

Procedimiento Para La Evaluación Del Diseño Geométrico De Carreteras De Montaña, Con Un Enfoque Hacia La Seguridad

Procedure For The Evaluation Of The Geometric Design Of Mountain Roads, With A Focus On Safety

Autores

Gabriel Oswaldo Galarza Morocho¹, Cristhian Mauricio Gaona Román², Elsi América Romero Valdiviezo³, Carlos Eugenio Sánchez Mendieta⁴

¹Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, El Guabo, ggalarza2@utmachala.edu.ec

²Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Santa Rosa, cgaona5@utmachala.edu.ec

³Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, eromero@utmachala.edu.ec

⁴Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, csanchez@utmachala.edu.ec

RESUMEN

Un diseño deficiente en curvas de carreteras de montaña, incrementa el riesgo de accidentes y lesiones. Por ende, el propósito de este trabajo se centra en proponer una alternativa a través de los problemas detectados mediante la evaluación de la curva de estudio. La evaluación se fundamenta en el análisis de la clasificación de la vía y el diseño geométrico, utilizando indicadores como velocidad, radio de curva, ancho de carril, ancho de berma, pendiente y peralte. El proceso inicia con un aforo para medir el flujo vial. Posteriormente, se lleva a cabo un segundo aforo de velocidades para obtener la gráfica de ojiva e identificar la velocidad de operación. Seguidamente, se realiza un levantamiento topográfico de la curva mediante el uso de Dron y tecnología RTK. Con los datos obtenidos, se utiliza el software AutoCAD Civil 3D para obtener información sobre el diseño actual de la curva. Los resultados se analizan, indicando un diseño de curva deficiente. Finalmente, se presenta un nuevo diseño para la curva de estudio, abordando los problemas identificados durante la evaluación. En conclusión, la integración y análisis de todos los parámetros evaluados permitió conocer los criterios para garantizar la seguridad y eficiencia del tránsito vehicular en terrenos montañosos.

Palabras claves: Diseño geométrico de curvas, carretera de montaña, clasificación de la vía, seguridad vial.

ABSTRACT

A poor design in mountain road curves increases the risk of accidents and injuries. Therefore, the purpose of this work focuses on proposing an alternative through the problems detected by evaluating the curve under study. The evaluation is based on the analysis of road capacity and geometric design, using indicators such as speed, curve radius, lane width, shoulder width, slope, and superelevation. The process begins with a traffic count to measure traffic flow. Subsequently, a second speed count is carried out to obtain the cumulative frequency curve and identify the operating speed. Next, a topographic survey of the curve is carried out using a drone and RTK technology. With the data obtained, autocad civil 3D software is used to obtain information about the current design of the curve. The results are analyzed, indicating a poor curve design. Finally, a new design for the study curve is presented, addressing the problems identified during the evaluation. In conclusion, the integration and analysis of all evaluated parameters allowed us to understand the criteria to ensure the safety and efficiency of vehicular traffic in mountainous terrain.

Keywords: geometric design of curves, mountain road, road classification, road safety.

1. INTRODUCTION

Las carreteras de montaña desempeñan un rol significativo al proporcionar oportunidades para facilitar el transporte de productos y mejorar la conectividad hacia el empleo, la educación, la atención médica y al comercio, particularmente en las áreas rurales [1]. En ciertos casos, cuando la sección transversal estándar de una carretera no se adapta adecuadamente a su finalidad, puede suponer una amenaza para la seguridad de peatones y conductores [2], [3]. El auge poblacional reciente ha intensificado la demanda de movilidad, agravando los problemas de seguridad vial y subrayando la necesidad de una infraestructura vial más segura y estratégica que promueva el desarrollo social, económico y ambiental [4], [5]. Las carreteras en terrenos montañosos, en particular, requieren un diseño geométrico meticuloso para garantizar la seguridad de los conductores y pasajeros.

El estado de las carreteras de montaña en el Ecuador ha sido siempre problemático, con frecuentes interrupciones y derrumbes, causados por las condiciones climáticas muy variadas que tiene nuestro país. Los Gobiernos han enfrentado estas situaciones de forma urgente, siendo así que sean costosas para el país. La importancia de identificar las mejores prácticas y estándares aplicables para mejorar la calidad y seguridad de las carreteras, particularmente en tramos de descenso pronunciado, es crucial debido a factores que influyen en la seguridad vial en estas condiciones específicas [6]. Sin embargo, no existen estándares internacionales específicos para este tipo de carreteras [7].

La configuración de carreteras que integra curvas tanto horizontales como verticales influye en las variaciones de velocidad de los conductores. De esta manera, curvas combinadas con un diseño deficiente pueden incrementar los peligros asociados a la conducción. Por lo tanto, es esencial comprender las velocidades a las que los conductores abordan dichas curvas [8], [9]. Más del 60 % al 70 % de los conductores ocupan el carril opuesto al girar a la derecha y a la izquierda en una curva cerrada, lo que provoca un entrelazamiento de las vías en los dos sentidos de marcha y la existencia de posibles choques entre dos o más vehículos [6], [10].

Diversos estudios indican que el comportamiento del conductor está sujeto a diversos factores, como el tamaño del vehículo, lo cual puede influir en la manera en que el conductor maniobra y responde a las situaciones en la carretera. Asimismo, las pendientes longitudinales, que denotan la inclinación de la carretera en dirección al recorrido, pueden incidir en la velocidad y el control del vehículo, aumentando el riesgo de vuelcos. Por último, la presencia de curvas en la carretera puede modificar el comportamiento del conductor, ya que demanda una reducción de la velocidad y cambios en la dirección del vehículo [6], [11]. En el diseño de carreteras de montaña, las curvas horizontales son cruciales para establecer límites de velocidad adecuados. La velocidad en estas curvas está inversamente relacionada con la velocidad de aproximación. En una investigación sugieren límites de velocidad para curvas de los diferentes radios establecidos en la normativa [12],[13]. Estas sugerencias sujetas a la normativa establecen velocidades de diseño con respecto al tipo de vía y al terreno de análisis, donde se detallan los diferentes parámetros para el diseño de estas vías, de ahí la importancia de realizar una buena observación y estudio de las zonas en cuestión.

En materia de seguridad vial, es fundamental tener en cuenta que los vehículos que atraviesan una curva ocupan un espacio mayor en comparación con la circulación en línea recta. Esto se debe a que el radio de giro varía en la curva y no es equivalente al que tendrían en un tramo recto. Además, este espacio aumenta proporcionalmente a la disminución del radio de la curva y al aumento de la distancia entre ejes del vehículo. Por ende, resulta crucial anticipar y detectar con precisión posibles puntos ciegos y defectos en el diseño geométrico de la carretera [14].

En este tipo de vías se vuelve esencial la importancia en la planificación del diseño tanto de curvas horizontales como verticales, por parte de los profesionales en el área [15]. Las curvas cerradas son un componente importante de las carreteras de montaña de dos carriles. Sin embargo, los patrones de conducción en curvas cerradas siguen siendo ambiguos [10]. Estas curvas, por lo general, presentan una inclinación acentuada y son estrechas, lo que puede aumentar la dificultad de frenado, generando mayor velocidad durante el descenso y requiriendo una distancia de frenado mayor, lo que aumenta el riesgo de perder el control sin una técnica de frenado adecuada, lo que da como consecuencia, que los conductores se encuentran con desafíos específicos al transitar por ellas [16]. La relevancia de entender y tratar de manera apropiada las técnicas de manejo en curvas cerradas está basada en diversos elementos cruciales, entre ellos la seguridad en las carreteras, deficiencias en la evaluación de distancias, la fluidez del tráfico y la comodidad del conductor [17]. En este contexto, es crucial priorizar la seguridad vial y asegurar el estricto cumplimiento normativo para prevenir accidentes y mitigar posibles conflictos legales durante la fase de construcción de estas carreteras.

