un estudio significativo llevado a cabo por Fitzpatrick & Collins, (2000) en carreteras de Estados Unidos analizó la relación entre la siniestralidad y las medidas de consistencia, especialmente aquellas relacionadas con las disminuciones de velocidad. El estudio analizó 5,287 de accidentes sucedidos en las curvas en un periodo de 3 años y utilizó algunas variables para examinar la relación entre los accidentes, el volumen de tráfico, la longitud de los tramos y las reducciones de velocidad. Aunque también exploraron los vínculos entre los accidentes y

varios indicadores geométricos, los resultados indicaron que la relación más fuerte estaba entre la siniestralidad y las relaciones de velocidad, más que con los índices del diseño geométrico de la vía.

Cefalo et al., (2024), realizó un estudio en una vía de Italia para el análisis de la consistencia de diseño, evaluó diferentes modelos de velocidad de operación (V85), tomó una curva de 500 metros de radio al inicio del tramo, la consistencia se evaluó utilizando los criterios de Lamm para los modelos de velocidad de operación, y la velocidad de diseño utilizó la normativa italiana. Se obtuvo la velocidad de operación con valores medios, los modelos tomaron en cuenta las características de los elementos generales de la vía, con esto se logró las velocidades deseadas. Para las carreteras con bajas variaciones de curvatura, los criterios tradicionales de consistencia no ofrecieron ninguna orientación útil, ya que los accidentes por si mismo fueron suficientes para identificar inconsistencia en el trazado. En Italia con carreteras con alineamientos generosos, la velocidad de funcionamiento supera constantemente las velocidades de diseño y la velocidad máxima permitida de la categoría de la vía.

En otra investigación Megersa Gemechu & Segni Tulu, (2021), se valoró la consistencia del diseño en alineaciones horizontales, para ello utilizaron medidas de consistencia del diseño y desarrollo de funciones de seguridad. Los elementos del tramo de la vía fueron considerados en la investigación, se clasificaron como bueno, regular y deficiente utilizando criterios de valoración del diseño. Se enfocaron en modelos de regresión de poisson y regresión binomial negativa para evaluar la relación entre las medidas de consistencia del diseño y la seguridad vial. Estos modelos son utilizados para predecir la colisión en carreteras rurales de dos carriles que tengan las características similares a de la carretera considerada en el estudio, se desarrolló en curvas horizontales y datos de las tangentes combinadas. Los resultados indicaron que la frecuencia de accidentes es inversamente proporcional a la consistencia del diseño. En las curvas con radios pequeños normalmente los conductores circularan con velocidades de

operación pequeñas mientras en tangentes largas tienden a ir a una velocidad grande. Por lo tanto, una sección tangente larga seguida de una curva con radio pequeño introducirá una gran diferencia entre la velocidad de circulación en flujo libre de curva horizontal y la tangente anterior.

En el estudio realizado por Cárdenas-Aguilar & Echaveguren, (2015), se ejecutaron dos modelos en 34 curvas horizontales de los carriles en Chile, para evaluar la consistencia. El primer prototipo examinó la diferencia entre la velocidad de diseño y también la velocidad de operación en el punto medio de las curvas horizontales aisladas. El segundo modelo consistió, en analizar la variación del perfil de velocidad de operación en las curvas horizontales. Se obtuvo que solo 19 casos los métodos coincidieron, lo que ocurrió cuando la variación en el perfil de velocidad era pequeña. Dando por conclusión que, si perfil de velocidad de operación es muy variable, quiere decir que el nivel de consistencia obtenido usando los dos métodos es diferente, caso en el cual resulta más conveniente combinarlos.

Camacho-Torregrosa et al., (2013) realizaron perfiles de velocidad de operación para 33 segmentos de carreteras rurales de dos carriles en España, y se verificaron varias mediciones de consistencia basadas en la velocidad de operación global y local. Los modelos utilizados para su construcción se obtuvieron utilizando un innovador método de recopilación de datos GPS, basado en perfiles continuos de velocidad de operación registrados de conductores individuales. Para el desarrollo del modelo de consistencia se consideró la frecuencia de accidentes para todos los sitios, obteniendo un modelo directamente relacionado con la seguridad, se obtiene del perfil de velocidad una correlación entre los índices de siniestralidad y diversas medidas.

Fitzpatrick et al., (2004), analizaron la relación entre la velocidad de diseño, la velocidad de circulación y de las carreteras normales el límite de velocidad. Calcularon que

para curvas con una velocidad de diseño inferior a 70 km/h, la velocidad de operación (V85) si es menor que la velocidad de diseño, y viceversa. Por lo tanto, llegaron a la conclusión de que una curva resultaba no ser consistente, si operaba a una velocidad superior a la especificada en su diseño, ya que esto indicaba que la curva había sido diseñada para una velocidad inferior a la que realmente los usuarios transitarían.

Muchos de los estudios sobre la evaluación de la consistencia en carreteras se basan en el método Lamm, el cual ha servido como fundamento para investigaciones adicionales. Este método establece 3 principios para evaluar la consistencia del trazado geométrico de las vías, la gran mayoría centrados para analizar que la velocidad de los conductores, siendo el Criterio II el de mayor uso.

**Criterio I.** Evalúa la relación entre la V85, y la velocidad de diseño de la vía. Además, define distintos rangos de clasificación para determinar el nivel de consistencia del trazado:

**Tabla 1**

*Índice de la consistencia según Lamm del criterio I.*

Nivel de consistencia	Intervalos	Sugerencias
Buena	$ V_{85} - V_d  \leq 10 \text{ km/h}$	Ninguna
Aceptable	$10 \text{ km/h} <  V_{85} - V_d  \leq 20 \text{ km/h}$	Controlar el límite de velocidad
Pobre	$ V_{85} - V_d  > 20 \text{ km/h}$	Modificar el diseño

Fuente: Extraído de (Lamm et al., 1999)

**Criterio II.** Se enfoca en la utilización en la V85 y la velocidad de diseño como parámetros clave, pero su propósito principal es analizar la uniformidad entre tramos consecutivos de la carretera. Es importante lograr un equilibrio entre las velocidades de estos elementos; en caso de que la topografía imponga cambios abruptos que modifiquen el

alineamiento y la velocidad con la que fue diseñado. Para mitigar estos efectos, dichas variaciones deben ser introducidas de manera progresiva. Esto permite evitar variaciones bruscas en la velocidad de operación, previniendo inconsistencias en el trazado. Los rangos de clasificación establecidos para este criterio son similares a los empleados en el Criterio I.

**Tabla 2**

*Índice de la consistencia según Lamm del criterio II*

Nivel de consistencia	Intervalos	Sugerencias
Buena	$ V_{85_i} - V_{85_{i+1}}  \leq 10 \text{ km/h}$	Ninguna
Aceptable	$10 \text{ km/h} <  V_{85_i} - V_{85_{i+1}}  \leq 20 \text{ km/h}$	Controlar el límite de velocidad
Pobre	$ V_{85_i} - V_{85_{i+1}}  > 20 \text{ km/h}$	Modificar el diseño

Fuente: Extraído de (Lamm et al., 1999)

**Criterio III.** Se enfoca en analizar la fuerza lateral que actúa sobre un vehículo debido a la interacción entre la superficie de rodadura y la inclinación transversal de la vía. Su objetivo principal es determinar si el coeficiente de fricción disponible es suficiente para cubrir las necesidades de adherencia del vehículo. Para ellos se estudia el proceder dinámico de los choferes a circular en las curvas, asegurando que se mantenga criterio examina la fuerza transversal generada por la capa de rodadura en relación con su inclinación transversal, con el objetivo de verificar si el coeficiente de rozamiento disponible en la vía es suficiente, es decir, igual o superior al que requiere el vehículo. Para ello, se analiza el comportamiento dinámico de los conductores en las curvas, el cual debería ser constante a lo largo del tramo evaluado. El cálculo tanto de la fricción que el vehículo demanda con la que la vía puede proporcionar es crucial.

### Modelos matemáticos de diferentes autores

Diferentes autores han desarrollado modelos matemáticos para evaluar la consistencia del trazado geométrico. En la Tabla 3 se presentan algunos de estos modelos, donde se observa que el radio de curvatura es una de las variables más representativas. Los estudios realizados evidencian que la geometría de la vía ha sido un factor estadísticamente significativo en la mayoría de los modelos desarrollados.

**Tabla 3**

*Ecuaciones para estimar la velocidad de operación de los vehículos*

<b>Autor (es)</b>	<b>Año</b>	<b>Expresión</b>	<b>País</b>
Taragin	1954	$V_{85}=88.87 - 2554.76/R$	E.U.A
Lamm y Choveiri	1987	$V_{85}=95.77 - 0.076CCR$ $V_{85}=96.15 - (2803.7/R)$	E.U.A
Lamm et al.	1990	$V_{85}=94.398 - 3188.656/R$	E.U.A
Kanellaidis et al.	1990	$V_{85}=129.88 - 623.1/(\sqrt{R})$	Grecia
Morrall y Talario	1994	$V_{85}=\exp(4.561 - 0.0058GC)$	Canadá
Pasetti y Fambro	1999	$V_{85}=103.9 - (3020.5/R)$	E.U.A
Ottesen y Krammes	2000	$V_{85}=102.44 - 1.57GC + 0.012Lc -$ $0.01*GC*Lc$	E.U.A
Gibreel et al.	2001	$V_{85}=102.2 - 0.10\Delta$	Canadá
Misaghi y Hassan	2005	$V_{85}=91.85 + 9.81 \times 10^{-3}R$ $V_{85}=94.30 + 8.67 \times 10^{-6}R^2$	E.U.A
Nie y Hassan	2007	$V_{85}=108.357 - 0.097CCR$	Canadá
Castro et al.	2008	$V_{85}=120.16 - 5596.72/R$	España
Castro et al.	2011	$V_{85}=91.1323 + 0.0328341*Lc -$ $0.48729*\Delta$	Colombia
R: Radio (m)		V85: Velocidad de operación en un punto (Km/h)	
GC: Grado de curva		CCR: Tasa de cambio de curva (m)	
$\Delta$ : Ángulo total girado o de deflexión (°)		Lc: Longitud de la curva (m)	
		VAT: Velocidad a la entrada de la curva (Km/h)	

Fuente: Extraído de (*Castro et al., 2011; García Depestre et al., 2012; Misaghi & Hassan, 2005*)

### **3.3.3 Método de la carga de trabajo del conductor**

Se define como el tiempo que un conductor dedica a realizar tareas relacionadas con la operación del vehículo. Su medición resulta complicada, ya que incluye factores físicos del conductor (como la edad, el sexo y el estado de salud), psicológicos (como la motivación y el estado de ánimo), así como elementos relacionados con el vehículo (modelo, nivel tecnológico, estado de conservación), el diseño de la carretera y las condiciones ambientales.

