

**ANÁLISIS DE RIESGO DE ACCIDENTALIDAD POR
VOLCAMIENTO DE VEHÍCULOS PESADOS MEDIANTE UN
MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL EN LA VÍA
CÚCUTA - PAMPLONA**

ADRIÁN RICARDO PATIÑO MORANTES

MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, marzo 5 del 2020

**ANÁLISIS DE RIESGO DE ACCIDENTALIDAD POR
VOLCAMIENTO DE VEHÍCULOS PESADOS MEDIANTE UN
MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL EN LA VÍA
CÚCUTA - PAMPLONA**

ADRIÁN RICARDO PATIÑO MORANTES

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Director: PhD GONZALO GUILLERMO MORENO CONTRERAS
Doctor en Ingeniería Mecánica
gmoren@hotmail.com**

**Codirector: PhD JUAN CARLOS SERRANO RICO
Doctor en Ingeniería Mecánica
jcserrano@unipamplona.edu.co**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, marzo 5 del 2020

Dedicatoria

A Dios por darme la fuerza suficiente para emprender este reto y acompañarme en todo momento para poder culminarlo de la mejor manera.

A mis padres y mi hermana por el apoyo moral e incondicional durante estos años.

AGRADECIMIENTOS

A mi director por ser un guía constante en el desarrollo de este proyecto, por sus valiosos aportes y sus grandes enseñanzas para mi formación profesional e integral.

A todos mis compañeros y amigos de la Universidad de Pamplona por su apoyo a lo largo de este proceso.

A los docentes de la maestría, por el conocimiento aportado, el cual fue de gran ayuda para sacar adelante esta investigación.

A José García, estudiante de Ingeniería Civil, por su colaboración en la toma de muestras para esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. JUSTIFICACIÓN.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1 ACCIDENTALIDAD EN COLOMBIA.....	14
4.1.1 Accidentes de tránsito en Colombia por área geográfica	14
4.1.2 Accidentes de tránsito por cada cien mil habitantes	14
4.1.3 Causas de los accidentes de tránsito.....	14
4.1.4 Muertos y heridos en accidentes de tránsito	15
4.2 ESTABILIDAD EN LOS VEHÍCULOS.....	15
4.2.1 Volcamientos impredecibles.....	16
4.2.2 Volcamientos predecibles.	16
4.3 ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS.....	17
4.4 MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL.....	20
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	24
5.1 ENCUESTAS.	24
5.2 PUNTOS CRÍTICOS DE ACCIDENTALIDAD.....	25
5.2.1 Medición de los puntos críticos.	30
5.3 VEHÍCULO CRÍTICO	34
5.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL.....	36
5.4.1 Cálculo de la velocidad	37
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	39
6.1 PUNTO CRÍTICO COROZAL 1 Y COROZAL 2.....	39
6.2 PUNTO CRÍTICO LA DONJUANA	42
6.3 PUNTO CRÍTICO EL DIAMANTE.....	44
6.4 PUNTO CRÍTICO LA MIGUELERA	47
6.5 PUNTO CRÍTICO LAS COCALINAS	48
6.6 PUNTO CRÍTICO ANTES DE LAS COCALINAS 1 Y 2	50
6.7 PUNTO CRÍTICO EL RINCÓN DE LOS CABALLOS	54

6.8	<i>PUNTO CRÍTICO PAMPLONITA</i>	55
6.9	<i>PUNTO CRÍTICO LOS ADIOSES</i>	57
7.	<i>CONCLUSIONES</i>	60
8.	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	62
9.	<i>ANEXOS</i>	65
9.1	<i>ANEXO 1</i>	65
9.2	<i>ANEXO 2</i>	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Usuarios de la vía.....	24
Tabla 2. Características geométricas de los puntos críticos.	33
Tabla 3. Tipo de vehículos pesados que presenta mayor accidentalidad.	34
Tabla 4. Parámetros del tractocamión	36
Tabla 5. Factores de estabilidad (SRT) para las curvas críticas de la vía Cúcuta - Pamplona	37
Tabla 6. Comparación de las velocidades en cada punto crítico con respecto a la velocidad establecida.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Accidentes de tránsito en Colombia, según causas aparentes.	15
Figura 2. Accidente por volcamiento de un vehículo pesado.	16
Figura 3. Volcamiento impredecible.....	16
Figura 4. Volcamientos predecibles.....	17
Figura 5. Modelo de vehículo rígido.....	18
Figura 6. Características del modelo tridimensional.	20
Figura 7. Simplificación del modelo de estabilidad	21
Figura 8. Modelo cinemático tridimensional.....	22
Figura 9. Tipos de accidentes más frecuentes en la vía Cúcuta - Pamplona.	25
Figura 10. Puntos críticos de accidentalidad de la vía Cúcuta – Pamplona.	26
Figura 11. Puntos críticos las S de Corozal 1 y 2 de la vía Cúcuta – Pamplona.	26
Figura 12. Puntos críticos la Donjuana y el Diamante de la vía Cúcuta – Pamplona.	27
Figura 13. Puntos críticos la Miguelera, las Cocalinas, las S antes de las Cocalinas 1 y 2 y el Rincón de los caballos de la vía Cúcuta – Pamplona	27
Figura 14. Puntos críticos Pamplonita y los Adiases de la vía Cúcuta – Pamplona	28
Figura 15. Factores de riesgo que influyen en la accidentalidad de vehículos pesados.	29
Figura 16. Consecuencias o efectos que producen los accidentes.....	30
Figura 17. Medición de los puntos críticos.....	31
Figura 18. Ángulo de pendiente transversal (α).....	32
Figura 19. Ángulo de pendiente longitudinal (β)	32
Figura 20. Modelamiento de la curva en AutoCAD Civil 3D	34
Figura 21. Dimensiones totales del vehículo pesado en metros.	35
Figura 22. Dimensiones del vehículo pesado en metros, vista frontal de la parte trasera de la unidad tractora.	35
Figura 23. Dimensiones del vehículo en metros, vista lateral.	35
Figura 24. Señales de tránsito en el punto crítico Corozal 1	39
Figura 25. Señales de tránsito en el punto crítico Corozal 2	40
Figura 26. Señales de tránsito en los puntos críticos.....	40
Figura 27. Factor de estabilidad SRT del punto crítico Corozal 1.	41
Figura 28. Factor de estabilidad del punto crítico Corozal 2.	41
Figura 29. Volcamiento de un vehículo pesado (volqueta) en el punto crítico Corozal 1 - 15 de agosto 2019	42
Figura 30. Punto crítico la Donjuana.....	43
Figura 31. Factor de estabilidad del punto crítico La Donjuana.	44
Figura 32. Punto Crítico el Diamante.	45
Figura 33. Factor de estabilidad del punto crítico el Diamante.....	46
Figura 34. Punto crítico la Miguelera.	47
Figura 35. Factor de estabilidad del punto crítico la Miguelera.	48
Figura 36. Punto crítico Las Cocalinas	49
Figura 37. Factor de estabilidad del punto crítico las Cocalinas.	50
Figura 38. Punto Crítico Antes de las Cocalinas 1	51
Figura 39. Punto crítico Antes de las Cocalinas 2.....	51