Para mejorar la seguridad, se deben considerar medidas como ensanchar la curva, ajustar la pendiente horizontal y optimizar la línea de tránsito central. Además, los parámetros de diseño de la curva, como el radio mínimo y la longitud máxima de la pendiente, deben determinarse con base en la velocidad de conducción, gradiente de carretera, peralte y coeficiente de fricción transversal [18]. Radios de curvatura más grandes y mayores velocidades pueden reducir la probabilidad de riesgo de accidentes. Por lo tanto, el diseño de seguridad en curvas de radio pequeño de carreteras de montaña debe considerar factores como la información de visibilidad [19], la geometría de la curva, la velocidad de conducción y la posición del paisaje.

Se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre este tema a nivel internacional. Un estudio realizado en Turquía empleó un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar curvas horizontales peligrosas que no cumplieran con las normativas del país [20]. Asimismo, en Italia, se destacó la utilidad de herramientas de Modelado de Información para la Construcción (BIM), como Civil 3D, que facilitan la representación detallada de las características de una carretera. Combinadas con la extensión Vehicle Tracking, estas herramientas posibilitan la simulación del diseño, permitiendo evaluar su idoneidad para brindar comodidad y seguridad a conductores y pasajeros [21]. Por otra parte, en Ecuador, se desarrolló una metodología específica para el diseño geométrico sostenible de ejes viales, con el objetivo de mejorar la seguridad vial en carreteras inter-cantoniales [5].

Tanto en Argentina como en Ecuador, se destaca que la normativa establece velocidades de diseño específicas para distintos tipos de terreno y la importancia de la vía. A partir de estas velocidades directrices, se calculan los valores de parámetros mínimos y máximos que orientan el diseño de carreteras. La normativa establecida permite evaluar la eficiencia de la vía y proponer alternativas para mejorar las deficiencias en el diseño geométrico vial [22],[23]. En el caso de carreteras de montaña, las curvas a menudo presentan inclinaciones pronunciadas, lo que ocasiona que los vehículos de carga pesada circulen a velocidades reducidas, generando congestión en la zona. Los vehículos más pequeños buscan sobrepasar, dando lugar a situaciones que, en muchos casos, desencadenan accidentes.

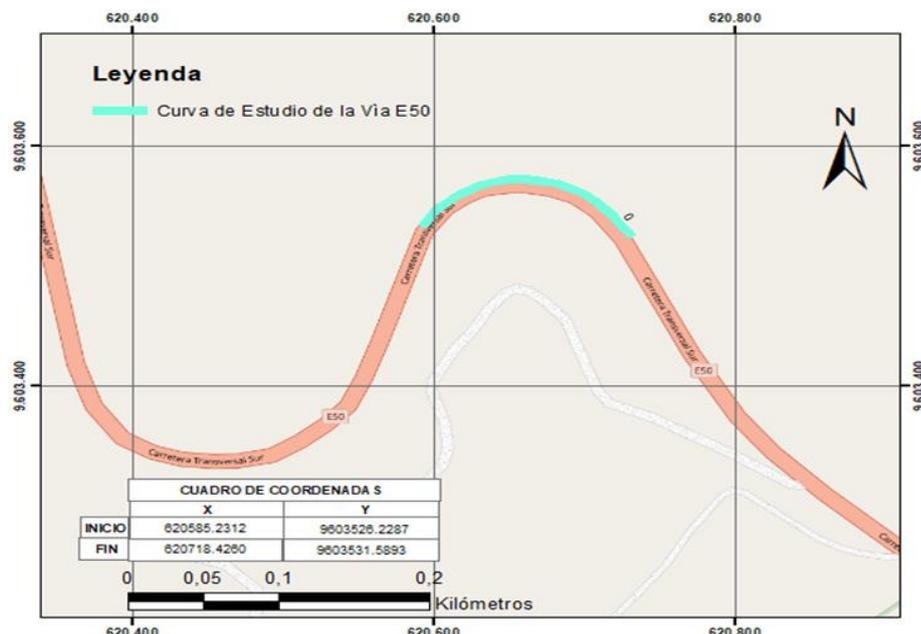
1.1. Alcance Y Objetivos

El alcance de esta investigación se centro en el uso de dos aforos, uno de conteo vehicular y otro de velocidad de operación; un levantamiento topográfico por dron y RTK; los métodos utilizados para el análisis con los datos obtenidos fueron 3: el volumen horario vehicular, grafica de ojiva de velocidades de operación y la representación de los datos obtenidos en campo mediante el uso del software AutoCAD Civil 3D. El tramo de curva de carretera de montaña analizada cuenta con una extensión de aproximadamente 164.1648m0.1642km

El objetivo de este procedimiento se centra en proponer un diseño geométrico para curvas en carreteras de montaña que cumpla con los parámetros establecidos por la normativa ecuatoriana a través de un análisis exhaustivo de los criterios de la clasificación de la vía y diseño geométrico. A partir de los resultados obtenidos durante la evaluación de los indicadores, se presentará un nuevo diseño, cuya validación se llevará a cabo mediante una simulación en el software AutoCAD Civil 3D.

2. METODOLOGÍA

Aproximadamente cada año, más de un millón de vidas se pierden a nivel global debido a los accidentes de tráfico, y se estima que, entre 20 y 50 millones de personas a nivel de todo el mundo, padecen heridas que no resultan fatales [3]. En el Ecuador, la tasa de mortalidad es de 20 decesos por cada 100.000 habitantes y esto nos ubica como el quinto país con un margen de mortalidad más alta en incidentes viales de América del Sur [24]. La mayor parte de estos accidentes se atribuye al mal estado de las carreteras de montaña, zonas que históricamente han presentado desafíos significativos, con interrupciones y deslizamientos frecuentes, ocasionados por las variadas condiciones climáticas que caracterizan nuestro país.



En el caso de la vía E50, que abarca 224.14 km y cruza las provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, se seleccionó un tramo específico de 6 km en el cantón Santa Rosa, desde Limón Playa hasta Torata, que comprende 19 curvas. En este tramo se aplicó el método de observación directa, para identificar la curva más peligrosa, representada en la Figura 1. Esta curva se convirtió en el punto focal del estudio, sirviendo como base para realizar el análisis.

Figura 1: Curva de estudio de la vía E50

La elaboración de la investigación se basa en la documentación bibliográfica de artículos científicos que detallan los componentes necesarios para el diseño y el análisis de una curva de montaña. A continuación, se describen los pasos llevados a cabo en el proceso.

2.1. Aforo Vehicular

Los análisis de flujos de tráfico se llevan a cabo con la finalidad de adquirir información veraz acerca de la circulación de vehículos. La realización de un aforo vehicular implica contabilizar la cantidad de vehículos que transitan por un punto específico en ambas direcciones durante un intervalo de tiempo predefinido. La meta principal de esta actividad es cuantificar el número de vehículos en la ubicación objeto de estudio [25].

En este estudio se realizó un aforo manual de 12 horas, de siete de la mañana a siete de la noche durante 3 días consecutivos, se estima que este periodo abarca aproximadamente el 70% del volumen horario. Utilizando la información obtenida, se procedió a calcular el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) y el Tráfico Futuro [26].