Según Messer, (1980) la carga cognitiva del conductor está directamente relacionada con la consistencia del diseño vial. Cuando una carretera presenta baja consistencia, la exigencia mental del conductor aumenta, lo que incrementa el riesgo de cometer errores al maniobrar.

Existen distintos métodos para calcular la carga de trabajo en una carretera (Pérez Zuriaga et al., 2011), los cuales se basan en la medición de variables psicofísicas, la evaluación de la distancia de visibilidad y el análisis de la demanda visual.

a distancia de visibilidad es un factor clave en la carga de trabajo del conductor. Cuando esta es limitada, el conductor debe actualizar constantemente la información sobre la vía y procesarla en menos tiempo, lo que genera una mayor exigencia cognitiva (Ng & Sayed, 2004). Existen pocos estudios enfocados en este aspecto (A. Altamira et al., 2010), aunque son más comunes los estudios sobre la demanda visual.

En una investigación realizada en Texas, se analizó la demanda visual en 24 conductores de diferentes edades mediante pruebas en una pista experimental. Los participantes utilizaron un visor que restringía su campo de visión, permitiéndoles observar solo en momentos específicos mediante un interruptor. Un sistema informático registró la frecuencia y duración

de las observaciones, así como la posición del vehículo en la pista. Con estos datos, se determinó que la relación entre la distancia recorrida mientras se observa la vía y el tiempo transcurrido entre cada observación es un indicador clave de la carga de trabajo del conductor. La demanda visual mide la cantidad de información que el conductor necesita procesar para mantener una trayectoria estable en la carretera (Wooldridge et al., 2000). Para su análisis, (Wooldridge et al., 2000) propusieron dos modelos distintos, diferenciando entre conductores familiarizados con la vía y aquellos que la recorren por primera vez.

$$VD_{LU} = 0.173 + \frac{43,0}{R}$$

$$VD_{LF} = 0.198 + \frac{29,2}{R}$$

Donde:

$VD_{LU}$ : Demanda visual para los conductores no familiarizados con la carretera

$VD_{LF}$ : Demanda visual para los conductores familiarizados con la carretera

R: Radio de la curva horizontal.

Krammes et al., 1995) sugirieron definir la carga de trabajo como el porcentaje en un periodo en el que el conductor necesita observar la carretera para mantenerse en su trayectoria. Unos de los criterios más utilizado es medir mediante una oclusora visual, que permite al conductor ver la vía solo cuando lo activa, registrando el tiempo total en que el ocluser está desactivado y la distancia recorrida en esos intervalos.

En un experimento basado en esta técnica, los participantes conducían con los ojos cerrados y los abrían únicamente cuando requerían información visual para orientarse. Un acompañante se encargaba de registrar la duración y la frecuencia de estos periodos de observación.

El análisis de los datos permitió determinar que el tiempo en el que los conductores mantenían los ojos abiertos en un tramo específico refleja la carga cognitiva necesaria para la conducción. A partir de estos resultados, se desarrolló un modelo de regresión para estimar la carga de trabajo promedio en curvas, proporcionando una herramienta útil para evaluar la exigencia mental impuesta por el diseño vial.

$$WL = 0.193 + 0.016DC \quad R^2 = 0.90$$

WL (WolkLoad): Carga de trabajo media en la curva en %

DC (Degree of Curvature): Grado de curvatura de la curva horizontal

R2: Coeficiente de determinación

Este enfoque presenta una limitación significativa en términos de precisión de los datos, ya que la recolección se llevó a cabo manualmente y dependió de la comunicación verbal entre el conductor y su acompañante.

Teóricamente, la carga de trabajo podría ser un indicador más preciso para identificar inconsistencias que la velocidad de operación, ya que se evalúa directamente sobre el conductor. En cambio, la velocidad de operación solo refleja el estilo de conducción, siendo una variable indirecta. No obstante, la carga de trabajo se utiliza con menor frecuencia debido a su principal inconveniente: la dificultad para medirla, debido a su carácter subjetivo (Krammes & Glascock, 1992).

### 3.3.4 Método basado en la estabilidad del vehículo

Diversos estudios sugieren que la estabilidad de los vehículos podría ser un factor clave para evaluar la consistencia del trazado de las vías, considerando que la fuerza centrífuga que actúa sobre los vehículos al tomar curvas horizontales afecta tanto la comodidad como la seguridad del conductor.

La estabilidad del vehículo depende de varios factores, entre ellos el centro de masa, la altura, la distancia entre los ejes y el ancho de las llantas. Un centro de masa elevado puede generar un mayor riesgo de vuelco en curvas cerradas o de gran inclinación debido a la fuerza centrífuga. Sin embargo, en este enfoque, la atención se centra principalmente en las fuerzas de fricción lateral entre las llantas y el pavimento durante las curvas. Si la fricción lateral es insuficiente, el vehículo podría desviarse, lo que indicaría una inconsistencia en el diseño del trazado. Para evaluar la estabilidad, se compara la fuerza de fricción lateral disponible con la fuerza necesaria para mantener la trayectoria en la curva (Ng & Sayed, 2004). Dado que la fricción lateral depende del peso del vehículo y del coeficiente de fricción entre las superficies de contacto, el peso se elimina en la ecuación, de manera que la estabilidad se determina por la diferencia entre la fricción lateral disponible y la fuerza requerida para evitar que el vehículo pierda su trayectoria en la curva.

$$\Delta f_R = f_R - f_{RD}$$

Nomenclatura:

$\Delta f_R$ : Es la estabilidad del vehículo

$f_R$ : Es el rozamiento transversal movilizado

$f_{RD}$ : Es el rozamiento demandado por el automovil

Lamm et al., (1999) realizaron una investigación en la que presentaron una aproximación cuantitativa para evaluar la consistencia del trazado, fundamentada en la estabilidad del vehículo. Esta medida se determina mediante la diferencia entre la fricción lateral disponible y la fricción lateral necesaria.

Desarrollaron un modelo ampliamente utilizado para evaluar la consistencia, destacando por su simplicidad. En este modelo,  $f_R$  (rozamiento transversal movilizado) se

calcula en función de la velocidad de diseño, mientras que  $f_{RD}$  (rozamiento demandado por el vehículo) se determina en función de la velocidad de operación, el radio de la curva y su peralte.

$$f_R = 0.22 - 1.79 \times 10^{-3}V_d + 0.56 \times 10^{-5}V_d^2$$

$$f_{RD} = \frac{V_{85}^2}{127R} - e$$

Donde:

$V_d$ : Velocidad de diseño (Km/h)

$V_{85}$ : velocidad que solo es sobrepasada por el 15% de los vehículos

R: Radio de la curva en m

E: Inclinación

Se formulo en función del  $\Delta f_R$ , que propone los niveles de consistencia como se muestra en la tabla 4:

**Tabla 4**

*Niveles de consistencia basados en la estabilidad del vehículo*

Valoración	Criterio III
Buena	$f_R - f_{RD} \leq 0,01$
Aceptable	$0,01 > f_R - f_{RD} \geq -0,04$
Pobre	$f_R - f_{RD} < -0,04$

Fuente: Extraído de (Lamm et al., 1999)

Este enfoque emplea una fórmula que vincula el radio, la velocidad, el peralte y la fricción para asegurar la estabilidad de los vehículos en las curvas. Sin embargo, algunos

estudios cuestionan este enfoque, ya que no considera el impacto conjunto de las curvas horizontales y verticales.

### **Metodología a aplicar en el análisis de la consistencia en proyecto viales**

La estrategia propuesta para evaluar la coherencia del trazado se apoya en el estudio de las metodologías empleadas en investigaciones anteriores, que se enfocan principalmente en determinar el perfil de velocidades operativas y compararlo con los parámetros geométricos de la vía.

La metodología expuesta tiene como propósito analizar el grado de armonía entre el diseño geométrico de la carretera y las expectativas del conductor al circular por ella. Este análisis busca evaluar la consistencia del trazado y su funcionamiento, elementos esenciales para garantizar la seguridad, confort y eficiencia del tránsito.

## **3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **Recopilación de datos**

El proceso de recopilación de datos se dividió en dos etapas: la colección de datos geométricos de la carretera y datos de las velocidades de los vehículos.

A partir de las formas de categorización se identificó que la velocidad es de fácil entendimiento por ser una variable cuantificable y altamente utilizada para evaluar la consistencia del trazado. Por tal razón, se identificó como la variable dependiente a tomar en campo.

### **Levantamiento de datos geométricos de las vías**

Se utilizará el equipo topográfico de medición RTK (Real Time Kinematic), es una técnica avanzada de navegación por satélite que combina señales GNSS con un módem de

radio, el cual obtendrá un sistema de coordenadas tridimensional, donde X y Y comprende a la planimetría, mientras que Z es la altimetría. Se procederá a dibujar los alineamientos tanto horizontal como vertical de los proyectos geométricos de los tramos en AutoCAD Civil 3D a partir de los datos levantados en campo.

### **Levantamiento de datos de velocidad de operación**

Los datos de velocidad incluidos en el presente estudio son de vehículos livianos que circulan a una velocidad libre. Las mediciones se realizarán en diferentes puntos representativos del tramo vial, considerando zonas rectas, curvas horizontales.

Se realizará la toma de datos en tres días consecutivos, en diferentes horas del día, se realizaran los estudios de velocidad en horarios entre las 8:00 am a 12:00 pm y 2:00 pm a 5:00 pm, no se efectuará en horas pico que corresponden a los períodos del día en los que se registra la mayor afluencia de tráfico vehicular, usualmente en la mañana y la tarde, cuando gran parte de la población se traslada hacia o desde sus lugares de trabajo, normalmente no se logran desarrollar la velocidad de circulación constante.

### **Cálculo de velocidades de operación estimadas con modelos matemáticos**

Se aplicarán modelos predictivos que correlacionen los parámetros geométricos con las velocidades promedio de operación en secciones del trazado, se utilizara radios de las curvas, grado de curvatura y el ángulo de deflexión para obtener las velocidades de operación.

### **Comparación de velocidades de operación con velocidades de diseño**

Se contrastan las velocidades de operación obtenidas con la velocidad de diseño ( $V_d$ ), definida en función de las características geométricas del trazado y las velocidades obtenidas en campo.