Figura 40. Factor de estabilidad del punto crítico Antes de las Cocalinas 1.....	52
Figura 41. Factor de estabilidad del punto crítico Antes de las Cocalinas 2.....	53
Figura 42. Punto Crítico el Rincón de los Caballos.....	54
Figura 43. Factor de estabilidad del punto crítico el Rincón de los Caballos.....	54
Figura 44. Punto crítico Pamplonita.....	56
Figura 45. Factor de estabilidad del punto crítico Pamplonita.....	57
Figura 46. Punto crítico los Adioses.....	58
Figura 47. Factor de estabilidad del punto crítico los Adioses.....	58

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el transporte de mercancías es uno de los factores de mayor importancia para las empresas y para los países, dado que involucra diferentes aspectos de la cadena de valor, que va desde la producción hasta la exportación de productos. En este sentido el transporte terrestre es de los más empleados, según HBS Noticias (2019) en su mayoría se realiza a través de vehículos pesados (tracto-camión, camión y volqueta), lo cual contribuye al desarrollo del comercio y al crecimiento económico del país.

Según Colfecar (2019), en Colombia el 92% de la carga se transporta por carretera, (cerca de 150 millones de toneladas), esto representa 7% del Producto Interno Bruto (PBI), esta situación conlleva a que por la vías del país se presente un alto tráfico de vehículos pesados, lo cual aumenta el riesgo de accidentes en las vías nacionales (RCN Radio, 2019). Estos accidentes de tránsito, dependiendo de su gravedad, muchas veces tienen implicaciones que afectan la salud pública, la seguridad vial, la movilidad y la economía del país. (Colfecar, 2019).

Según García et al., (2012), con el aumento de la producción del país, se ha observado un aumento considerable en la cantidad de vehículos pesados en las vías y como consecuencia de todo esto, el aumento en los accidentes y la disminución de la seguridad vial.

De acuerdo con la CAN (2017), en la actualidad los tipos de accidentes en los cuales se ven mayormente involucrados los vehículos pesados son: choques, salidas de la vía, atropellos, incendios y volcamientos; este último en especial no es tan frecuente, pero representa grandes efectos y peligrosidad para los usuarios de la vía.

De acuerdo con Patiño et al., (2018), el accidente por volcamiento, el cual es relacionado con la estabilidad lateral del vehículo se puede presentar de dos formas: de forma impredecible, que es cuando el vehículo trata de esquivar alguna imperfección en la vía o algún objeto, y el accidente del tipo predecible, que se presenta cuando el vehículo recorre una curva.

Teniendo en cuenta este último aspecto, y por las condiciones topográficas de las carreteras del país, se determinó analizar este tipo de accidente en la vía Cúcuta – Pamplona, en la cual por muchos años se han presentado accidentes de este tipo, y no se encuentra un estudio al respecto en la literatura.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se tiene que uno de los factores mayormente utilizados en la literatura para determinar cuan propenso es un vehículo a volcarse es el Static Rollover Threshold – SRT por su nombre en inglés, el cual depende de la ubicación del centro de gravedad (CG) del vehículo y de la fuerza inercial (ma_y) que experimenta el vehículo al tomar una curva (m – masa del vehículo y a_y - aceleración lateral máxima), Melo (2004). En este sentido, los vehículos pesados son propensos al volcamiento, ya que presentan un centro de gravedad alto en comparación con otros vehículos, lo cual afecta la estabilidad (Chu et al., 2018).

Para disminuir esta condición de accidentalidad y mejorar la seguridad vial, los fabricantes y los países han mejorado en los siguientes aspectos:

1. Sistemas de estabilidad del vehículo, el cual le permiten al conductor disminuir la velocidad del vehículo y evitar el volcamiento. Además, permiten controlar de forma directa la seguridad, el confort y brindar mejores condiciones de maniobrabilidad al momento de acelerar, frenar y girar, pero presenta un costo elevado (Navarro, 2018).

2. Señales de tránsito, las cuales indican a qué velocidad los vehículos deben tomar una curva. Estas señales presentan una desventaja, ya que no se realiza un estudio previo de las características de vía para determinar realmente esta velocidad, como parámetros de los vehículos y geometría de la vía.

De acuerdo con Moreno (2017), la estabilidad de un vehículo pesado se ve afectada por los siguientes factores o características: habilidad del conductor, características del vehículo y la geometría de la carretera; todos están relacionados entre sí y de acuerdo a la forma en que se desenvuelvan, se puede observar un aumento o disminución de la seguridad vial.

Dadas todos estos aspectos, la seguridad vial en la vía Cúcuta - Pamplona es de vital importancia, ya que hace parte de la principal ruta de comunicación del Departamento Norte de Santander con el resto del país y es la vía por donde se mueve gran parte del comercio internacional con el vecino país de Venezuela.

En concordancia con los anteriores planteamientos, esta investigación se desarrolló, con la finalidad de:

- Dar a conocer a los usuarios de la vía, en qué trayectos o tramos deben transitar con mayor precaución para evitar accidentes, dado que a través de los años se han identificado puntos críticos de accidentalidad que no han podido ser disminuidos o eliminados en su totalidad, por factores como calzada bidireccional que no cuenta con su debida geometría para volumen vehicular y no garantiza el correcto desplazamiento de los vehículos, la falta de señalización o mala señalización, alta velocidad de los vehículos, el mal estado de la vía, entre otros.
- Una vez analizados los puntos de tránsito crítico, determinar la velocidad segura con la cual un vehículo pesado debe transitar sin que ocurra volcamiento. Esta velocidad se calculó mediante un modelo cinemático tridimensional desarrollado por Moreno (2017), el cual permite encontrar el factor de estabilidad (SRT) propio de cada punto, teniendo en cuenta las características de la vía (ángulo de inclinación longitudinal y ángulo de inclinación transversal) y las características del vehículo crítico seleccionado (neumáticos, chasis, suspensión, y quinta rueda).