2.2. Estudio De Velocidad

La velocidad de diseño se define como la velocidad máxima a la cual los vehículos pueden circular de manera segura en una sección específica de la carretera [8]. En esta investigación, se busca determinar la velocidad necesaria para el diseño de una curva en una carretera de montaña, ya que este dato es fundamental para derivar diversos elementos geométricos necesarios en el proceso de diseño de la curva.

Para evaluar las velocidades de punto de los vehículos, se empleó un método manual. Inicialmente, se trazaron dos líneas transversales en la superficie de la carretera, ubicadas a una distancia de 50 metros antes de la entrada a la curva. Utilizando un cronómetro, se registraron los tiempos que los vehículos tardaron en recorrer dicha distancia. El observador se posicionó estratégicamente entre las marcas, iniciando el cronómetro cuando las ruedas delanteras alcanzaron la primera línea y deteniéndolo cuando el mismo vehículo cruzó la segunda línea con las ruedas delanteras. La velocidad se calcula dividiendo la distancia predefinida en metros entre el tiempo requerido para su recorrido [25].

Este aforo de velocidades se llevó a cabo en la entrada de la curva de estudio, tanto en la dirección de Santa Rosa a Torata, durante dos horas desde las ocho de la mañana hasta las diez de la mañana, como en la dirección opuesta, de Torata a Santa Rosa, desde las once de la mañana hasta la una de la tarde. Durante este proceso, se documentaron las velocidades en ambas direcciones y con esta información se construye la gráfica de ojivas para identificar las velocidades correspondientes de los percentiles 15, 50, 85 y 98.

2.3. Levantamiento Topográfico

La realización de un levantamiento topográfico preciso de la curva de estudio es esencial, ya que sirve como base para la selección de los criterios adicionales necesarios para el diseño final. Este levantamiento se ejecutó utilizando la avanzada tecnología de Dron en combinación con la tecnología RTK (Real Time Kinematic), asegurando una obtención de datos altamente exacta y detallada para un adecuado diseño.

Para el levantamiento de la curva se utilizó el Dron Mavic Air 2s y el equipo de RTK TOP106-GPS y GNSS. Esta metodología avanzada combina la movilidad del dron con la precisión en tiempo real proporcionada por el sistema RTK [27].

Los pasos realizados para el levantamiento se detallan a continuación:

Primero, se configuraron los equipos RTK y se colocaron en modo rover, este modo permite realizar correcciones. Para obtener una precisión aún mayor, se optó por correcciones NTRIP, que son correcciones en tiempo real. Se utilizaron credenciales del Instituto Geográfico Militar (IGM) para obtener correcciones de las coordenadas en tiempo real.

A continuación, se procedió a configurar el equipo RTK ingresando los datos del IGM y la altura instrumental. Con el equipo configurado, se inició el levantamiento de los puntos en el terreno natural para establecer cotas, tomando medidas cada 25 metros en tramos rectos y cada 15 metros en las curvas. Estos puntos se ubicaron en el eje de la vía, en la cuneta y en el centro de la calzada. Por otro lado, los puntos de control fueron marcados en zonas despejadas para evitar obstáculos durante la captura de imágenes con el dron.

Posteriormente, se utilizó la aplicación Litchi para planificar el vuelo del dron, automatizando la altura de vuelo y la ruta. Durante el vuelo, el dron siguió la ruta predefinida, capturando imágenes aéreas de la curva.

Finalmente, mediante un software especializado, se corrigieron los errores señalados por el dron utilizando los puntos marcados por el RTK, contribuyendo así a mejorar aún más la precisión de los datos obtenidos.

Los datos recopilados en el levantamiento se utilizan para analizar la topografía de la curva, incluyendo factores como radio de la curva, ancho de carril, longitud, peralte, pendiente, entre otros.

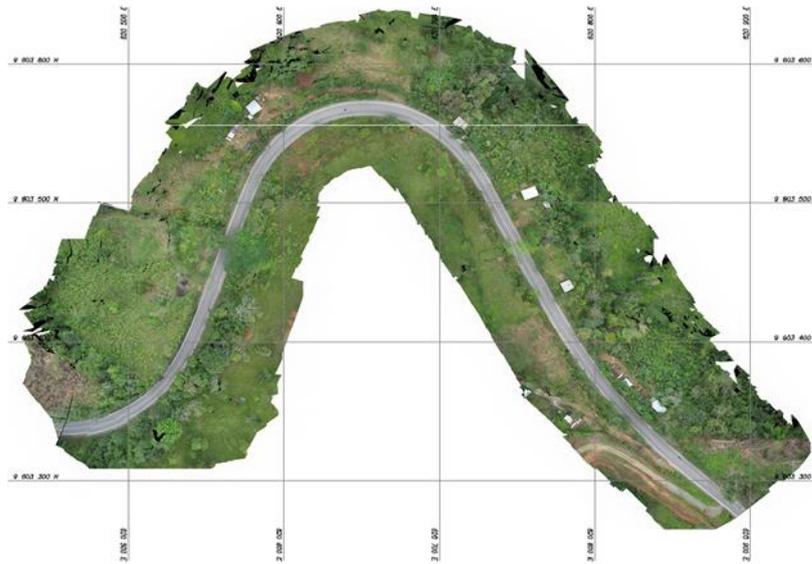


Figura 2: Ortofotografía de curva de estudio, escala 1:1500 y precisión 0.02m

2.4. Diseño geométrico de la curva mediante el software AutoCAD Civil 3D

Primero se procesan los datos recopilados con el dron utilizando el software PIX4D, para generar un modelo digital de elevación (MDE) y curvas de nivel en formato de polilínea en 3D. Posteriormente, se procedió a la creación y edición del polígono de superficie para establecer la base topográfica. Luego, se creó el alineamiento horizontal a partir del objeto existente, definiendo la geometría precisa de la curva. Seguidamente, se generaron perfiles longitudinales incorporando el porcentaje de pendiente de la rasante y se crearon secciones transversales típicas de carreteras o ensamblaje, especificando anchos de carril, arcén y talud. Seguidamente, se creó el corredor vial integrando el ensamblaje. Finalmente, se generó una nueva superficie para realizar el corte del terreno, permitiendo visualizar el corredor vial en relación con el entorno topográfico y completando así el proceso integral en el Civil 3D.

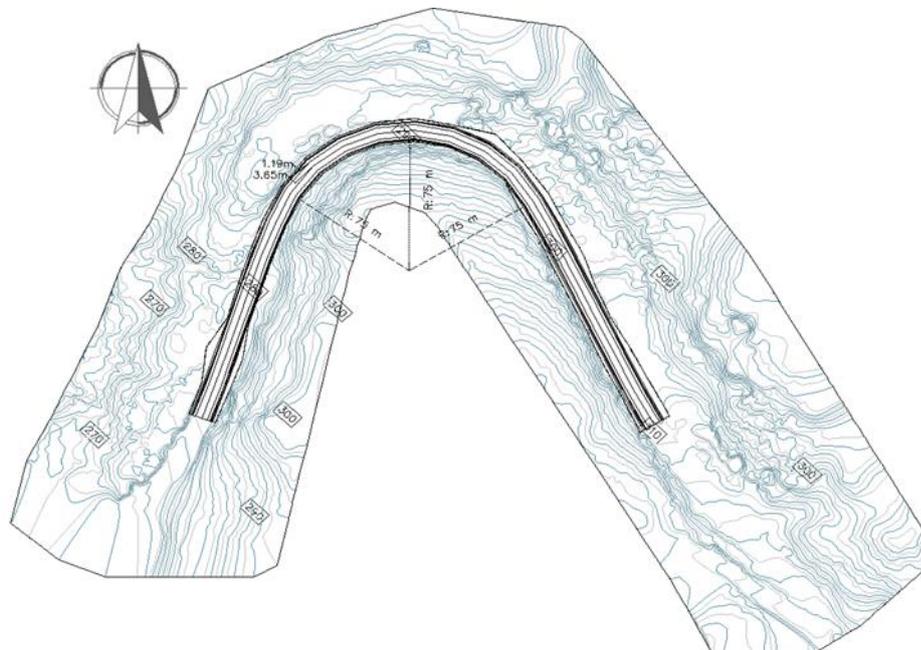


Figura 3: Diseño de curva en Civil 3D

Una vez finalizado el diseño de la curva, la implementación de la extensión de Vehicle Tracking de Civil 3D permitirá simular con precisión el comportamiento del tráfico. Este análisis nos brindará información crucial para evaluar la idoneidad del diseño, asegurando que cumpla con los estándares de seguridad.