## **Evaluación de consistencia**

Se clasificarán mediante la propuesta de Lamm, los tramos según su nivel de consistencia geométrica: alta, media o baja.

Identificación de puntos críticos que pueden generar riesgos para los conductores debido a la inconsistencia geométrica.

## **Capítulo IV**

### **4. Evaluación de la consistencia en tramos viales**

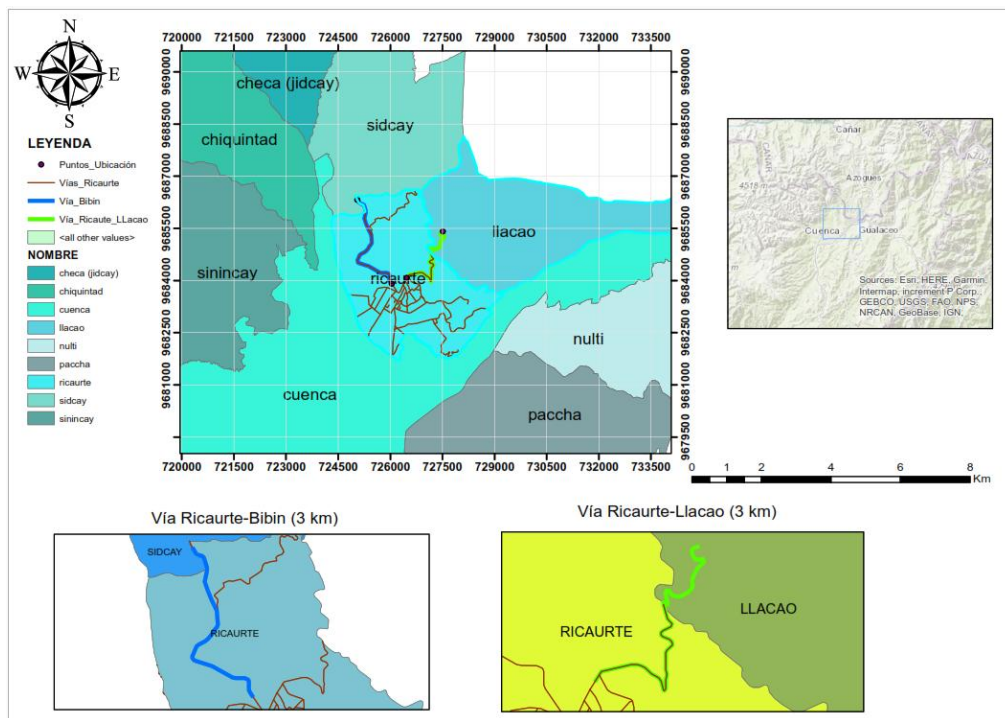
#### **4.1 Datos recolectados de la geometría de los tramos de estudio**

##### **Localización geográfica del proyecto**

La presente investigación se realizó en la parroquia Ricaurte, en dos tramos viales importantes de conectividad, el primero es Ricaurte – Bibin de 3.0 kilómetros, el segundo fue Ricaurte – Llacao así mismo de 3 kilómetros, estos tramos de estudios hacen parte de vías importantes que representan un canal de comunicación fundamental, de comunicación con las parroquias Sidcay y Llacao.

**Figura 3**

*Ubicación del tramo de las carreteras que comunica a Ricaurte con las parroquias aledañas*



Fuente: La Autora

### Diseño geométrico

Para evaluar la consistencia de un tramo vial, es fundamental disponer de información sobre los elementos del diseño geométrico, especialmente los radios de curvatura.

Para el caso de vías de reciente construcción, esta información es fácilmente accesible, ya que su diseño se elabora con software especializado que proporciona los datos necesarios. Sin embargo, en vías construidas hace varias décadas, la obtención de estos datos resulta más compleja, dado que muchas fueron diseñadas de manera empírica y carecen de registros formales sobre su geometría. Por lo tanto, es necesario reconstruir el trazado geométrico de las carreteras existentes.

Al no ser posible acceder a los planos del diseño geométrico de las vías objeto de estudio, se optó por realizar una reconstrucción del alineamiento en planta de las vías actuales. Este proceso se llevó a cabo utilizando la tecnología RTK (Real Time Kinematic), junto con los programas AutoCAD Civil 3D y Google Earth, herramientas que permitieron obtener las características geométricas de los tramos viales en cuestión.

***Figura 4***

*Configuración del equipo RTK (base)*



**Figura 5**

*Toma de puntos en el eje de la vía con el Rober*

**Tramo vial 00+00 vía a Bibin hasta 3+000**

Para calcular la velocidad de diseño en relación con el radio de curvatura, es necesario tener en cuenta la interacción entre el peralte, el coeficiente de fricción lateral y la geometría de la vía (ver Figura 6). En este caso, se emplea la tabla de referencia de la Normativa Ecuatoriana Vial donde se establecen los radios mínimos recomendados para distintos valores de velocidad de diseño y peralte.

## Figura 6

*Radios mínimos y grados máximos de curvas horizontales para distintas Velocidades de Diseño*

Velocidad de Diseño (Km/h)	Factor de Fricción Máxima	Peralte máximo 8%			Peralte máximo 10%		
		Radio (m)		Grado de Curva	Radio (m)		Grado de Curva
		Calculado	Recomendado		Calculado	Recomendado	
30	0.17	28.3	30	38° 12'	26.2	25	45° 50'
40	0.17	50.4	50	22° 55'	46.7	45	25° 28'
50	0.16	82.0	80	14° 19'	75.7	75	15° 17'
60	0.15	123.2	120	9° 33'	113.4	115	9° 58'
70	0.14	175.4	175	6° 33'	160.8	160	7° 10'
80	0.14	229.1	230	4° 59'	210.0	210	5° 27'
90	0.13	303.7	305	3° 46'	277.3	275	4° 10'
100	0.12	393.7	395	2° 54'	357.9	360	3° 11'
110	0.11	501.5	500	2° 17'	453.7	455	2° 31'
120	0.09	667.0	665	1° 43'	596.8	595	1° 56'

Fuente: (Norma Ecuatoriana Vial, 2013)

Se dispone de una curva mínima con un radio de 60 metros, para la evaluación se seleccionará un peralte máximo permitido, que en este caso es 10% (0.01).

En la tabla, se puede observar que para una velocidad de diseño de 50 Km/h, el radio calculado es 75.7 m y el recomendado 75 m. Para una velocidad de diseño de 40 Km/h, el radio es 46.7 m y el recomendado 45 m.

Dado que el radio de curvatura es de 60 m se encuentra entre los valores correspondientes a 40 Km/h y 50 Km/h, se puede inferir que la velocidad de diseño adecuada estará dentro de este rango. Para la determinación se aplicará una interpolación lineal utilizando los datos de la tabla.

Se obtuvo que para un radio de 60 m la velocidad de diseño es de 45 km/h, para el cual se utilizara para los distintos cálculos.

Se llevó a cabo el levantamiento de datos a lo largo de un tramo de 3 km, que atraviesa terrenos montañosos. Según la revisión de las normativas de diseño vigentes en Ecuador, se ha

estimado que la velocidad de diseño seleccionada es de 45 km/h. A continuación, en la Tabla 5, se presenta un resumen con los aspectos geométricos más importantes de este tramo.

**Tabla 5**

*Condiciones del tramo de la vía a Bibin*

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Tipo de terreno	N/A	Montañosa
Clasificación de la vía	N/A	Vías locales
Longitud	Km	3
Velocidad del proyecto	Km/h	45
Tipo de calzada	N/A	Pavimento flexible
Numero de calzadas	Un	1
Número de carriles	Un	2, uno en cada sentido
Ancho de carril	m	3.38
Ancho de berma	m	-

Fuente: La Autora

**Tabla 6**

*Coordenadas del inicio y fin de la vía*

<b>COORDENADAS</b>	<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>
INCIO	9683889.413	726061.505
FIN	9686297.128	725076.336

Fuente: La Autora

### **Tramo vial 00+00 vía Ricaurte-Llacao hasta 3+00**

Para determinar la velocidad de diseño en función del radio de curvatura, es necesario tener en cuenta la relación entre el peralte, el coeficiente de fricción lateral y la geometría de la vía (ver Figura 7). En este caso, se emplea la tabla de referencia la Normativa Ecuatoriana Vial donde se establecen los radios mínimos recomendados para distintos valores de velocidad de diseño y peralte.

**Figura 7**

*Radios mínimos y grados máximos de curvas horizontales para distintas Velocidades de Diseño*

Velocidad de Diseño (Km/h)	Factor de Fricción Máxima	Peralte máximo 8%			Peralte máximo 10%		
		Radio (m)		Grado de Curva	Radio (m)		Grado de Curva
		Calculado	Recomendado		Calculado	Recomendado	
30	0.17	28.3	30	38° 12'	26.2	25	45° 50'
40	0.17	50.4	50	22° 55'	46.7	45	25° 28'
50	0.16	82.0	80	14° 19'	75.7	75	15° 17'
60	0.15	123.2	120	9° 33'	113.4	115	9° 58'
70	0.14	175.4	175	6° 33'	160.8	160	7° 10'
80	0.14	229.1	230	4° 59'	210.0	210	5° 27'
90	0.13	303.7	305	3° 46'	277.3	275	4° 10'
100	0.12	393.7	395	2° 54'	357.9	360	3° 11'
110	0.11	501.5	500	2° 17'	453.7	455	2° 31'
120	0.09	667.0	665	1° 43'	596.8	595	1° 56'

Fuente: (Norma Ecuatoriana Vial, 2013)

Se dispone de una curva mínima con un radio de 25 metros, para la valoración se seleccionará un peralte máximo permitido, que en este caso es 10% (0.01).

En la tabla, se puede observar que para una velocidad de diseño de 30 Km/h, el radio calculado es 26.2 m y el recomendado 25 m.

Dado que el radio de curvatura es de 25 m se encuentra el valor correspondiente a 30 Km/h que es velocidad de diseño que nos da la tabla.

En un tramo adicional de 3 km, también en terrenos montañosos, y conforme a la normativa vigente en Ecuador, se ha determinado que la velocidad de diseño aplicable es de 30 km/h. La Tabla 7 muestra los aspectos geométricos más relevantes de este tramo.