2. JUSTIFICACIÓN

Hoy día, es de vital importancia prevenir accidentes de tránsito y crear conciencia de la seguridad en las vías. Según cifras de la CAN (2017), en Colombia, en el año 2016, los accidentes de tránsito se redujeron en un 8.4%, con respecto al año anterior, al pasar de 217.554 en el año 2015 a 199.404 en el año 2016, siendo el año 2015 donde más se han presentado accidentes de tránsito en Colombia, de los cuales el 12% se presentaron en el área rural y el 88% en el área urbana.

Gran parte de estos accidentes de tránsito están relacionados con los vehículos pesados, con respecto al departamento de Norte de Santander se tiene que para el 2016 fueron de 817 accidentes de tránsito que involucran vehículos pesados, de los cuales se tienen: choques, volcadura, atropello, caída de pasajeros, incendios de vehículos, entre otros tipos.

Según Patiño et al., (2018), la vía Cúcuta – Pamplona, presenta nueve puntos críticos o trayectos donde han ocurrido accidentes por volcamiento de vehículos pesados o son propensos a suceder, debido al alto flujo vehicular, la geometría de cada trayecto y la mala señalización vial. Además, se observó que solo un punto crítico de los nueve seleccionados cuenta con señalización y condiciones adecuadas para el desplazamiento de los vehículos.

De acuerdo con lo anterior, se aplicó un análisis de estabilidad en cada punto crítico seleccionado, permite combinar el modelo cinemático desarrollado por Moreno (2017), con las geometrías del punto crítico y las características del vehículo pesado seleccionado, y de esta forma obtener la velocidad segura con la que un vehículo pesado deba tomar la curva. Esto permite reducir el riesgo de accidente por volcamiento, las pérdidas humanas, las pérdidas económicas, entre otras. Adicionalmente, con este trabajo se puede contribuir con el desarrollo y mejoramiento de la señalización vial en la región.

Cabe agregar que, con el desarrollo de esta investigación, también se verán beneficiados los siguientes entes:

- Los propietarios y conductores de los vehículos pesados, debido a que el accidente por volcamiento o salida de la vía, se generan daños materiales como pérdida de la carga transportada, averías generales de los vehículos que intervienen en el accidente, ya sea el vehículo pesado o algún otro vehículo que se vea involucrado.
- Los usuarios de la vía, ya que podrán transitar con mayor seguridad por ella.
- Las empresas aseguradoras, ya que tiene que retribuir y reparar todos los daños humanos y materiales que se presenten.
- Los propietarios o proveedores de la carga transportada, ya que en algunas situaciones la carga se pierde totalmente, o no puede llegar en un tiempo determinado para cumplir con ciertas solicitudes.
- Los entes de salud, los cuales no tendrán que gastar recursos importantes en la salud de las personas heridas por este tipo de accidentes.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el riesgo de accidentalidad por volcamiento de vehículos pesados mediante un modelo cinemático tridimensional, en la vía Cúcuta-Pamplona.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio estadístico para determinar los puntos críticos de accidentalidad en la vía Cúcuta - Pamplona.
- Definir los parámetros geométricos de la vía en los puntos críticos para accidentes de volcamiento en la vía Cúcuta - Pamplona.
- Definir el tipo de vehículo más propenso a accidente de volcamiento.
- Determinar la velocidad segura con la cual el vehículo seleccionado puede transitar por los puntos críticos determinados.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ACCIDENTALIDAD EN COLOMBIA

La seguridad vial en Colombia es uno de los aspectos más preocupantes a nivel nacional debido al incremento de accidentes en los últimos años, además, por su alto impacto social y económico, generando millones de pérdidas económicas en diferentes ámbitos como: pago de seguros de vida, atención médica, rehabilitaciones de pacientes, seguros vehiculares, pérdida de la carga transportada, entre otros. A continuación, se detallan unos aspectos importantes de la accidentalidad en Colombia.

4.1.1 Accidentes de tránsito en Colombia por área geográfica

Según estadísticas suministradas por la CAN (2017) para el año 2016, Colombia registra una disminución del 8.4% comparado con el año anterior, pasando de 217.554 accidentes de tránsito a 199.404, donde la mayor concentración de estos se dio en el área urbana con un total de 175.475, mientras que en el área rural fue de 23.929 accidentes. En términos porcentuales, al área urbana representó un 88% contra un 12% del área rural.

4.1.2 Accidentes de tránsito por cada cien mil habitantes

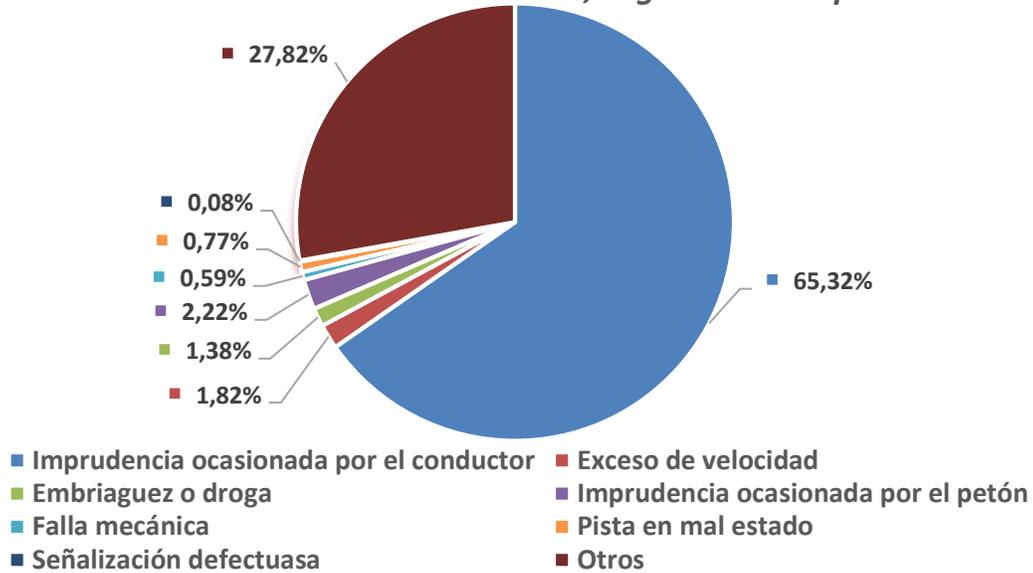
Para el año 2016, los accidentes de tránsito por cada cien mil habitantes en Colombia tuvieron una disminución de 42,2 accidentes de acuerdo con los registros del año anterior, pasando de 451,3 en el año 2015 a 409.1 en el año 2016. Cabe agregar que Colombia tuvo una disminución de 12,7 accidentes por cada cien mil habitantes en los últimos diez años.