2.5. Proceso De Jerarquía Analítica

Para la evaluación del diseño geométrico de curvas en carreteras de montaña se realizó un proceso de jerarquía analítica (AHP) con la finalidad de determinar la importancia de cada criterio y ponderar con precisión diversos parámetros de evaluación. Se consideró el diseño geométrico como el criterio principal, dentro de los cuales, se analizaron seis indicadores como la velocidad, radio de curva, ancho de carril, ancho de berma, peralte y pendiente. En la Tabla 1 se muestran las ponderaciones obtenidas mediante el método multicriterio, donde varios ingenieros civiles ponderaron cada indicador. Para el diseño geométrico la ponderación final es de 1.

2.5.1. Velocidad

El primer indicador se centra en la velocidad de operación, la cual se analiza mediante un análisis comparativo entre la velocidad de operación obtenida a partir del gráfico de ojiva de velocidades y la establecida por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), según lo dicho por los ingenieros expertos en el tema los valores a asignarse estarán clasificados en función a su importancia, en este criterio los rangos van de 0.15 a 0.20, debido a que la velocidad está estrechamente ligada al diseño de radio de curva.

2.5.2. Radio De Curva

El segundo indicador es el radio de curva y se analiza mediante un análisis comparativo entre el radio medido en el software AutoCAD y el radio mínimo establecido por la MTO. El rango de ponderación de este criterio, es igual al mencionado anteriormente ya que ambos son esenciales en el diseño geométrico en una curva.

2.5.3. Ancho De Carril

El tercer indicador es el ancho de carril y se evaluará mediante la comparación entre el ancho actual de la carretera y el establecido según la norma MTO. El rango de ponderación de este criterio es menor a los dos indicadores anteriores, pero no menos importante, siendo este de 0.10 a 0.15, debido a que este se centra a la comodidad del conductor y sus pasajeros, con respecto a factores tales como la visibilidad y espacio de maniobra.

2.5.4. Ancho De Berma

El cuarto indicador se enfoca en el ancho de la berma y se evalúa a través de un análisis comparativo entre el espacio lateral actual y el especificado en la normativa. Su ponderación se encuentra entre 0.10 a 0.15, ya que al igual que el ancho de carril se centra en la comodidad de los conductores y pasajeros, pero adicionalmente aborda un tema importante en el diseño de una curva de carretera, tales como el drenaje y la estabilidad de la misma.

2.5.5. Peralte

El quinto indicador se enfoca en el peralte y evalúa la inclinación lateral actual de la superficie de la calzada en la curva, comparándola con lo establecido por la normativa. Su ponderación se encuentra entre 0.12 a 0.15, debido a que su valor se obtiene de un criterio sumamente importante que es la velocidad de diseño y que este genera estabilidad lateral a los vehículos al atravesar una curva.

2.5.6. Pendiente

Por último, el sexto indicador a evaluar es la pendiente, para lo cual se realizará una comparación entre la inclinación de la carretera medida en AutoCAD y el valor de diseño recomendado por las normas. En este caso su ponderación se encuentra entre 0.10 a 0.15, por motivo que este criterio que es la pendiente dictamina la velocidad de operación de los vehículos.

En el caso de que no se cumpla algún criterio de diseño geométrico, se asignará una puntuación de 0.

Tabla 1: Descripción de los indicadores de evaluación

Proceso	Indicador	Definición	Instrumento	Método	Evaluación	Ponderación
Diseño Geométrico	Velocidad	Velocidad con la que el conductor ingresa a la curva	- Fichas de observación - Software Excel	Observación de campo y Análisis de contenido	Cumple con la velocidad de diseño	0,20
	Radio de curva	Distancia desde el centro de la curva hasta un punto específico en la trayectoria de dicha curva	- Levantamiento topográfico con Dron y RTK - Software AutoCAD Civil 3D	Análisis comparativo con la normativa	Cumple con lo establecido en la normativa MTOP	0,20
	Ancho de carril	Distancia entre los límites de un carril	- Levantamiento topográfico con Dron y RTK - Software AutoCAD Civil 3D	Análisis comparativo con la normativa	Cumple con el ancho establecido en las normas MTOP.	0,15
	Ancho de berma	Espacio lateral adicional entre la calzada y el borde de la carretera	- Levantamiento topográfico con Dron y RTK - Software AutoCAD Civil 3D	Análisis comparativo con la normativa	Cumple con lo establecido en la normativa MTOP	0,15
	Peralte	Inclinación lateral de la superficie de la calzada en la curva	- Levantamiento topográfico con Dron y RTK - Software AutoCAD Civil 3D	Análisis comparativo con la normativa	Cumple con lo establecido en la normativa MTOP	0,15
	Pendiente	Inclinación de la carretera	- Levantamiento topográfico con Dron y RTK - Software AutoCAD Civil 3D	Análisis comparativo con la normativa	Cumple con lo establecido en la norma NEVI-12	0,15
TOTAL						1

La determinación de la ponderación final en la evaluación se logra al sumar el valor atribuido a cada indicador. En la Tabla 2, se presentan tres rangos establecidos por los especialistas que participaron en el análisis jerárquico. Esta tabla facilita una evaluación precisa del diseño geométrico de la curva de estudio.

Tabla 2: Evaluación del diseño geométrico de la curva

Ponderación	Descripción
0.75 – 1	Diseño geométrico óptimo
0.51 – 0.75	Diseño geométrico aceptable
0 – 0.5	Diseño geométrico deficiente

3. RESULTADOS

3.1. Clasificación de la vía

Con la información recolectada durante los tres días de aforo se calculó el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) de la vía E50. En la dirección Santa Rosa - Torata, se registró un TPDA de 2957 Veh/hora. Para proyectar el tráfico futuro, se empleó el tráfico asignado derivado del TPDA, una tasa de crecimiento específica según el tipo de vehículo y un periodo de proyección de 20 años. Estos cálculos arrojaron un tráfico esperado de 7522 Veh/hora, clasificando la vía como una Carretera de dos carriles Tipo C1 según la clasificación funcional del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO). En cambio, en la dirección opuesta Torata – Santa Rosa se determinó un TPDA de 3200 Veh/hora. La proyección para el tráfico futuro estima un total de 7845 Veh/hora, clasificando la vía como una Carretera de dos carriles Tipo C1.