**Tabla 7***Condiciones del tramo Ricaurte-Llacao*

VARIABLE	UNIDAD	VALOR
Tipo de terreno	N/A	Montañosa
Clasificación de la vía	N/A	Vías locales
Longitud	Km	3
Velocidad del proyecto	Km/h	40
Tipo de calzada	N/A	Pavimento flexible
Numero de calzadas	Un	1
Número de carriles	Un	2, uno en cada sentido
Ancho de carril	m	2.80
Ancho de berma	m	-

Fuente: La Autora

**Tabla 8***Coordenadas del inicio y fin de la vía*

COORDENADAS	NORTE	ESTE
INCIO	9684071.246.	726469.716
FIN	9685418.726	727517.622

Fuente: La Autora

## 4.2 Velocidad de operación estimada con modelos

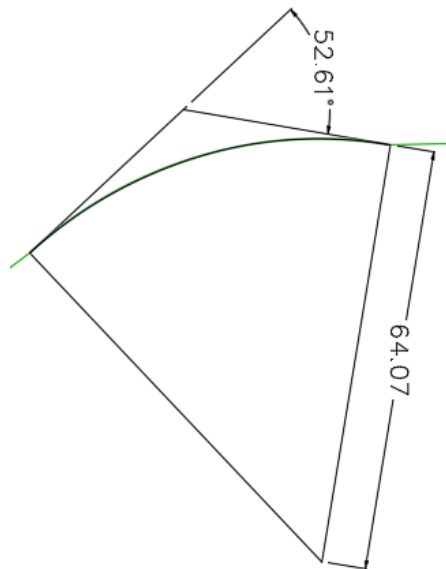
### 4.2.1 Velocidad de operación en curvas horizontales

Tras obtener el archivo DWG, se procedió a utilizar el software AutoCAD Civil 3D para su análisis. Con las polilíneas previamente generadas, se pudo obtener fácilmente la longitud de la curva y sus propiedades. Para determinar el ángulo de deflexión, bastó con medir angularmente las dos líneas tangentes que se habían trazado en el eje de la vía. Para calcular el radio de curvatura, se trazó un círculo que pasaba por los puntos de inicio y final de la curva,

lo que permitió definir la geometría de la vía. Un ejemplo de este procedimiento se ilustra en la Figura 8.

### Figura 8

*Restitución del alineamiento horizontal.*



Fuente: La Autora

Nota: Las unidades están en metros

Luego de aplicar el mismo procedimiento a las demás curvas identificadas, se obtuvo una tabla que recopila las principales características de la carretera, información clave para la obtención de la velocidad de operación mediante la utilización de modelos.

### **Tramo vial 00+00 vía a Bibin hasta 3+00**

En la Tabla 3 se presentan los modelos validados, los cuales corresponden a investigaciones realizadas por diversos autores de diferentes países y están enfocados en curvas horizontales. La gran mayoría de los modelos desarrollados en la literatura asumen la hipótesis de que la velocidad permanece constante a lo largo de la curva, la velocidad de operación que estiman estos modelos son el PM (Punto Medio) de la curva (Castro et al., 2011).

En la Tabla 9 se puede observar la geometría de la carretera, las velocidades de operación en el centro de la curva que se obtuvieron con los modelos matemáticos.

**Tabla 9**

*Características geométricas y velocidades de operación con modelos de la vía a Bibin*

Características Geométricas de la curva						Velocidades de operación					
Abcisa	Radio de curvatura (m)	Radio de curvatura (m)	Grado de curvatura	Longitud de la curvatura	Ángulo de deflexión	Taragin (1954)	Lamm y Choveiri (1987)	Lamm et al. (1990)	Kanellidis et al. (1990)	Pasetti y Fambro (1999)	Castro et al. (2011)
0+116	64.07	65	17.89	58.83	52.61	49.57	53.02	45.34	52.59	57.43	67.72
0+322	66.61	65	17.20	94.14	80.98	49.57	53.02	45.34	52.59	57.43	55.21
0+567	148.75	150	7.70	80.64	31.06	71.84	77.46	73.14	79.00	83.76	78.82
0+945	205.29	205	5.58	72.02	20.10	76.41	82.47	78.84	86.36	89.17	83.81
1+287	70.18	70	16.33	123.88	101.14	52.37	56.10	48.85	55.41	60.75	46.48
1+508	89.41	90	12.82	91.24	58.47	60.48	65.00	58.97	64.20	70.34	65.96
1+801	285.45	285	4.01	87.73	17.61	79.91	86.31	83.21	92.97	93.30	85.53
2+000	72.35	70	15.84	51.53	40.81	52.37	56.10	48.85	55.41	60.75	73.16
2+200	112.48	110	10.19	42.64	21.72	65.64	70.66	65.41	70.47	76.44	82.07
2+750	88.76	90	12.91	61.52	39.71	60.48	65.00	58.97	64.20	70.34	74.02
2+957	207.26	205	5.53	95.97	26.53	76.41	82.47	78.84	86.36	89.17	81.50

Fuente: La Autora

### **Tramo vial 00+00 vía Ricaurte-Llacao hasta 3+00**

En la Tabla 10 se puede observar la geometría de la carretera, de las cuales las velocidades de operación se obtuvieron en el centro de la curva. Durante este análisis, se identificaron dificultades asociadas a radios de curvatura reducidos, lo que limitó la aplicación de ciertos modelos, dado que su rango de validez se restringe a radios superiores a 35 metros.

**Tabla 10**

*Características geométricas y velocidades de operación con modelos de la vía Ricaurte-Llacao*

Características Geométricas de la curva						Velocidades de operación					
Abscisa	Radio de curvatura (m)	Radio de Curvatura Ajustada (m)	Grado de curvatura	Longitud de curvatura	Ángulo de deflexión	Taragin (1954)	Lamm y Choveiri (1987)	Kanellidis et al. (1990)	Pasetti y Fambro (1999)	Ottesen y Krammes (2000)	Castro et al. (2011)
0+662	31.28	30	36.63	14.93	27.34	3.71	2.69	16.12	3.22	39.64	78.45
0+875	11.16	12	102.68	33.41	171.55	-	-	-	-	-	9.59
1+031	31.28	30	36.63	14.22	26.04	3.71	2.69	16.12	3.22	39.89	79.05
1+384	47.98	45	23.88	109.50	130.76	32.10	33.85	36.99	36.78	40.11	31.74
1+550	33.32	30	34.39	81.71	140.5	3.71	2.69	16.12	3.22	21.33	26.13
1+700	34.55	35	33.17	72.18	119.7	15.88	16.04	24.56	17.60	27.29	35.84
1+864	34.22	35	33.49	36.27	60.73	15.88	16.04	24.56	17.60	38.15	63.07
2+070	24.03	25	47.69	71.44	170.33	-	-	5.26	-	-	11.42
2+382	49.07	50	23.35	79.00	92.24	37.77	40.08	41.76	43.49	48.28	49.29
2+712	24.78	25	46.24	74.83	173.01	-	-	5.26	-	-	10.25

Fuente: La Autora

### 4.3 Velocidades medidas de operación en curvas horizontales

#### Toma de velocidades en el campo

En la investigación de Zuriaga et al., (2010), se llevó a cabo la medición de velocidades vehiculares de lunes a viernes en dos horarios específicos: 08:30 y 14:00 horas. Las mediciones se realizaron bajo condiciones climáticas secas y en escenarios de flujo libre, asegurando que cada vehículo estuviera aislado con un intervalo mínimo de cinco segundos entre ellos. Algo similar realizó Jacob & Anjaneyulu, (2013) , recopilaron datos de velocidad durante el día, evitando los periodos de mayor congestión y asegurándose de que las mediciones se efectuaran en condiciones de clima seco, sin presencia de lluvia.

Para nuestra investigación, se tomaron las velocidades de operación V85 en el campo, en los dos sentidos de las vías como se muestra en las tablas 11 y 12. Los datos de velocidad de operación de vehículos tipo automóvil, se realizaron en 6 recorridos por sentido, con un acompañante del conductor para poder visualizar las velocidades en los puntos ya seleccionados anteriormente en los centros de las curvas.

Se contaron con la participación de tres conductores con experiencia en la conducción en carreteras, cuyas edades oscilaban entre 25 y 45 años. Del grupo de participantes, dos eran hombres y una mujer. A cada conductor se le indicó que debía operar el vehículo de manera habitual, replicando su estilo de conducción cotidiano (Figuras 9 y 10).

### **Figura 9**

*Toma de velocidades de operación en la vía a Bibin*



**Figura 10**

*Toma velocidades de operación en la vía Ricaurte-Llacao*



En las tablas 11 y 12 se puede observar las velocidades de operación que se obtuvieron en el campo, el cual se realizó un promedio de todas las velocidades tomadas y se obtuvo lo siguiente.

**Tabla 11**

*Velocidades tomadas en campo y la velocidad de diseño de la vía a Bibin*

Curva	Abscisa	Velocidad de operación km/h	Velocidad de diseño km/h
1	0+116	49.92	45
2	0+322	49.67	45
3	0+567	50.58	45
4	0+945	51.42	45
5	1+287	51.92	45
6	1+508	49.83	45
7	1+801	52.92	45
8	2+000	51.92	45
9	2+200	49.92	45
10	2+750	53.08	45
11	2+957	52.50	45

Fuente: La Autora

**Tabla 12**

*Velocidades tomadas en campo y velocidad de diseño del tramo Ricaurte-Llacao*

Curva	Abscisa	Velocidad de operación km/h	Velocidad de diseño km/h
1	0+662	41.75	30
2	0+875	19.83	30
3	1+031	41.42	30
4	1+384	39.25	30
5	1+550	36.83	30
6	1+700	36.50	30
7	1+864	39.92	30
8	2+070	29.83	30
9	2+382	41.83	30
10	2+712	29.92	30

Fuente: La Autora

#### 4.4 Perfil de velocidades

Para canstruir el perfil de velocidades, se realizaron recorridos a lo largo de un tramo de 3 kilómetros, con el propósito de determinar las velocidades de operación mediante la aplicación de distintas metodologías propuestas por diversos investigadores. Las ecuaciones utilizadas se presentan en la Tabla 3.

#### Perfil de velocidades calculadas

El perfil teórico de velocidades de operación fue obtenido a partir de modelos previamente desarrollados. Para su generación, resultó esencial disponer de información detallada sobre la geometría del tramo. Debido a la ausencia de planos de construcción, fue necesario reconstruir la geometría de la vía con el fin de identificar las variables independientes involucradas en el análisis, las cuales se detallan en las Tablas 9 y 10.