4.1.3 Causas de los accidentes de tránsito

En el año 2016, la imprudencia ocasionada por el conductor fue la principal causa de los accidentes de tránsito en Colombia, con un total de 130.250 accidentes, representando el 65.32% del total de los accidentes para este año. Para el 27.82% de los accidentes no se conoció la causa principal que lo produjo. La siguiente causa más frecuente fue el exceso de velocidad que tuvo 3.630 accidentes y represento el 2% del total. La Figura 1. *Accidentes de tránsito en Colombia, según causas aparentes*. describe todas las causas que produjeron los accidentes de tránsito.

Figura 1. Accidentes de tránsito en Colombia, según causas aparentes.

Accidentes de tránsito en Colombia, según causas aparentes



Fuente. Adaptado de CAN (2017).

4.1.4 Muertos y heridos en accidentes de tránsito

En el año 2016, Colombia presentó 45.230 personas heridas en accidentes de tránsito, esta cifra tuvo una reducción del 1.2% con respecto al año anterior. En el periodo 2007 - 2016 los heridos por accidentes de tránsito en Colombia tuvieron una tasa de incremento del 1,2%, al pasar de 44.702 personas en el 2007 a 45.230 en el 2016. Al mismo tiempo se estableció una tasa de 92,8 personas heridas por cada 100 mil habitantes para el año 2016, lo que representó una reducción del 2.3% con respecto al año 2015.

Colombia tuvo un incremento del 4.8% en el año 2016 con respecto al año anterior, con relación al número de muertos por accidentes de tránsito. Al pasar, de 6.831 en el 2015 a 7.158 en el 2016. Entre los años 2007 y 2016, las personas fallecidas por accidentes de tránsito tuvieron una tasa de incremento anual de 2.7%, la más alta comparada con los países que conforman la comunidad Andina. Esto representa pérdidas económicas muy altas para las empresas aseguradoras de vehículos en el país.

4.2 ESTABILIDAD EN LOS VEHÍCULOS

El vuelco o volcamiento de un vehículo según Melo (2008), se experimenta cuando este toma una curva a altas, medias o bajas velocidades o realiza diferentes maniobras para evadir imprevistos que se presenten en una carretera (como huecos, obstáculos, personas etc.), esto hace que la aceleración lateral del vehículo supere el umbral del volcamiento, produciendo un

giro inesperado respecto a su eje longitudinal de 90° o más del vehículo o algún lado de su carrocería coincide con el suelo (como se observa en la Fig. 2).

Figura 2. Accidente por volcamiento de un vehículo pesado.



Fuente. Colfecar (2018)

De acuerdo con lo anteriormente descrito, existen dos tipos de volcamientos:

4.2.1 Volcamientos impredecibles.

Son aquellos en los cuales el conductor realiza una maniobra direccional para evadir posibles imprevistos en la vía, ya sea un peatón, objeto, vehículo u animal, o es impactado por otro vehículo causando el volcamiento como se muestra en la Fig. 3.

Figura 3. Volcamiento impredecible.



Fuente. Vanguardia (2019)

4.2.2 Volcamientos predecibles.

Son los accidentes que se presentan cuando los vehículos toman una curva, en donde influyen ciertos factores como los declives longitudinales y laterales, las condiciones del vehículo y el exceso de velocidad, causando el volcamiento del vehículo como se observa en la Fig. 4.

Figura 4. Volcamientos predecibles.



Fuente. Vanguardia (2019)

Esta investigación se basa en accidentes predecibles para los cuales se desarrolló el modelo desarrollado por Moreno (2017).

4.3 ESTABILIDAD DE VEHÍCULOS PESADOS

La estabilidad lateral de los vehículos está relacionada directamente con SRT (umbral de vuelco estático). Este es uno de los parámetros más importantes para determinar la estabilidad, ya que depende de la aceleración lateral máxima (a_y) y de la ubicación del centro de gravedad (CG) del vehículo. Este parámetro depende de la fuerza centrífuga que se presenta cuando un vehículo toma una curva.

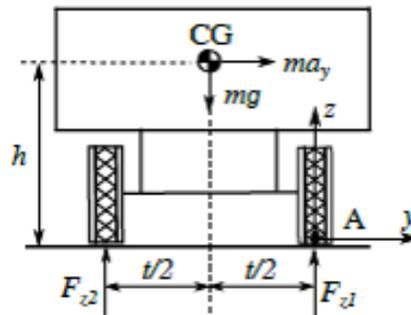
En este sentido, los vehículos que presentan mayor aceleración lateral son los bólidos de la fórmula 1, que podrían tener aceleraciones de 5g o superiores, debido a las altas velocidades con que toman las curvas de la pista. Para un automóvil su SRT varía entre 1g y 1.5g, estos automóviles a diferencia de los vehículos de carga pesada se deslizan antes de presentar el vuelco. Lo que no sucede con los vehículos pesados cargados, donde su SRT varía de 0,4g a 0,6g. Por lo tanto, inmediatamente experimentan aceleraciones superiores a ese rango, los neumáticos laterales internos pierden la adherencia con la carretera, y automáticamente se inicia el volcamiento. Una vez iniciado el volcamiento no hay forma de controlarlo o evitarlo.

Para la evaluación de la estabilidad de los vehículos pesados se desarrollaron modelos cinemáticos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) teniendo cuenta las características de la vía y del vehículo. Uno de los primeros modelos bidimensionales fue el modelo rígido como lo indica la Fig. 5. (no se tiene en cuenta las características del vehículo y la vía) desarrollado por Gillespie (1992), que parte de un vehículo rígido apoyado sobre dos ruedas,

que se mueve a lo largo de una carretera idealmente plana y horizontal y en el que todas las rigideces totales unidas entre sí son infinitas, de modo que el número de grados de libertad $M = 2$, correspondiente a la traslación lateral y al viraje.