La clasificación obtenida no concuerda con el diseño geométrico actual. Además, durante la observación directa, se identificaron irregularidades en su diseño y la presencia de vehículos pesados provoca congestión vehicular y, por consiguiente, un mayor riesgo de accidentes. Se observó que algunos conductores son muy imprudentes y a menudo rebasan sin percibir el peligro de colisión con los vehículos que se dirigen en sentido contrario. Por este motivo este indicador obtendrá una calificación de 0.

Según las normas NEVI-12 para una carretera tipo C1, una de las mejores y únicas soluciones a este problema es el diseño y construcción de un carril de ascenso. Este carril adicional ayudaría a disminuir la congestión vehicular, permitiendo a los vehículos más lentos moverse a un carril separado, liberando así el flujo de tráfico. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta vía está en un terreno montañoso, lo que implica consideraciones de diseño adicionales para garantizar la seguridad y comodidad de los conductores, pasajeros y habitantes de la zona.

3.2. Diseño Geométrico

Los parámetros que se utilizaron para la determinación del diseño geométrico son: velocidad, radio de curva, ancho de carril, ancho de berma, peralte y pendiente. Estos parámetros fueron evaluados considerando la proyección de la curva de la carretera.

3.2.1. Velocidad

La velocidad de operación correspondiente al percentil 85% de Santa Rosa a Torata es de 68 km/h y en la dirección opuesta de Torata a Santa Rosa es de 78 km/h. Se calculó un promedio de las velocidades en ambas direcciones, obteniendo como resultado una velocidad de 73 km/h. Al comparar esta velocidad con la establecida en la normativa del MTO, la cual es de 60 km/h para carreteras de dos carriles Tipo C1 en terrenos montañosos, se observa que no cumple con la velocidad de diseño máxima establecida. Por lo tanto, se asignará un valor de 0 en este criterio.

Para solucionar la problemática de velocidades altas en este tipo de carreteras, se sugiere incrementar la presencia de señales de tráfico y marcas viales de desaceleración en determinadas secciones de la curva.

3.2.2. Radio De Curva

Según la normativa MTO para una Carretera de dos carriles Tipo C1 el radio mínimo permitido para curvas horizontales en terrenos montañosos es de 110 m. Para evaluar si la curva de estudio cumple con lo establecido en la normativa se utilizó la ortofoto previamente obtenida mediante el levantamiento topográfico por Dron. Posteriormente, se midió el radio de la curva utilizando el software AutoCAD Civil 3D. Con un resultado de 75 m para el radio de la curva, se evidencia que no cumple con el mínimo establecido por las normas, lo que lleva a asignarle una calificación de 0 en este parámetro.

3.2.3. Ancho De Carril

De acuerdo con la normativa del MTO, el ancho mínimo establecido para este tipo de vías es de 3.65 m. Se recopilaron diez datos a lo largo de toda la curva y, al calcular el promedio, se obtuvo un ancho de carril actual de 3.65 m. Esto demuestra que la vía cumple con lo estipulado por la normativa, por lo que se le asigna un valor de 0.15.

3.2.3. Ancho De Berma

El ancho mínimo de la berma establecido por la normativa MTOP es de 1.5 m. Mediante el software AutoCAD Civil 3D, se midieron diez anchos a lo largo de la curva, y el resultado indicó un ancho de berma actual en ambas direcciones de 1.19 m. Dado que esta medida no cumple con lo especificado en la norma, se le otorga una calificación de 0.



Figura 4: Ancho de carril y berma medido en AutoCAD Civil 3D

3.2.4. Peralte

Según la normativa del MTOP, el peralte máximo permitido es del 10%. Utilizando Civil 3D y las curvas de nivel, se calcularon diez datos de peralte a lo largo de toda la curva para obtener un promedio y así tener un valor más preciso del peralte de la curva. El resultado obtenido fue del 8,3%. Por lo tanto, este parámetro cumple con lo establecido en la normativa y se le asignará un valor de 0.15.

3.2.5. Pendiente

Conforme a la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, en el caso de una velocidad de diseño de 60 km/h y una topografía montañosa, la pendiente máxima permitida es del 8%. Utilizando AutoCAD Civil 3D, se determinó la pendiente longitudinal de la vía, la cual resultó ser del 7,78%. Este valor demuestra que dicho criterio cumple con la normativa establecida, por lo que se le asigna un valor de 0,15.

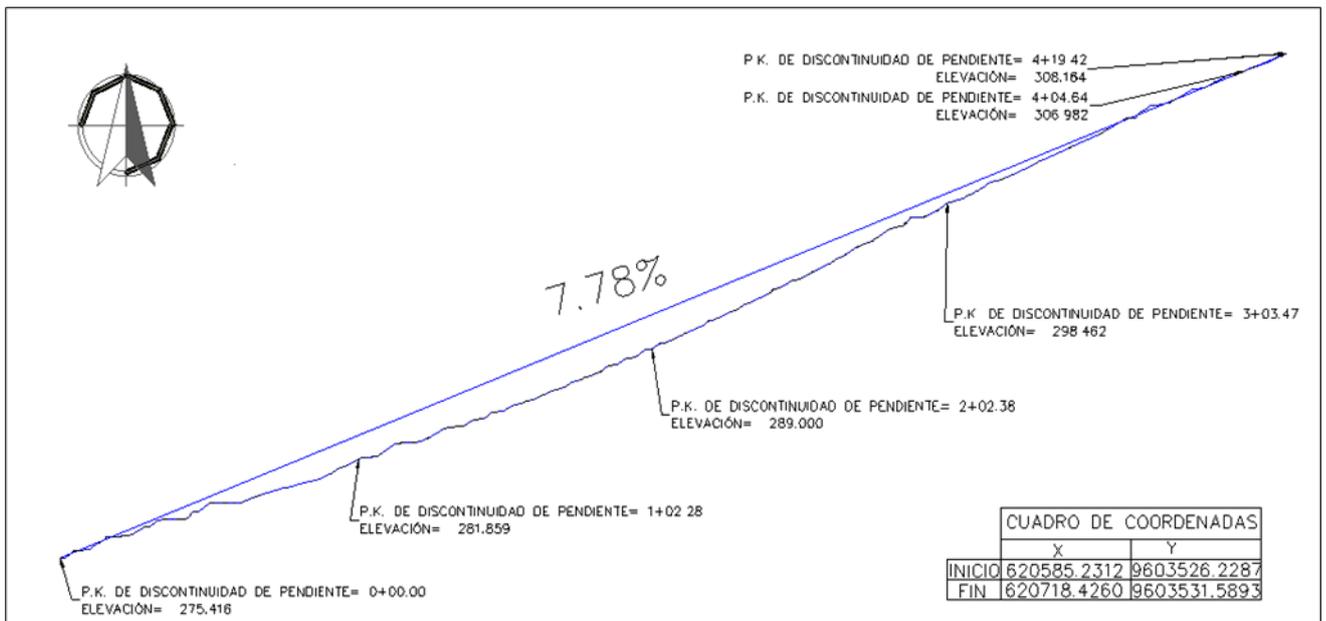


Figura 5: Pendiente longitudinal de la vía

3.3. Evaluación Del Diseño Geométrico De Curvas En Carreteras De Montaña

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los siete indicadores evaluados, cada uno acompañado de su respectiva ponderación.