## Perfil de velocidades medidas en campo

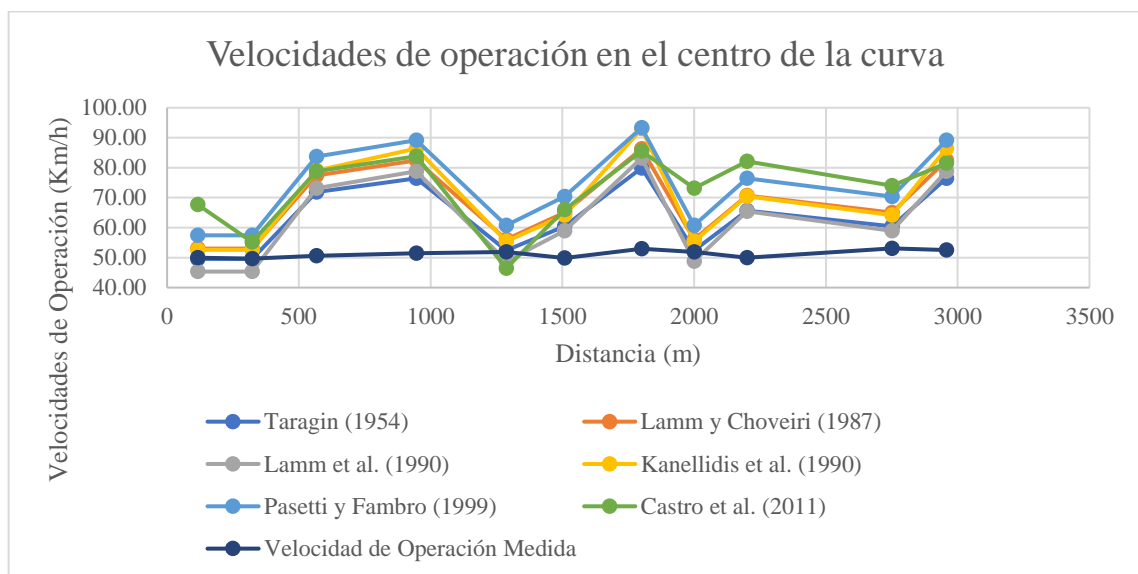
Para establecer el perfil real de velocidades de operación, se llevaron a cabo mediciones en el centro de las curvas dentro del segmento analizado. Los datos obtenidos a partir de este proceso se encuentran reflejados en las Tablas 11 y 12.

### 4.5 Comparativa de velocidad calculadas vs velocidad medidas en campo

Se efectuó un contraste entre los valores de velocidad calculados y los datos obtenidos en campo, con el objetivo de identificar posibles discrepancias y evaluar la precisión de los modelos empleados en el estudio.

#### Figura 11

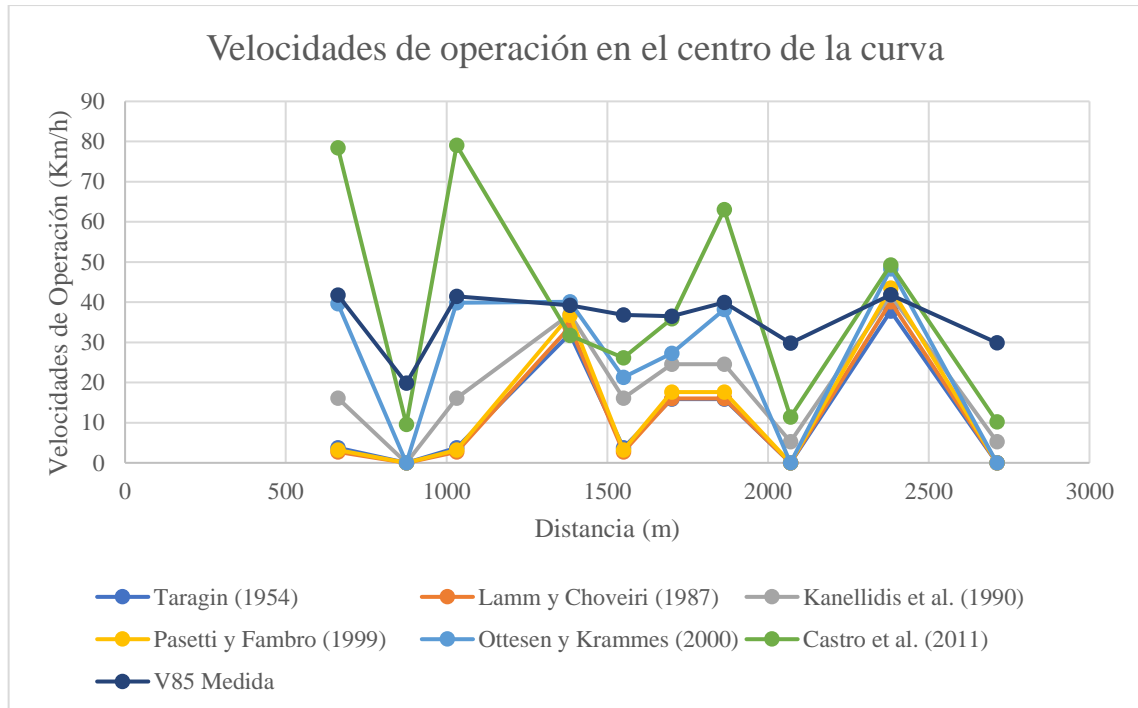
*Gráfica de velocidades calculadas y las velocidades medidas en un punto de la curva (Vía a Bibin)*



Fuente: La Autora

**Figura 12**

Gráfica de velocidades calculadas y las velocidades medidas en un punto de la curva  
(Ricaurte-Llacao)



Fuente: La Autora

La Figura 11 representa la correlación entre las velocidades registradas en campo y aquellas calculadas mediante modelos teóricos. En el caso del tramo correspondiente a la vía hacia Bibín, se identifica un desajuste evidente entre ambas velocidades. A pesar de ello, se observan ciertos puntos donde las velocidades coinciden en el centro de algunas curvas. Este comportamiento permite evidenciar que las variaciones en la velocidad de operación están directamente relacionadas con las características geométricas del tramo vial.

Al aplicar los modelos de estimación a los tramos analizados, se detectaron diferencias notables entre las velocidades obtenidas y las velocidades de diseño. En varios puntos, los valores se ubicaron por encima o por debajo de lo establecido en el diseño geométrico, por lo

que se decidió tomar como referencia las velocidades medidas directamente en campo para asegurar una mayor precisión en el análisis.

Al aplicar estos modelos al tramo de la vía de estudio, se encuentran variaciones significativas, los datos obtenidos están por encima o por debajo de la velocidad de diseño, por lo tanto, se tomará la velocidad de operación en campo.

#### **4.6 Comparación de la velocidad de operación con la velocidad diseño**

La velocidad de diseño de las curvas horizontales fue determinada con base en la información contenida en las Tablas 11 y 12. Para evaluar la coherencia entre la velocidad de operación y la velocidad proyectada en el diseño geométrico, se aplicaron los criterios I y II propuestos por Lamm, los cuales se detallan a continuación.

- Criterio I consiste en comparar la velocidad de operación correspondiente al percentil 85 (V85) con la velocidad de diseño. La diferencia entre ambas se clasifica según el rango en el que se ubique, lo cual permite identificar posibles inconsistencias.
- Criterio II se compara la diferencia de la velocidad de operación entre curvas consecutivas y la clasificamos de acuerdo en el rango que se encuentre.

**Tabla 13***Principio del criterio I de Lamm et al, de la vía a Bibin*

Curva	Abscisa	Velocidad de operación km/h	Velocidad de diseño km/h	Diferencia  V85-Vd	Bueno  V85-Vd ≤10	Aceptable 10< V85-Vd ≤20	Pobre  V85-Vd >20
1	0+116	49.92	45	4.92	x		
2	0+322	49.67	45	4.67	x		
3	0+567	50.58	45	5.58	x		
4	0+945	51.42	45	6.42	x		
5	1+287	51.92	45	6.92	x		
6	1+508	49.83	45	4.83	x		
7	1+801	52.92	45	7.92	x		
8	2+000	51.92	45	6.92	x		
9	2+200	49.92	45	4.92	x		
10	2+750	53.08	45	8.08	x		
11	2+957	52.50	45	7.50	x		

Fuente: La Autora

**Tabla 14***Principio del criterio I de Lamm et al, de la vía Ricaurte-Llacao*

Curva	Abscisa	Velocidad de operación km/h	Velocidad de diseño km/h	Diferencia  V85-Vd	Bueno  V85-Vd ≤10	Aceptable 10< V85-Vd ≤20	Pobre  V85-Vd >20
1	0+662	41.75	30	11.75		x	
2	0+875	19.83	30	10.17		x	
3	1+031	41.42	30	11.42		x	
4	1+384	39.25	30	9.25	x		
5	1+550	36.83	30	6.83	x		
6	1+700	36.50	30	6.50	x		
7	1+864	39.92	30	9.92	x		
8	2+070	29.83	30	0.17	x		
9	2+382	41.83	30	11.83		x	
10	2+712	29.92	30	0.08	x		

Fuente: La Autora

**Tabla 15***Principio del criterio II de Lamm et al, de la vía a Bibin*

Curva	Abscisa	Velocidad	Velocidad	Diferencia	Bueno	Aceptable	Pobre
		de operación km/h	de diseño km/h				
1	0+116	49.92	45	0.25	x		
2	0+322	49.67	45	0.92	x		
3	0+567	50.58	45	0.83	x		
4	0+945	51.42	45	0.50	x		
5	1+287	51.92	45	2.08	x		
6	1+508	49.83	45	3.08	x		
7	1+801	52.92	45	1.00	x		
8	2+000	51.92	45	2.00	x		
9	2+200	49.92	45	3.17	x		
10	2+750	53.08	45	0.58	x		
11	2+957	52.50	45				

Fuente: La Autora

**Tabla 16***Principio del criterio II de Lamm et al, de la vía Ricaurte-Llacao*

Curva	Abscisa	Velocidad	Velocidad	Diferencia	Bueno	Aceptable	Pobre
		de operación km/h	de diseño km/h				
1	0+662	41.75	30	21.92			x
2	0+875	19.83	30	21.58			x
3	1+031	41.42	30	2.17	x		
4	1+384	39.25	30	2.42	x		
5	1+550	36.83	30	0.33	x		
6	1+700	36.50	30	3.42	x		
7	1+864	39.92	30	10.08		x	
8	2+070	29.83	30	12.00		x	
9	2+382	41.83	30	11.91		x	
10	2+712	29.92	30				

Fuente: La Autora

## 4.7 Análisis de resultados

### **Análisis comparativo entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño en curvas horizontales**

Para evaluar la consistencia del trazado, se compararon las velocidades de operación con las velocidades de diseño de las curvas horizontales, considerando el valor absoluto de la diferencia entre ambas para cada tramo analizado. En promedio, la vía hacia Bibin presentó una diferencia de 6,38 km/h, mientras que en la vía Ricaurte–Llacao la diferencia fue de 5,96 km/h.