En cada eje, las fuerzas en los puntos de contacto de la rueda contrarrestan la fuerza inercial lateral que actúa en el centro de gravedad del vehículo, dando como resultado un momento de balanceo. Teniendo en cuenta todas las fuerzas que se ejercen sobre el vehículo, se realiza la sumatoria de momentos en el punto de contacto de la rueda externa a la curva, en este caso en el punto A, de donde se obtiene:

Figura 5. Modelo de vehículo rígido



Fuente. Moreno (2017)

$$\sum M_A = mg * \frac{t}{2} - ma_y h - F_{z_2} t = 0 \quad (4.1)$$

Donde, a_y es la aceleración lateral que actúa en el centro de gravedad del vehículo, g es la aceleración de la gravedad, m es la masa del vehículo, h es la altura del CG, t es la trocha del vehículo y F_{z_i} es la carga normal del neumático, la cual se distribuye uniformemente en ambas ruedas como se observa en la Fig. 5,

$$F_{z_1} = F_{z_2} = \frac{1}{2} mg \quad (4.2)$$

Lo que implica que las cargas normales en los neumáticos son iguales. La carga inicial de los neumáticos se define como: $F_{z_i}^{inicial}$

$$F_{z_1}^{inicial} = F_{z_2}^{inicial} = \frac{1}{2} mg \quad (4.3)$$

Observando lo anteriormente dicho, a medida que la carga del neumático F_{z_1} aumenta, disminuye la carga en la misma cantidad en el neumático F_{z_2} .

$$F_{z_1} = F_{z_1}^{inicial} + \Delta F_z; F_{z_2} = F_{z_2}^{inicial} - \Delta F_z \quad (4.4)$$

En el límite de vuelco, la carga se transfiere totalmente de un lado al otro del vehículo, haciendo que la transferencia de carga ΔF_z sea igual a:

$$\Delta F_z = \frac{1}{2} mg \quad (4.5)$$

Visto de otra forma, la transferencia lateral de carga o Lateral Load Transfer – *LLT* por su nombre en inglés, es un indicador de estabilidad y determina la proporción de carga normal que se transmite de un lado a otro del vehículo en una maniobra temporal.

$$LLT = \frac{F_{z1} - F_{z2}}{F_{z1} + F_{z2}} \quad (4.6)$$

En la condición límite de vuelco (cuando la aceleración lateral es máxima) la fuerza F_{z2} tiende a cero al perder contacto con el suelo y el factor *LLT* se hace uno (1), aplicando esta teoría en la Ec. (4.1) se tiene que el factor de estabilidad en dos dimensiones (SRT_{2D}) para el modelo rígido de un vehículo es:

$$SRT_{2D} = \frac{a_y}{g} = \frac{t/2}{h} \quad (4.7)$$

Como se observa en esta ecuación, el factor de estabilidad depende de la máxima aceleración lateral que se aplica en el centro de gravedad del vehículo antes de iniciar el proceso de volcamiento.

A través de los años, se fueron teniendo en cuenta e introduciendo más características del vehículo y de la carretera para determinar el factor de estabilidad (SRT), por ejemplo, en el modelo de Chang (2001), se tiene en cuenta el ángulo de bancada o de declive lateral de la vía en el cálculo del factor, en el modelo de Winkler et al., (1992), se estudia la influencia de la suspensión y los neumáticos en la ubicación lateral y vertical de centro de gravedad (CG), y en el modelo de Rill (2011), se incluyen la rigidez de la suspensión y de los neumáticos en el cálculo del factor de estabilidad.

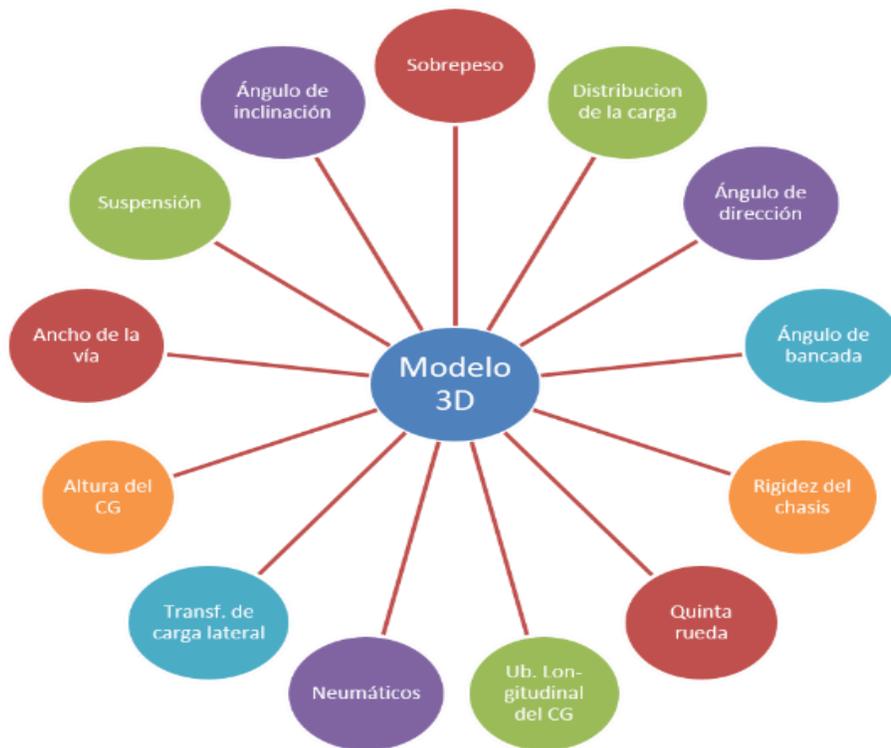
Aunque la mayoría de los modelos de estabilidad fueron desarrollados en 2D, también se desarrollaron modelos tridimensionales. El modelo de Gillespie (1992), toma en cuenta la rigidez de la suspensión trasera y delantera para determinar el eje de rotación del vehículo. Navin (1992), en su modelo definió que el remolque es la unidad más crítica de un tractocamión, y definió un eje de balanceo virtual (o de rotación) que va desde el eje de la quinta rueda hasta el punto de contacto del neumático trasero exterior del remolque con la pista.

Los autores Rill (2011), Winkler (2000) y Zhou y Zhang (2013), afirmaron que el chasis presenta rigidez torsional significativa y que la unidad tractora y el remolque se comportan de forma casi

independiente, además, Kamnik et al., (2003), afirma que la transferencia lateral de carga es diferente para los ejes traseros y delanteros del remolque.

De acuerdo con la descripción anterior de los modelos 2D y 3D, Moreno (2017), afirma que la estabilidad de los vehículos pesados no se debe desarrollar como un modelo bidimensional, este debe ser un modelo tridimensional que reúna las principales características del vehículo (suspensión, neumáticos, quinta rueda, rigidez del chasis) y de la vía (ángulo de inclinación longitudinal y ángulo de inclinación transversal) como se observa en la Fig. 6.

Figura 6. Características del modelo tridimensional.