Tabla 3: Resultados de la evaluación

Proceso	Indicador	Definición	Cumple	Ponderación
Diseño geométrico	Velocidad	Velocidad con la que el conductor ingresa a la curva	No	0
	Radio de curva	Distancia desde el centro de la curva hasta un punto específico en la trayectoria de dicha curva	No	0
	Ancho de carril	Distancia entre los límites de un carril	Si	0,15
	Ancho de berma	Espacio lateral adicional entre la calzada y el borde de la carretera	No	0
	Peralte	Inclinación lateral de la superficie de la calzada en la curva	Si	0,15
	Pendiente	Inclinación de la carretera	Si	0,15
TOTAL				0,45

De acuerdo con la metodología propuesta, se alcanzó una ponderación final de 0.45, señalando así que el diseño geométrico de la curva se encuentra en un estado deficiente.

Tabla 4: Resultado del Estado del diseño geométrico

Ponderación	Descripción
0 – 0.5	Diseño geométrico deficiente

Adicionalmente a la evaluación a través de los indicadores, se simuló la curva existente mediante la extensión de Vehicle Tracking de Civil 3D. Para esta simulación, se seleccionó un semirremolque con una longitud total de 20.88 m y un ancho de 2.59 m, ya que se asemejaba al vehículo más grande registrado durante el conteo vehicular, un tractocamión de tres ejes y semirremolque de tres ejes (3S3) con una longitud de 20.50 m y un ancho de 2.60 m según la norma NEVI. Durante la emulación en la dirección Santa Rosa - Torata, se observó que el remolque se salía del carril hacia el lado derecho, invadiendo la cuneta; en la dirección opuesta, invadía el otro carril. La distancia entre los vehículos de ambos carriles era apenas de 0.80 m. La emulación, junto con la evaluación previa, confirmó de manera concluyente que el diseño actual es deficiente.

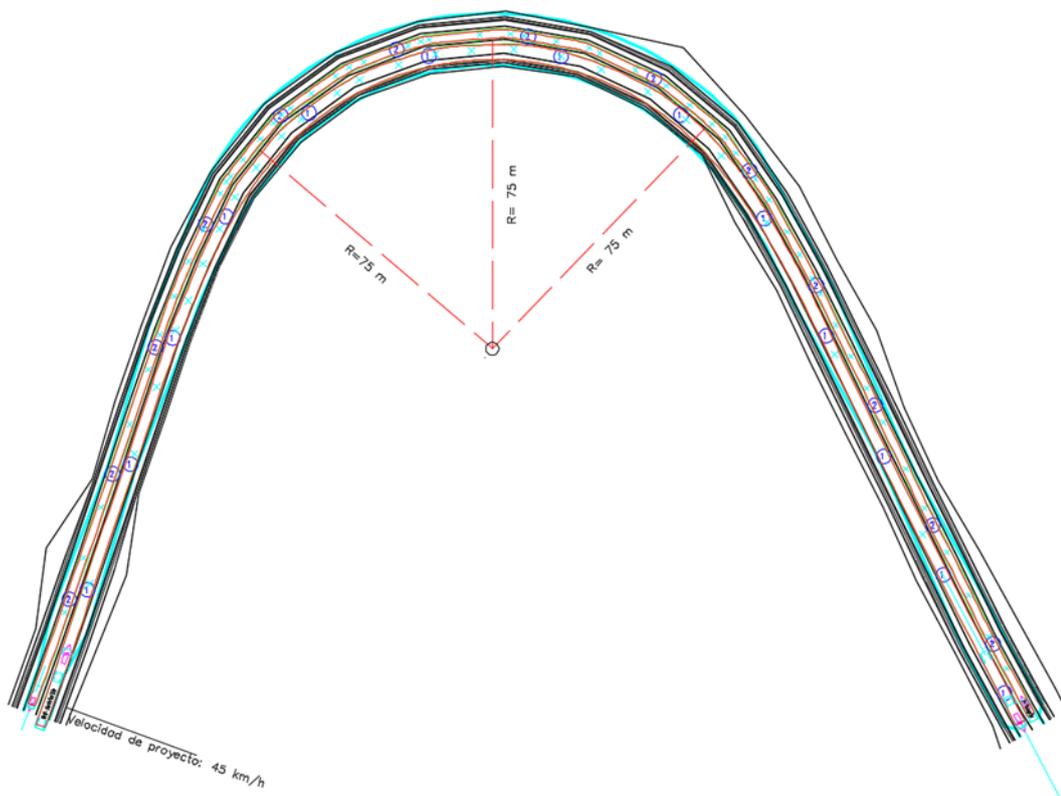


Figura 6: Diseño geométrico de la curva actual - Radio 75 m

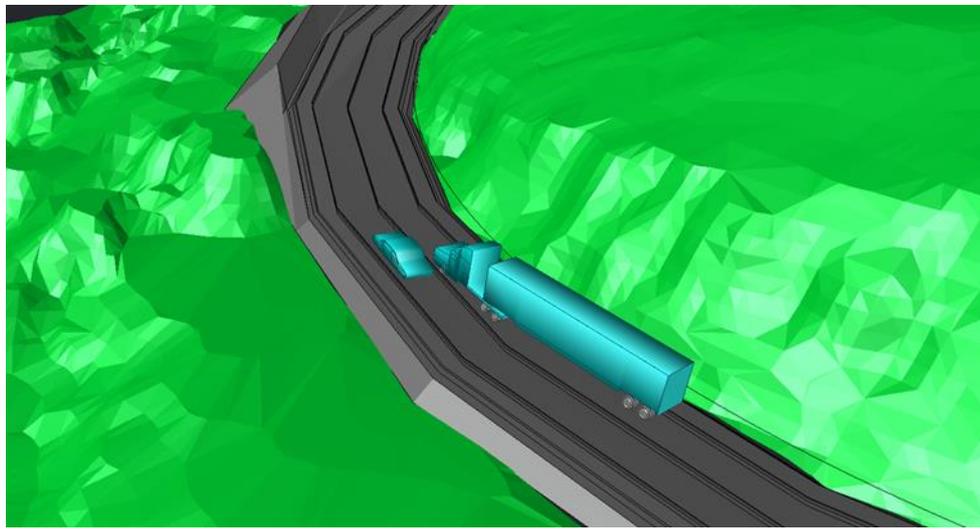


Figura 7: Simulación de la curva actual

3.4. Propuesta De Diseño Geométrico De La Curva Seleccionada En La Vía E50

Se propone una alternativa de diseño geométrico para la curva analizada, la cual no solo cumple con lo establecido por las normativas ecuatorianas vigentes, sino que también aborda de manera eficiente el problema de congestión vehicular. En la propuesta se incorpora un carril adicional de ascenso, brindando a los vehículos más lentos la posibilidad de moverse por un carril separado. Esta medida está diseñada para mejorar la fluidez del tráfico y reducir la congestión en tramos inclinados. En la tabla 5 se presenta una comparación detallada entre las características de la curva existente y la nueva propuesta de diseño.