De acuerdo con el Criterio I propuesto por Lamm, estos valores se encuentran dentro de un rango aceptable, lo que sugiere que, en términos generales, las diferencias entre la velocidad proyectada y la velocidad real no representan un riesgo significativo para los usuarios.

No obstante, al analizar los tramos individualmente, se observa que la vía a Bibin mantiene un comportamiento homogéneo a lo largo de todo el recorrido, con velocidades de operación adecuadas. En cambio, en el tramo Ricaurte–Llacao se identificaron al menos cuatro curvas cuya velocidad de operación, si bien se encuentra dentro de los límites permisibles, muestra indicios de posibles inconsistencias entre el diseño teórico y la realidad constructiva del trazado, lo que podría afectar la seguridad y el confort de los conductores.

Las Tablas 17 y 18 muestran las diferencias entre las velocidades de operación y las de diseño para cada curva horizontal en ambos tramos de estudio, presentando los valores mínimos, máximos y promedio.

**Tabla 17**

*Promedio de la diferencia entre velocidades de las curvas de la vía a Bibin*

<b>Diferencia  V85-Vd </b>	<b>Km/h</b>
Mínima	4.67
Máxima	8.08
Promedio	6.38

Fuente: La Autora

**Tabla 18**

*Promedio de la diferencia entre velocidades de las curvas de la vía a Ricaurte-Llacao*

<b>Diferencia  V85-Vd </b>	<b>Km/h</b>
Mínima	0.083
Máxima	11.83
Promedio	5.96

Fuente: La Autora

### **Análisis de consistencia**

Para este análisis se realizará en los dos tramos de estudio, se basará en los criterios I y II de Lamm et al., (1999), junto con sus respectivos umbrales.

#### **Criterio I**

Al aplicar este criterio de Lamm, se concluye que el 100 % de las curvas, es decir, las 11 curvas evaluadas, presentan un nivel de consistencia adecuado a lo largo del tramo analizado.

**Tabla 19**

*Estimación de la consistencia del criterio I de Lamm et al. de la vía Bibin*

<b>Principio de Lamm et al.</b>	<b>Numero de curvas</b>	<b>Porcentaje</b>
Buena	11	100%
Aceptable	-	
Pobre	-	

Fuente: La Autora

Al aplicar el criterio de Lamm, se observa que el 60 % de las curvas presentan un nivel de consistencia bueno, mientras que el 40 % muestra una consistencia aceptable. No se detectó ninguna curva con consistencia deficiente a lo largo del tramo analizado.

**Tabla 20**

*Estimación de la consistencia del criterio I de Lamm et al. de la vía Ricaurte-Llacao*

<b>Principio de Lamm et al.</b>	<b>Numero de curvas</b>	<b>Porcentaje %</b>
Buena	6	60%
Aceptable	4	40%
Pobre	-	

Fuente: La Autora

En términos generales, al aplicar el Criterio I de Lamm, se observa que un alto porcentaje de las curvas en el tramo de la vía hacia Bibín se clasifica con una consistencia "buena", manteniéndose este nivel de consistencia a lo largo de todo el tramo. Por otro lado, en el tramo Ricaurte–Llacao, el análisis muestra que, en términos de consistencia, el tramo puede considerarse como una combinación de "buena" y "aceptable", con el 100% de las curvas ubicadas en estas dos categorías.

### Perfil del análisis de consistencia, Criterio I

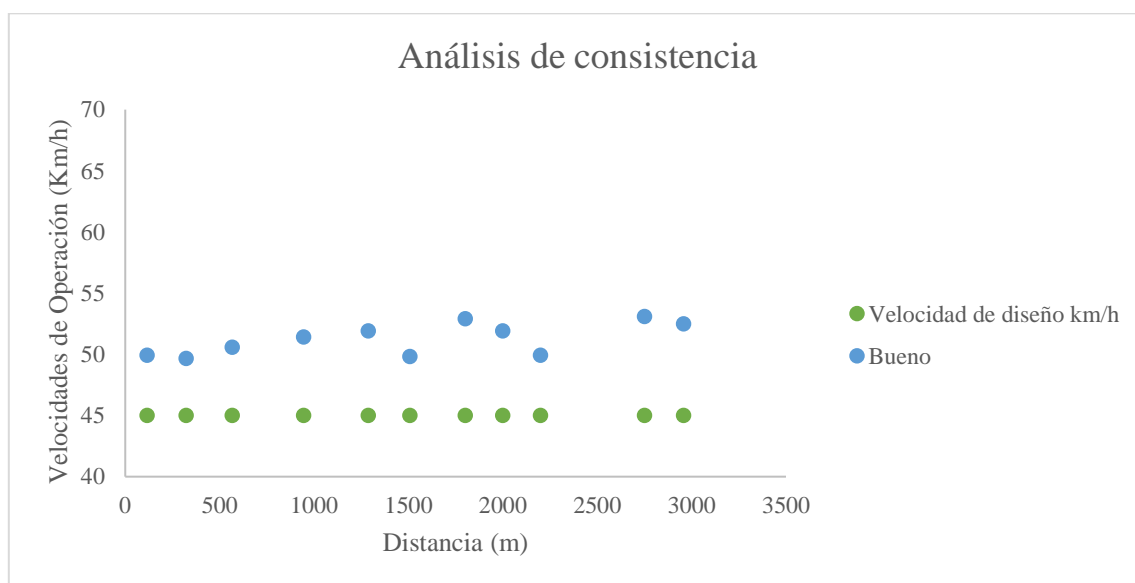
Las figuras 13 y 14 muestran el comportamiento de la velocidad de diseño contra el comportamiento de la velocidad de operación que contiene su correspondiente umbral ya sea bueno (círculos celestes), aceptables (círculos amarillos) y pobres (círculos verdes oscuro), esto en base al criterio I de Lamm et al.

No se encontraron curvas que presentaran una consistencia deficiente, y en general, los tramos muestran una coherencia adecuada en el diseño.

Se puede notar que los puntos indicados en celeste tienden a acercarse más a la velocidad de diseño, ya que la diferencia de velocidad en esas curvas es igual o inferior a 10 km/h. Esto sugiere que los conductores se sienten más seguros al transitar por curvas con radios amplios. En cambio, en las zonas marcadas en amarillo, la diferencia de velocidad varía entre 10 y 20 km/h, mientras que en los puntos de color verde oscuro, la diferencia supera los 20 km/h, lo que indica una mayor desviación respecto a la velocidad de diseño.

### Figura 13

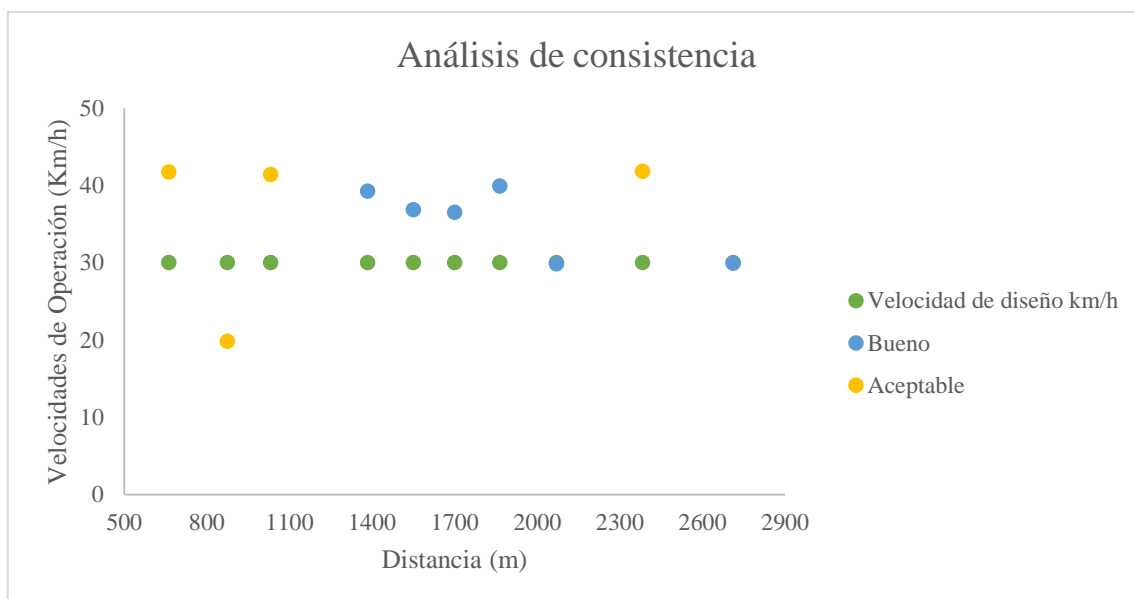
*Estimación de la consistencia del Criterio I de Lamm, vía a Bibin*



Fuente: La Autora

**Figura 14**

*Estimación de la consistencia del Criterio I, vía Ricarte-Llacao*



Fuente: La Autora

De acuerdo con el criterio I de Lamm, la vía que conduce a Bibin presenta una buena consistencia en su trazado geométrico, lo que permite a los conductores mantener una velocidad de circulación uniforme en la vía durante el recorrido, favoreciendo así la seguridad y comodidad en la conducción. Por otro lado, en la vía Ricarte-Llacao, la evaluación bajo este criterio indica que el tramo analizado posee una consistencia aceptable, aunque con ciertas variaciones en sus características geométricas que podrían influir en la dinámica de conducción. En consecuencia, se recomienda que los conductores transiten con mayor precaución, adaptando su velocidad a las condiciones del camino para garantizar una circulación segura.

## **Criterio II**

Según los resultados obtenidos del análisis de consistencia utilizando el Criterio II de Lamm et al., se encontró que el 100 % de las curvas horizontales en el tramo de la vía hacia

Bibín presentan un nivel de consistencia "bueno", lo que indica que ninguna de las curvas tiene una consistencia deficiente.

**Tabla 21**

*Estimación de la consistencia del criterio II de Lamm et al. de la vía a Bibin*

<b>Principio de Lamm et al.</b>	<b>Numero de curvas</b>	<b>Porcentaje</b>
Buena	10	100%
Aceptable	-	
Pobre	-	

Fuente: La Autora

En cuanto al tramo de la vía Ricaurte-Llacao, se observó que el 44 % de las curvas (es decir, 4 curvas) se clasifican como consistentes, el 33 % (3 curvas) tienen una consistencia aceptable, y el 22 % restante (2 curvas) presentan una consistencia pobre.