Fuente. Adaptado de Moreno (2017)

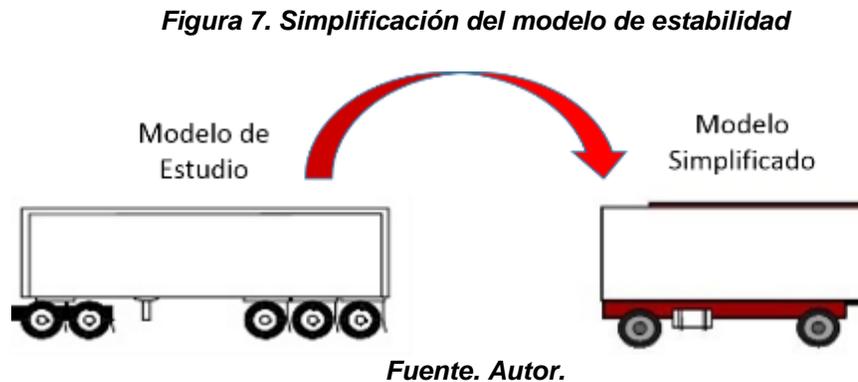
Otro factor que tiene gran influencia en la estabilidad de los vehículos pesados es la distribución de las cargas y la sobrecarga, ya que puede afectar la fuerza que actúan sobre el vehículo. Nzta (2008), para el modelo utilizado en esta investigación, asumió que el vehículo tiene una distribución de carga normal.

4.4 MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL

De acuerdo con Melo (2004); Rempel (2001), los vehículos articulados son propensos a experimentar un fenómeno denominado amplificación hacia atrás (Rear Amplification), el cual

hace que el remolque este sometido a una aceleración lateral elevada en comparación con el tractor, lo cual facilita el volcamiento del vehículo y hacen del remolque la unidad crítica del vehículo y la seleccionada para analizar el fenómeno de volcamiento de este.

Teniendo en cuenta estos aspectos, Moreno (2017) desarrollo el modelo de estabilidad de un remolque de 5 ejes (Fig. 7), el cual se simplifico para facilitar su modelamiento y se utilizaron dos ejes equivalentes.

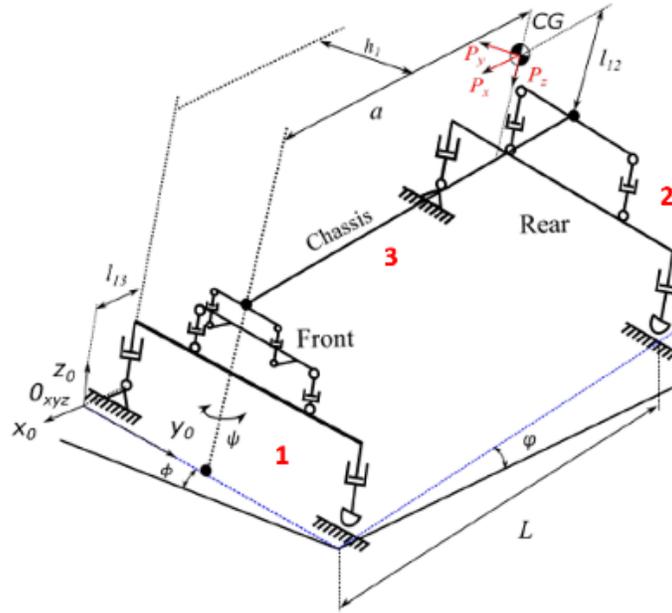


Según Moreno (2017), el SRT depende de la ubicación del centro de gravedad, la cual es influenciada por los neumáticos, la suspensión, la quinta rueda y el chasis; y de las características de la vía, como las inclinación lateral y longitudinal de esta, lo cual afecta la distribución de carga del vehículo.

El modelo tridimensional desarrollado por Moreno (2017) y que se utilizó como base principal en esta investigación y que describe el modelo simplificado de la Fig. 7, está conformado por tres mecanismos como se observa en la Fig. 8.

- El primer mecanismo representa la parte delantera del remolque y está compuesto por sub-mecanismos que representan los neumáticos, la suspensión y la quinta rueda.
- El segundo mecanismo constituye la parte trasera del remolque y está conformado por sub-mecanismos que representan los neumáticos y la suspensión.
- Y el tercer mecanismo representa la estructura del vehículo (chasis), que conecta la parte trasera y delantera del remolque.

Figura 8. Modelo cinemático tridimensional



Fuente. Moreno (2017)

Donde:

l_{13} = Distancia entre la quinta rueda y el eje delantero.

l_{12} = Altura del centro de gravedad desde el chasis.

a = Distancia desde el eje delantero al centro de gravedad.

L = Distancia entre ejes del remolque.

$P_{x,y,z}$ = Fuerzas que actúan sobre el centro de gravedad en los ejes X longitudinal, Y lateral y Z vertical respectivamente.

Para el desarrollo de la estática y la cinemática del modelo desarrollado, Moreno (2017), utilizo una técnica denominada el método de Davies, con la cual determinó el factor de estabilidad en tres dimensiones (3D) de un remolque (Ec. (4.8)), esta ecuación es más completa, ya que toma en cuenta todas las características descritas de otros modelos y adicionalmente agrega el sobrepeso y las características de la vía, lo que permite obtener una mejor representación del vehículo pesado y valores de estabilidad más cercanos a la realidad.

$$SRT_{3D\psi\phi\varphi} = \frac{a_y}{g} = \frac{h_1 \cos \varphi + h_2 e \cos \varphi}{h_2 - (h_1 + P_1)e} * \left(1 - \frac{t_1 F_{z3} \cos \psi + P_1 (F_{z17} - W \cos \phi \cos \varphi)}{W \cos \phi (h_1 \cos \varphi + h_2 e \cos \varphi)} \right) \quad (4.8)$$

Donde:

h_1 : Distancia lateral del CG (m)
 h_2 : Alturas del CG (m)
 e : Tangente del ángulo de bancada (%)
 P_1 : Variable del sistema
 F_{z3}, F_{z17} : Fuerzas de apoyo del vehículo (N)
 W : Peso del vehículo o remolque(N)
 t_1 : Longitud lateral de los apoyos del vehículo (m)
 ϕ : Ángulo de declive lateral (%)
 φ : Ángulo de declive longitudinal (%)
 ψ : Ángulo de remolque/remolque (°)

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1 ENCUESTAS.

Con el fin de obtener información más detallada sobre la accidentalidad de la vía, se realizó una encuesta de accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta - Pamplona (ver Anexo 1), aplicada a 100 usuarios frecuentes de la vía (Tabla 1), los cuales conocen de primera mano los pormenores de esta.

Tabla 1. Usuarios de la vía.