Tabla 5: Comparación de las características de la curva de estudio

Parámetros	Curva actual	Propuesta de diseño
Clasificación de la vía	Carretera de dos carriles Tipo C2	Carretera de dos carriles Tipo C1
Nº de carriles	2	3
Velocidad	45 km/h	60 km/h
Radio de curva	75 m	110 m
Ancho de carril	3,65 m	3,65 m
Ancho de berma	1,19 m	1,5 m
Peralte	8,3 %	10 %
Pendiente	7,78 %	7,12 %

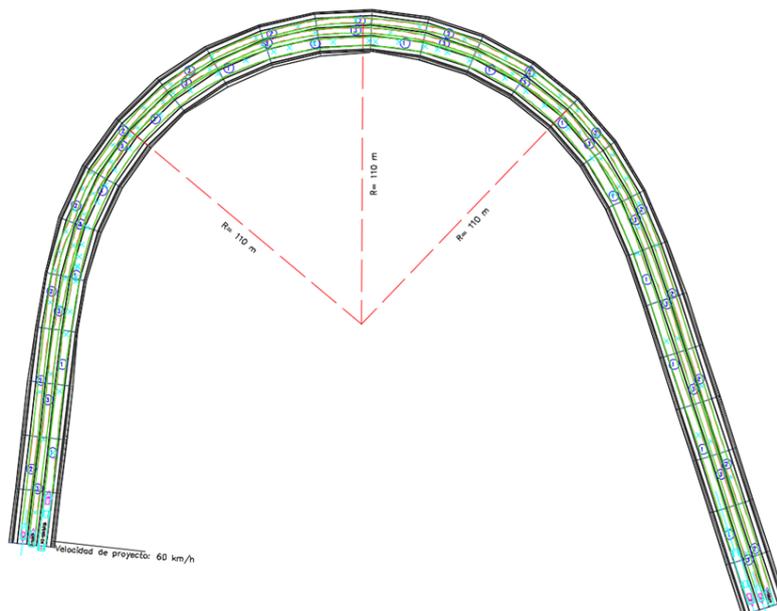


Figura 8: Propuesta de diseño geométrico de la curva - Radio 110 m

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se llevó a cabo una simulación de la curva propuesta, y se observó que, al utilizar el mismo vehículo, este ya no se salía hacia la cuneta ni invadía el otro carril. Además, la distancia entre los vehículos de ambos carriles aumentó a 1,4 metros. Esta alternativa de diseño cumple con las normas y aborda los problemas identificados durante la evaluación. Esta mejora contribuye a minimizar los riesgos de accidentes y a mejorar la experiencia de conducción en curvas de carreteras de montaña.

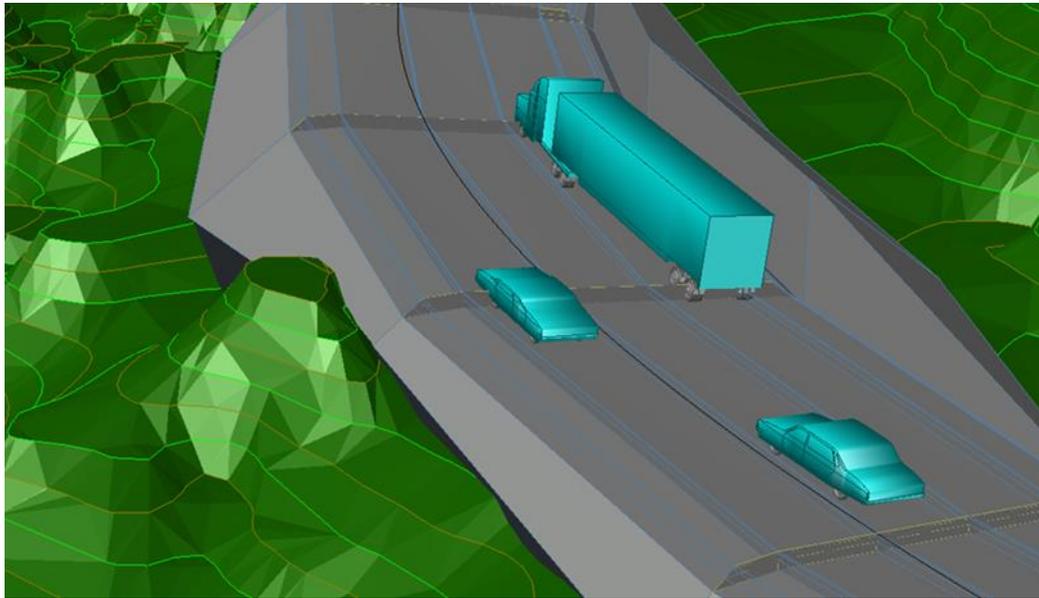


Figura 9: Simulación del diseño propuesto

4. CONCLUSIONES

El estudio se fundamentó en la revisión bibliográfica de varios artículos, los cuales abordaron parámetros esenciales del diseño geométrico de curvas en carreteras de montaña. A través del análisis de indicadores clave, como la clasificación de la vía y el diseño geométrico, que evaluaron elementos cruciales como la velocidad, radio de curva, ancho de carril, ancho de berma, pendiente y peralte, en conjunto con el uso del software AutoCAD Civil 3D, se logró identificar las deficiencias en la configuración geométrica de esta curva. Este enfoque permitirá mejorar el diseño de las curvas, reduciendo significativamente su nivel de peligro y contribuyendo a la seguridad y eficiencia del tránsito vehicular en terrenos montañosos.

Se identificaron los elementos determinantes en el diseño de curvas, y con ello se evaluó la curva de estudio mediante seis indicadores, de los cuales tres cumplieron con las normativas ecuatorianas vigentes, mientras que tres no las cumplieron. Se detectaron problemas en cuanto a la clasificación de la vía, ya que no concuerda con el modelo actual. Por otro lado, en el análisis del diseño geométrico se evidenció que los vehículos superaban la velocidad de diseño, lo que ocasionaba complicaciones para conductores de vehículos pesados y livianos. A esto se suma que tanto el radio de curva como el ancho de la berma eran demasiado pequeños, dificultando el ingreso de vehículos pesados y propiciando invasiones en la cuneta. En consecuencia, la ponderación final de 0.45 indica que el diseño geométrico actual es deficiente.

Con base en los problemas identificados durante la evaluación, se presenta una propuesta de diseño geométrico para la curva de la carretera analizada. Los ajustes realizados incluyen aspectos como la velocidad, el radio de curva y el ancho de berma, todos adaptados a la nueva clasificación obtenida. Estos cambios se implementaron con el objetivo de cumplir con los estándares establecidos por las normativas vigentes en Ecuador. Además, como medida para mejorar la fluidez del tráfico y reducir la congestión vehicular, se implementó un carril de ascenso destinado a vehículos pesados. La validación de esta propuesta se llevó a cabo mediante la simulación realizada a través de la extensión de Vehicle Tracking de Civil 3D, evidenciando que el nuevo diseño es aceptable y resuelve las deficiencias identificadas, mejorando tanto la capacidad vial como la del diseño geométrico. Esta alternativa brinda un servicio de seguridad vial óptimo.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo un análisis exhaustivo de la peligrosidad en las curvas mediante una observación detallada en campo, con el fin de determinar con precisión aquellas curvas que representan un mayor riesgo para los conductores y pasajeros. Para ello, es crucial realizar un meticuloso mapeo de la zona utilizando equipos topográficos como estaciones totales. Además, se sugiere considerar el empleo de herramientas más especializadas como levantamientos por dron o sistemas RTK, en función de la precisión requerida para la obtención de datos. La elección entre estas opciones dependerá del criterio de cada investigador y de los objetivos específicos del estudio.

Para determinar las ponderaciones de cada criterio, es fundamental considerar la opinión de expertos, reconociendo que la subjetividad inherente a cada individuo está inevitablemente ligada a su perspectiva. Dado que cada experto puede tener una percepción diferente sobre la importancia relativa de los criterios analizados, es crucial recabar la opinión de profesionales con experiencia en el tema en cuestión. En el contexto de nuestro análisis jerárquico, se asignaron valores cuantitativos que reflejan la importancia de cada indicador, permitiendo así una evaluación objetiva y fundamentada en criterios específicos.