**Tabla 22**

*Estimación de la consistencia del criterio II de Lamm et al. de la vía Ricaurte-Llacao*

<b>Principio de Lamm et al.</b>	<b>Numero de curvas</b>	<b>Porcentaje %</b>
Buena	4	40%
Aceptable	3	30%
Pobre	2	20%

Fuente: La Autora

En términos generales, al aplicar el Criterio II de Lamm, la vía hacia Bibín puede clasificarse como de "consistencia buena", lo que permite una circulación fluida y constante sin cambios bruscos en la velocidad. En contraste, la vía Ricaurte-Llacao presenta un 70 % de curvas con consistencia aceptable, pero también muestra un 20 % de curvas con consistencia

deficiente, lo que provoca variaciones en la velocidad de operación, haciendo que la conducción en ese tramo sea menos constante y más propensa a fluctuaciones de velocidad.

### **Perfil del análisis de consistencia, Criterio II**

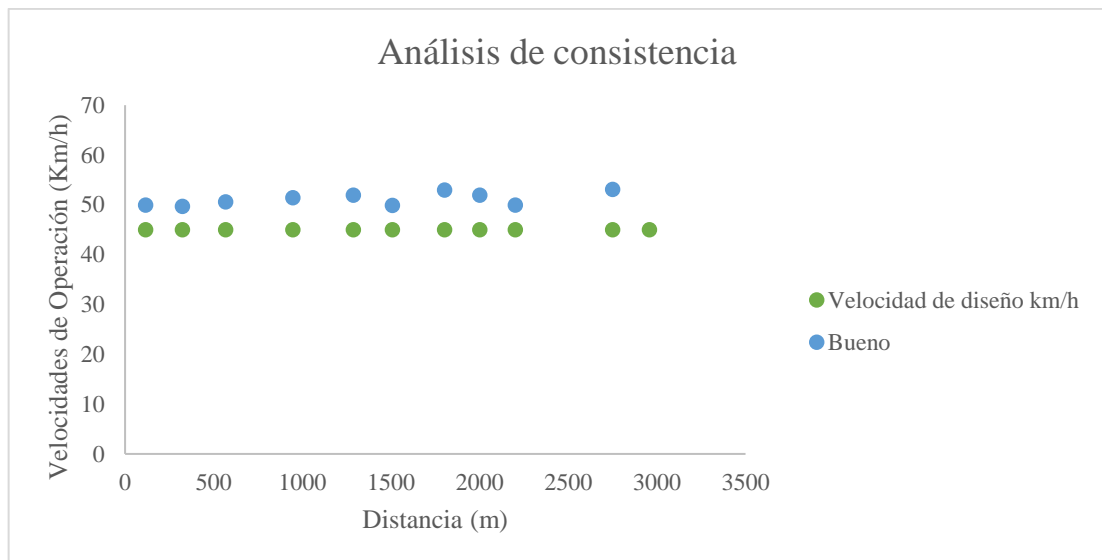
Las Figuras 15 y 16 ilustran el comportamiento de la velocidad de diseño frente a la velocidad de operación, destacando los umbrales correspondientes según el Criterio I de Lamm et al., con círculos celestes para las curvas con consistencia "buena", círculos amarillos para las de consistencia "aceptable" y círculos de color verde oscuro para las curvas con consistencia "pobre".

Se observa que la mayoría de las curvas en el tramo tienen una consistencia "buena" o "aceptable", aunque también se pueden identificar algunos tramos con inconsistencias notables.

De manera similar, se puede notar que los puntos celestes tienden a aproximarse a la velocidad de diseño, ya que la diferencia de velocidades en esa curva es de 10 km/h o menos. Esto se debe a que los conductores experimentan una mayor sensación de seguridad al transitar por curvas con radios amplios. En cambio, en los puntos marcados en amarillo, la diferencia de velocidades varía entre 10 y 20 km/h, mientras que en los puntos de color verde oscuro, se registra una discrepancia superior a los 20 km/h, lo que refleja una desviación considerable con respecto a la velocidad de diseño.

**Figura 15**

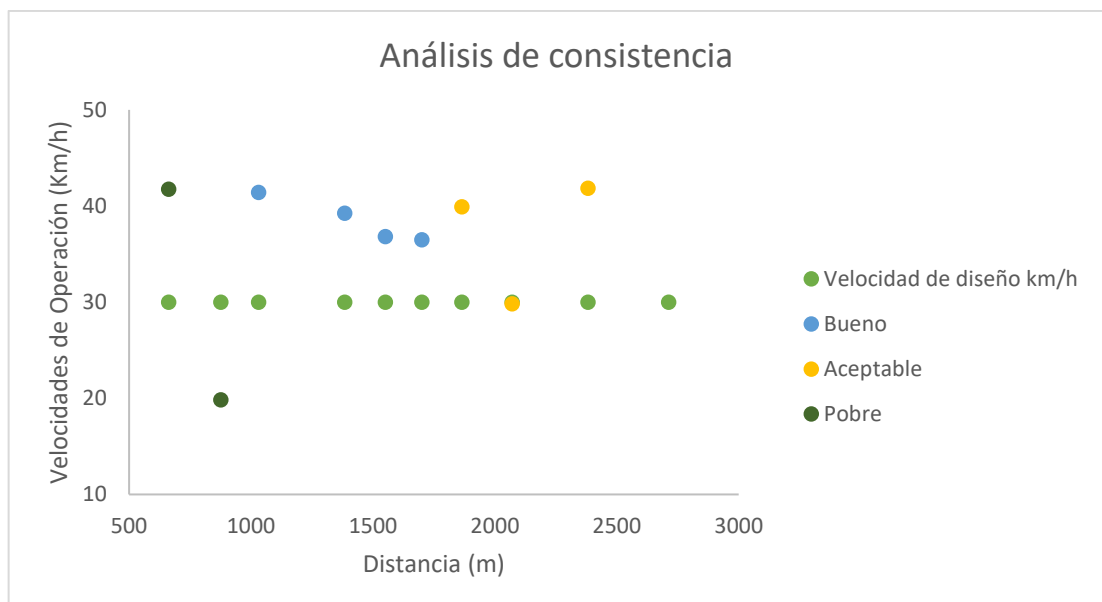
*Estimación de la consistencia Criterio II de Lamm, vía a Bibin*



Fuente: La Autora

**Figura 16**

*Estimación de la consistencia Criterio II de Lamm, vía Ricarte-Lllacao*



Fuente: La Autora

Según el Criterio II de Lamm, el análisis de la vía hacia Bibín muestra que su diseño geométrico ofrece una excelente consistencia, lo que facilita una conducción cómoda y segura para los conductores a lo largo de todo el trayecto. Esta uniformidad en el trazado favorece una velocidad de operación estable, minimizando la necesidad de ajustes bruscos en la conducción. En contraste, la vía Ricarte-Llacao los resultados reflejan una consistencia deficiente, caracterizada por variaciones significativas en el trazado geométrico que dificultan la circulación a una velocidad de operación constante. Esta condición no solo genera incomodidad para los conductores, sino que también aumenta el riesgo de incidentes viales, ya que obliga a ajustes repentinos en la velocidad y en la trayectoria del vehículo.

## Conclusiones

En la presente investigación se revisó 4 métodos que son aplicables para el análisis consistencia del trazado geométrico, el método más utilizado es la velocidad de operación, otro método es el basado en la geometría de la vía y otros se centran en la carga de trabajo del conductor y la estabilidad del vehículo.

El método más utilizado, es de la velocidad de operación, ya que permite una evaluación directa actuante de los conductores en función de la geometría del trazado, esta metodología planteada por Lamm et al. (1999), ha sido ampliamente analizada y utilizada en estudios previos y; clasifica la consistencia en función de la comparación entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación, permitiendo identificar segmentos viales con riesgo de accidentes.

La obtención de los datos referente a la velocidad de operación en el campo se llevó a cabo mediante la medición directa de la velocidad de los vehículos en puntos específicos, previamente seleccionados en el centro de las curvas, tanto en los tramos ascendentes como descendentes de las vías de estudio.

La aplicación del criterio I y II, permite obtener que la vía a Bibin presenta una consistencia del 100% en el rango de 'buena', lo que indica que las condiciones geométricas de las curvas permiten una circulación fluida y sin cambios bruscos de velocidad, partiendo de la velocidad de diseño asumida de acuerdo a los radios encontrados en las curvas.

La aplicación del Criterio I y II en el tramo de la vía Ricaurte-Llacao, presenta un 20% de inconsistencia, lo que significa mayor riesgo de accidentes, esto debido a los radios que están por debajo de las normas de diseño, y generan cambios bruscos de velocidad.

La velocidad de operación que deben circular los conductores debe ser la misma que la velocidad de diseño ya que el diseño geometría de la carretera está de acuerdo a esta. En el

caso de la vía a Bibin la velocidad es de 45 Km/h y la vía Ricaurte-Llacao la velocidad es de 30 Km/h, recomendada para no sufrir accidentes.

Los resultados evidenciaron que la velocidad de operación es un parámetro clave para la estimación de la seguridad vial, ya que permite identificar discrepancias entre la expectativa del conductor y las condiciones reales del trazado geométrico. La aplicación de modelos de velocidad de operación facilitó la detección de tramos con posible riesgo de accidentes.

### **Recomendaciones**

En el caso de la vía Ricaurte-Llacao se evidenció que no cumple la consistencia, se recomienda hacer estudios de ingeniería más detallados, que permitan justificar ajustes geométricos en las curvas, reduciendo las diferencias de velocidad.

Se recomienda complementar el sistema de recolección de datos con tecnologías nuevas, como radares, lo que aporta mediciones precisas y en tiempo real, su uso mejoraría la fiabilidad de los resultados.

Se recomienda hacer estudios alternativos de consistencia donde se considere la utilización de elementos como el peralte, la pendiente y la situación de la capa de rodadura, estos factores, influyen en la estabilidad del vehículo, la tracción y una circulación segura y fluida.

Para mitigar el impacto de las inconsistencias geométricas, se sugiere la instalación de señalización vertical y dispositivos de advertencia en las curvas de mayor riesgo, indicando a los conductores la necesidad de reducir la velocidad.

Se recomienda la realización de estudios complementarios para evaluar el impacto del tráfico en las velocidades de operación y su relación con la geometría de la vía, con el fin de optimizar la infraestructura vial y mejorar la seguridad vial de los usuarios.