Personas encuestadas	Cantidad
Conductores de vehículos pesados	40
Conductores de servicio público	40
Personas que viven o trabajan en la vía	20
Total, encuestados	100

Fuente. Autor.

Estas encuestas fueron aplicadas a los conductores de vehículos pesados (tracto-camiones), que se ubicaron en los diferentes paraderos o estacionamientos de descanso que están sobre la vía, a los conductores de servicio público (buses, busetas, taxis) en el terminal de transporte de la ciudad de Pamplona y a las personas que viven o que trabajan en la vía (personas encargadas del mantenimiento de la vegetación aledaña a la vía, policías de tránsito y transporte, personas que tienen su casa cerca de la vía).

Además, se tuvo en cuenta información suministrada por la Policía de Tránsito y Transporte, seccional Norte de Santander, Policía Nacional (2018) que indica que la accidentalidad de vehículos pesados en relación con volcamiento y salida de la vía Cúcuta – Pamplona (Ruta 55), entre los años 2010 y agosto del 2018 es de 25 accidentes. De acuerdo con los relatos aportados, en estos accidentes se observan consecuencias como muertos, heridos, daño de los vehiculó, pérdidas de mercancía y cierres de la vía, pero no hay cifras concretas o exactas de cada uno de estos efectos.

Adicionalmente, se puede manifestar que, en estos accidentes, las causas probables fueron: exceso de velocidad del vehículo, falta de pericia del conductor, fallas mecánicas, adelantar en curva, o cansancio del conductor.

Según los datos aportados por la Policía Nacional (2018), los puntos críticos de accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona son:

- Kilómetro 71+280 denominado la curva de los Adioses,
- Kilómetro 84+300 denominado las S antes de las Cocalinas,
- Kilómetro 85+450 denominado las Cocalinas,

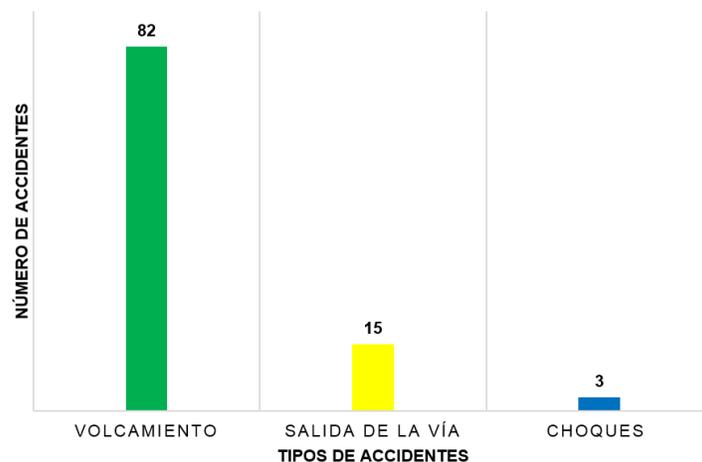
- Kilómetro 98+060 denominado el Diamante,
- Kilómetro 109+600 denominado la Donjuana.

El kilómetro característico de cada punto crítico es tomado con referencia de la vía Presidente – Pamplona – Cúcuta, donde Presidente (vía Málaga, Santander) es el kilómetro 00+000 metros, la entrada a Pamplona es el kilómetro 70+200 metros y Cúcuta es el kilómetro 131+500 metros (Policía Nacional, 2018).

Sin embargo, y debido a que muchas veces los accidentes no son reportados o no se tiene registro de ellos, no se cuenta con una estadística detallada que permita identificar los puntos de mayor riesgo para los vehículos pesados, se optó por aplicar la encuesta de accidentalidad.

La primera pregunta de esta encuesta indaga sobre el tipo de accidente más frecuente de los vehículos pesados que transitan esta vía, la Fig. 9. muestra que los accidentes relacionados con la estabilidad de los vehículos pesados como lo son el volcamiento con un 82% de los encuestados y la salida de la pista con un 15% son los más frecuentes.

Figura 9. Tipos de accidentes más frecuentes en la vía Cúcuta - Pamplona.



Fuente. Autor.

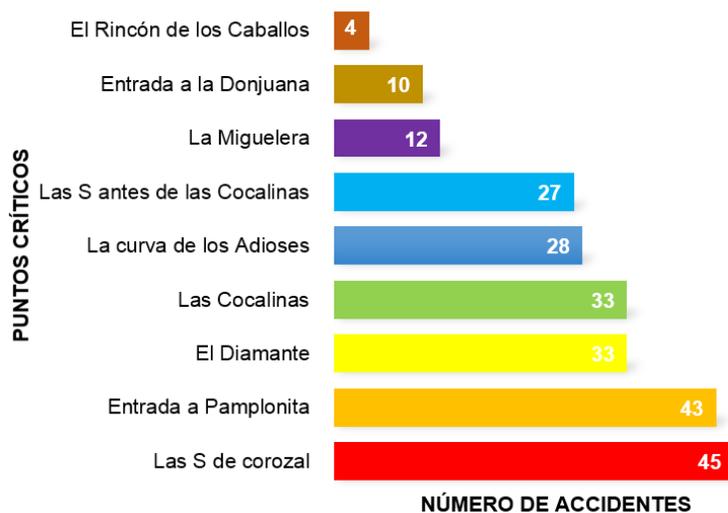
5.2 PUNTOS CRÍTICOS DE ACCIDENTALIDAD

Otro aspecto importante en la presente encuesta fue detallar los puntos críticos de la vía, se determinaron nueve puntos críticos con riesgo de accidentalidad por volcamiento y salida de la vía (Fig. 10.), siendo los puntos críticos con mayor peligrosidad para los usuarios de la vía, la S de Corozal, la entrada a Pamplonita, El Diamante y las Cocalinas, de los cuales algunos coinciden con los indicados por la Policía de Tránsito y Transporte y hay otros que también representan especial cuidado como:

- Kilómetro 81+000, denominado La Entrada a Pamplonita,

- Kilómetro 84+550, denominado El Rincón de los Caballos,
- Kilómetro 87+220, denominado La Miguelera,
- Kilómetro 123, denominado las S de Corozal.

Figura 10. Puntos críticos de accidentalidad de la vía Cúcuta – Pamplona.



Fuente. Autor.