Se recomienda, en el uso del software AutoCAD Civil 3D, georreferenciar el trabajo para garantizar la coherencia en la representación de los datos obtenidos, asegurando así una alineación precisa con la ubicación real. Además, es crucial ingresar de manera precisa los parámetros de diseño correspondientes a la carretera en estudio o a diseñar para evitar errores al utilizar la extensión "Vehicle Tracking" de AutoCAD Civil 3D. Esta extensión proporciona una amplia biblioteca de vehículos de transporte, por lo que es fundamental seleccionar el vehículo que cumpla con las normativas específicas de cada país. Es importante destacar que la elección del vehículo debe basarse en el tipo de vehículo más representativo que transite por la zona de estudio, y se recomienda tener en cuenta la clasificación proporcionada por el ministerio de transporte de cada país para una correcta selección.

1. F. J. Wilches, J. L. A. Burbano, and E. E. C. Sierra, "Vehicle operating speeds in southwestern Colombia: An important database for the future implementation of optimization models for geometric design of roads in mountain topography," *Data Brief*, vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.106210.
2. S. Fric, F. Trpčevski, D. Gavran, V. Ilić, S. Vranjevac, and M. Lukić, "Road safety inspection – Incompatibility between the function of the road and the typical cross section – Belgrade's Northern Arterian Tangent," 2nd Macedonian road congress, 2022, Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2784>
3. M. Moomen, M. Rezapour, M. N. Raja, and K. Ksaibati, "Evaluating the safety effectiveness of downgrade warning signs on vehicle crashes on Wyoming mountain passes," *Cogent Engineering*, vol. 6, no. 1. 2019. doi: 10.1080/23311916.2019.1580405.
4. I. E. Zepeda Ortega, G. Ángeles-Castro, and D. G. Carrillo-Murillo, "Infraestructura carretera y crecimiento económico en México," *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, vol. 50, no. 198, 2019, doi: 10.22201/iiec.20078951e.2019.198.66383.
5. J.-L. B. B.-S.-M. C.-M. S. Y. González Silva, "METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO SOSTENIBLE DE EJES VIALES EN VÍAS INTER-CANTONALES," *Revista ciencia y construcción*, pp. 0–15, 2023, Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/198>
6. L. Yue and H. Wang, "An Optimization Design Method of Combination of Steep Slope and Sharp Curve Sections for Mountain Highways," *Math Probl Eng*, vol. 2019, 2019, doi: doi.org/10.1155/2019/2416342.
7. D. Ciampa and S. Olita, "Mountain Roads' Geometric Design: Methodological Proposal for Hairpin Bend Design/Retrofitting," *Infrastructures (Basel)*, vol. 7, no. 9, 2022, doi: 10.3390/infrastructures7090112.
8. X. Wang and X. Wang, "Speed change behavior on combined horizontal and vertical curves: driving simulator-based analysis," *Accid Anal Prev*, vol. 119, 2018, doi: 10.1016/j.aap.2018.07.019.
9. N. R. M. JULIÁN DAVID MARIN AGUILAR, "PROPUESTA DE UN DISEÑO GEOMÉTRICO DE UNA AUTOPISTA A DOBLE NIVEL PARA LA CALLE 13 ENTRE LA AVENIDA BOYACÁ HASTA LA INTERSECCIÓN CON LA PROPUESTA DEL ANILLO VIAL PARA BOGOTÁ," *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*, pp. 1–140, 2015, Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3692>
10. Z. Yu, Y. Chen, X. Zhang, and J. Xu, "Track Behavior and Crash Risk Analysis of Passenger Cars on Hairpin Curves of Two-Lane Mountain Roads," *J Adv Transp*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4906360.
11. L. Yue, H. Wang, and Z. Xu, "Optimized geometric design of mountain highways based on a vehicle-road coordination model," in *ICTIS 2019 – 5th International Conference on Transportation Information and Safety*, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2019.8883819>.
12. S. Barendswaard et al., "Effect of velocity and curve radius on driver steering behaviour before curve entry," in *Conference Proceedings – IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2019. Doi: 10.1109/SMC.2019.8914263.
13. Y. Liu et al., "Determination of curve speed zones for mountainous freeways," *Math Probl Eng*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8844004.
14. H. Zhang, M. Zhang, C. Zhang, and L. Hou, "Formulating a GIS-based geometric design quality assessment model for Mountain highways," *Accid Anal Prev*, vol. 157, 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.106172.
15. P. M. Chaudhari, J. Goyani, S. Arkatkar, G. Joshi, and S. M. Easa, "Design Consistency Evaluation of Two-Lane Rural Highways in Hilly Terrains," in *Transportation Research Procedia*, 2022. Doi: 10.1016/j.trpro.2022.02.010.
16. B. Wang, S. Hallmark, P. Savolainen, and J. Dong, "Examining vehicle operating speeds on rural two-lane curves using naturalistic driving data," *Accid Anal Prev*, vol. 118, pp. 236–243, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2018.03.017.
17. Y. Ali, M. M. Haque, Z. Zheng, S. Washington, and M. Yildirimoglu, "A hazard-based duration model to quantify the impact of connected driving environment on safety during mandatory lane-changing," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.trc.2019.07.015.

18. Y. Du, L. Yue, and S. Liu, "Optimization of combined horizontal and vertical curves design of mountain road based on vehicle-road coordination model," in *ICTIS 2019 – 5th International Conference on Transportation Information and Safety*, 2019. Doi: 10.1109/ICTIS.2019.8883680.
19. Y. Tang, X. Peng, S. Xu, M. Bai, L. Lin, and H. Sun, "Study on Driver Gaze Characteristics in Sight Distance Limited Section of Mountain Highway Based on Visual Information," *Journal of Mathematics*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9482875.
20. S. Gülci, H. H. Acar, A. E. Akay, and N. Gülci, "Evaluation of Automatic Prediction of Small Horizontal Curve Attributes of Mountain Roads in GIS Environments," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 11, no. 11, 2022, doi: 10.3390/ijgi11110560.
21. V. Vignali, E. M. Acerra, C. Lantieri, F. Di Vincenzo, G. Piacentini, and S. Pancaldi, "Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure," *Autom Constr*, vol. 128, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103752.
22. A. L. Altamira, "Diseño Geométrico de Caminos de Montaña: particularidades y desafíos," *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 17, no. 2, 2020, doi: 10.18041/1794-4953/avances.2.7003.
23. Y. D. García-Ramírez and D. Aguilar-Cárdenas, "Passengers' comfort in horizontal curves on mountain roads: a field study using lateral accelerations," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, May 2020, doi: 10.17533/udea.redin.20200578.
24. R. C. Mestanza Rosero, "Estudio de la mejora de la seguridad vial en la carretera E35/E50, tramo Loja-Catamayo de la provincia de Loja, Ecuador," *RiuNet*, pp. 1–152, 2019, Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/122019>
25. R. A. G. D. L. E. G. H. Yusneivis Rodríguez Gutierrez, "Procedure to determine the average travel speed on two lane rural highways, Cuba," *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 11, pp. 1–12, 2023, Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/1939/193974540002/html/>
26. S. S. Pulugurtha and S. Mathew, "Modeling AADT on local functionally classified roads using land use, road density, and nearest nonlocal road data," *J Transp Geogr*, vol. 93, 2021, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103071.
27. J. E. C. T. L. M. P. P. B. G. Baque Solis, "Comparative topographic analysis on altimetric surveys with RTK GNSS, Total Station and Drone in Manta," *Polo del Conocimiento Revista científico - profesional*, pp. 1–17, 2022, Accessed: Feb. 18, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9227632>