## Bibliografía

- Abdul-Mawjoud, A. A., & Sofia, G. G. (2008). Development of models for predicting speed on horizontal curves for two-lane rural highways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 33, 365–377.
- Aldás Sánchez, M. R., & Jami Maigua, E. F. (2022). "DISEÑO GEOMÉTRICO DE 4.07KM DE VÍAS RURALES PERTENECIENTES AL BARRIO PILLIG LOMA, PARROQUIA IGNACIO FLORES DEL CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA DE COTOPAXI." <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36467>
- Altamira, A. L. (2020). Diseño Geométrico de Caminos de Montaña: particularidades y desafíos. *Avances Investigación En Ingeniería*, 17(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7003>
- Altamira, A., Marcet, J., Graffigna, A. B., & Gómez, A. (2010). *Assessing Available Sight Distance: An Indirect Tool to Evaluate Geometric Design Consistency*.
- Alvaron Robles, A. J. (2022). "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA CARRETERA HUARAZ-SANTO TORIBIO (L=16 Km) CON EL MANUAL DE DISEÑO GEOMETRICO 2018, AÑO 2020".
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *THE GREEN BOOK A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. [www.transportation.org](http://www.transportation.org)
- Arias, J., & Renolina, I. (2018). ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO EN UNA CARRETERA DE DOS CARRILES EN TERRENO LLANO DESDE KM (12+938) VÍA LA FORTUNA HASTA EL KM (19+473) VÍA LA LIZAMA EN AMBOS SENTIDOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER.
- Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J. M., & García-García, A. (2013). New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. *Accident Analysis & Prevention*, 61, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.001>
- Campagnoli, S. (2017). *INNOVACIÓN EN MÉTODOS DE PAVIMENTACIÓN: CASOS REGIONALES*.
- Cárdenas Grisales, J. (2013). *Diseño geométrico de carreteras, 2da Edición*.
- Cárdenas-Aguilar, D., & Echaveguren, T. (2015). Comparison of consistency assessment models for isolated horizontal curves in two-lane rural highways. *DYNA*, 82(194), 57–65. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n194.44476>
- Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R., & Sánchez, J. A. (2008). Highway safety analysis using geographic information systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 161(2), 91–97. <https://doi.org/10.1680/tran.2008.161.2.91>
- Castro, M., Pardillo-Mayora, J. M., & Sánchez, J. F. (2005). Alignment Indices as a Tool to Evaluate Safety and Design Consistency in Two Lane Rural Roads. *Engineering, Environmental Science*.

- Castro, M., Sánchez, J. F., Sánchez, J. A., & Iglesias, L. (2011). Operating Speed and Speed Differential for Highway Design Consistency. *Journal of Transportation Engineering*, 137(11), 837–840. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000309)
- Cefalo, R., Sluga, T., Ossich, G., & Roberti, R. (2024). Assessment of Design Consistency for Two-Lane Rural Highways with Low Tortuosity Alignment. *Sustainability (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16030987>
- Chaudhari, P. M., Goyani, J., Arkatkar, S., Joshi, G., & Easa, S. M. (2022). Design Consistency Evaluation of Two-Lane Rural Highways in Hilly Terrains. *Transportation Research Procedia*, 62, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.010>
- Dell'Acqua, G., & Russo, F. (2010). Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(2), 89–97. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2010.13>
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. A., Wooldridge Mark D., & Miaou Shaw-Pin. (2003). *Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices*. Transportation Research Board.
- Fitzpatrick, K., & Collins, J. M. (2000). Speed-Profile Model for Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1737(1), 42–49. <https://doi.org/10.3141/1737-06>
- Gambard, J. M., & Louah, G. (1986). Vitesses pratiquées et géométrie de la route. *Service d'études Techniques Des Routes et Autoroutes*, 10.
- García Depestre, R. A., Delgado Martínez, D. E., & Díaz García, E. E. (2012). Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(2), 71–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000200005>
- Glennon, J. C., Neuman, T. R., & Leisch, J. E. (1985). *Safety and Operational Considerations for Design of Rural Highway Curves*. <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/74834>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2024). *Estadísticas de transporte (ESTRA)*.
- Islam, M. N., & Seneviratne, P. N. (1994). Evaluation of Design Consistency of Two-Lane Rural Highways. *Institute of Transportation Engineers Journal*, 64(2), 28–31.
- Jacob, A., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2013). Operating Speed of Different Classes of Vehicles at Horizontal Curves on Two-Lane Rural Highways. *Journal of Transportation Engineering*, 139(3), 287–294. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000503](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000503)
- Kannellaidis, G., Golias, J., & Efstathiadis S. (1990). Drivers' speed behaviour on rural road curves. *Hemming Group, Limited*, 31(7–8), 414–415.
- Kay Fitzpatrick, A., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K. D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I., Krammes, R. A., & Poggioli, B.

- (2000). *ALTERNATIVE DESIGN CONSISTENCY RATING METHODS FOR TWO-LANE RURAL HIGHWAYS*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/14744>
- Krammes, R. A., & Glascock, S. W. (1992). Geometric Inconsistencies and Accident Experience on Two-Lane Rural Highways . *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C*, 1–10.
- Krammes, R. A., Rao, K. S., & Oh, H. (1995). Highway geometric design consistency evaluation software. *Journal of Transportation Research Board*, 1500, 19–24.
- Lamm, R., & Choueiri, E. M. (1987). Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the State of New York. *Transportation Research Board*, 1122, 68–78. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1122/1122-008.pdf>
- Lamm, R., Choueri, E. M., & Hayward, J. C. (1988). Tangent as an Independent Design Element. *Transportation Research Board*, 1195, 123–131. <http://worldcat.org/isbn/0309047609>
- Lamm, R., Guenther, A. K., & Choueiri, E. M. (1995). Safety module for highway geometric design. *Transportation Research Board*, 1512, 7–15.
- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. *McGraw-Hill, Incorporated*. <http://worldcat.org/isbn/0070382956>
- Llopis Castelló, D. (2020, May 8). *Consistencia del diseño de carreteras y velocidad de operación inercial*. Dallocas.Blogs. [https://dallocas.blogs.upv.es/2020/05/08/consistencia-del-diseno-de-carreteras-y-velocidad-de-operacion-inercial/?utm\\_source=chatgpt.com](https://dallocas.blogs.upv.es/2020/05/08/consistencia-del-diseno-de-carreteras-y-velocidad-de-operacion-inercial/?utm_source=chatgpt.com)
- Llopis Castelló David. (2017). *Desarrollo de una metodología para el diseño y mejora de carreteras convencionales a partir del análisis de la seguridad vial mediante modelos de consistencia*. Universitat Politècnica De València.
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (1997). Formulation and Validation of Operating Speed-Based Design Consistency Models by Bootstrapping. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1579(1), 97–103. <https://doi.org/10.3141/1579-12>
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (2000). Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highways: Development of New Procedure. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1737(1), 9–17. <https://doi.org/10.3141/1737-02>
- Megersa Gemechu, S., & Segni Tulu, G. (2021). Safety Effects of Geometric Design Consistency on Two-lane Rural Highways: The Case of Ethiopia. *American Journal of*


- Traffic and Transportation Engineering*, 6(4), 107.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20210604.11>
- Messer, C. J. (1980). *Methodology for Evaluating Geometric Design Consistency*.
- Ministerio de transporte, movilidad y A. U. D. de C. (2020). *Trazado. NORMA 3.1-IC de la Instrucción de carreteras*. <https://apps.fomento.gob.es/CVP/>
- Ministerio de Transporte Instituto Nacional de vías. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Colombia*.
- Misaghi, P., & Hassan, Y. (2005). Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 408–418.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:6\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:6(408))
- Ng, J. C. W., & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218–227. <https://doi.org/10.1139/103-090>
- Norma Ecuatoriana Vial. (2013). *MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE VOLUMEN N° 2-LIBRO A NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES*.
- Organización Mundial de la Salud. (2023). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2023*.
- Ottesen, J. L., & Krammes, R. A. (2000). Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1701(1), 76–85. <https://doi.org/10.3141/1701-10>
- Paguay, R., & Alarcón, R. (2014). *ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA SU REDISEÑO DE LA CARRETERA EXISTENTE QUE UNE LAS COMUNIDADES PUNGAL-PULUG-COCHAPAMBA-LOMA EL CHOICAL DE LA PARROQUIA SAN ISIDRO DE PATULU DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Pérez Zuriaga, ana M., Camacho Torregrosa, F. J., & García García, A. (2011). La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial. *Plataforma Tecnológica Española de La Carretera*.
- Pinzon Martínez, S., & Devia Urueña, H. M. (2015). *ANÁLISIS DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMETRICO DE LA VÍA CUROS-PIEDRECUESTA APLICANDO EL METODO DE LAMM*.
- Posada, J. J. (2014). Consistencia en el diseño: predicción de la velocidad de operación en carreteras. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 39–47. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.803>
- Radimsky, M., Matuszkova, R., & Budik, O. (2016). RELATIONSHIP BETWEEN HORIZONTAL CURVES DESIGN AND ACCIDENT RATE. *Jurnal Teknologi*, 78, 2180–3722.  
[www.jurnalteknologi.utm.my](http://www.jurnalteknologi.utm.my)
- Taragin, A., & Leisch, L. E. (1954). Driver Performance on Horizontal Curves . *Driver Performance on Horizontal Curves*, 33, 446–466.

- Uribe C., S. L. (2009). Propuesta metodológica para el diseño de intersecciones urbanas. *INVENTUM*, 4(7), 46–54. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.4.7.2009.46-54>
- Wooldridge, M. D., Fitzpatrick, K., Koppa, R., & Bauer, K. (2000). Effects of Horizontal Curvature on Driver Visual Demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1737(1), 71–77. <https://doi.org/10.3141/1737-09>
- Zambrano-Palma, M. K., Barberán-Palacio, S. M., & García-Vinces, J. J. (2023). *Factores de riesgo en seguridad vial: caso de intersección 15 de abril y Miguel H. Alcívar - Portoviejo*. 85, 674–700. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i10.6149>
- Zuriaga, A. M. P., García, A. G., Torregrosa, F. J. C., & D'Attoma, P. (2010). Modeling Operating Speed and Deceleration on Two-Lane Rural Roads with Global Positioning System Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2171(1), 11–20. <https://doi.org/10.3141/2171-02>

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Johanna Priscila Gualan Andrade portador de la cédula de ciudadanía N.º 1401062169. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la consistencia en el trazado geométrico de 2 vías rurales en terrenos montañosos de la provincia del Azuay" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 7 de abril de 2025

F:   
Johanna Priscila Gualan Andrade  
1401062169