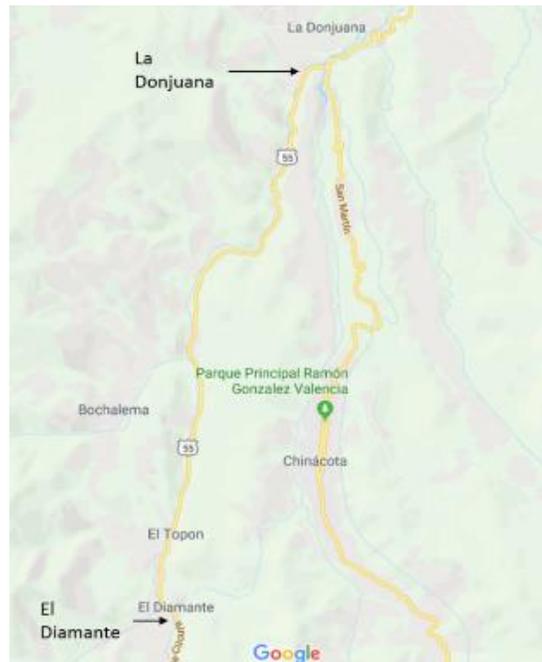
Las Figs. 11, 12, 13 y 14, muestran la ubicación sobre la vía Cúcuta – Pamplona de los nueve puntos críticos determinados por la encuesta y la información aportada por la policía de tránsito y transporte.

Figura 11. Puntos críticos las S de Corozal 1 y 2 de la vía Cúcuta – Pamplona.



Fuente. Google Maps (2019)

Figura 12. Puntos críticos la Donjuana y el Diamante de la vía Cúcuta – Pamplona.



Fuente. Google Maps (2019)

Figura 13. Puntos críticos la Miguelera, las Cocalinas, las S antes de las Cocalinas 1 y 2 y el Rincón de los caballos de la vía Cúcuta – Pamplona



Fuente. Google Maps (2019)

Figura 14. Puntos críticos Pamplonita y los Adioses de la vía Cúcuta – Pamplona



Fuente. Google Maps (2019)

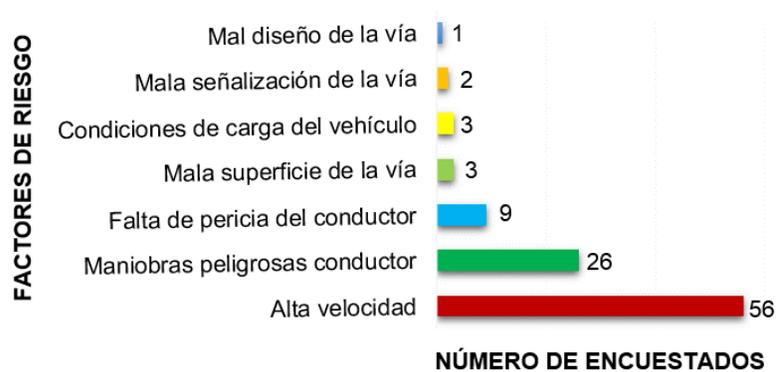
De acuerdo con los usuarios de la vía, estos trayectos requieren de especial cuidado por parte de los conductores, ya que se demanda de altas disminuciones de velocidad en pequeños trayectos y alta pericia de los conductores al transitar por ellos. Estos aspectos son más críticos cuando por estas vías transitan conductores nuevos, los cuales argumentan que la señalización vial no es la adecuada para la peligrosidad que estos puntos representan con relación a este tipo de vehículos.

Posterior a ello, se pretendía encontrar que factores de riesgo tienen mayor influencia en la accidentalidad de vehículos pesados, y se observó que la alta velocidad para tomar una curva es la que presenta mayor frecuencia como lo describe la Fig. 15.

Los encuestadores afirmaban que las altas velocidades se debían a la señalización incorrecta en estos trayectos, lo que conlleva tomar estas curvas sin mayor precaución y a su vez ocasionar accidentes. También deducían, que en la mayoría de los casos la alta velocidad iba acompañada de maniobras peligrosas del conductor cuando desconocía la vía e intentaba evitar los accidentes.

Otro factor determinante es la falta de pericia del conductor al afrontar cada punto crítico, debido a que estos vehículos requieren un mayor espacio para transitar por su longitud y pueden generar molestias a otros usuarios de la vía (Güemez, 2013).

Figura 15. Factores de riesgo que influyen en la accidentalidad de vehículos pesados.



Fuente. Autor.

Otro factor importante a la hora de estudiar los accidentes de tránsito son las causas que lo producen, ya que de esta forma se pueden buscar soluciones que ayuden a disminuirlos o eliminarlos.

Según García et. al., (2012), estas causas pueden ser analizadas con tres momentos fundamentales: problemas evidentes que requieren un estudio superficial, problemas semiprofundos que necesitan un poco más de investigación y los problemas profundos en donde se evalúa desde el más mínimo detalle para encontrar su causa final.

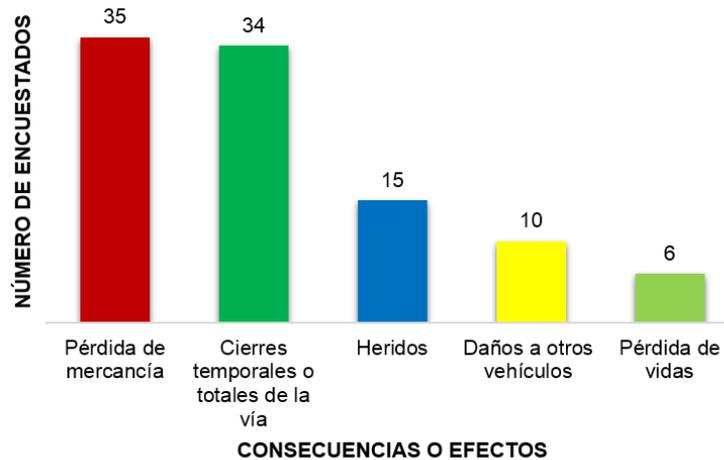
Cuando se inició la búsqueda de la información de accidentalidad en esta vía, se observó que todos los accidentes son tratados como estudio superficial, es decir, que su investigación no era a fondo, lo que conlleva al desconocimiento de sus causas reales y a la falta de registros actualizados con su detallada información, por esta razón, se optó por desarrollar este estudio de accidentalidad.

Según Güemez (2013), uno de los aspectos que podrían estudiarse para esclarecer las causas del accidente es el estudio del comportamiento dinámico del vehículo, condiciones de este, condiciones de la vía, entre otros.

En la actualidad los accidentes de vehículos pesados no son frecuentes en esta vía, pero son de especial interés las diferentes consecuencias o efectos que causan. En la Fig. 16, se observa que la principal consecuencia que presentan estos accidentes es la pérdida de mercancía, sin dejar de lado los heridos ni las pérdidas humanas.

Las pérdidas de la mercancía afectan económicamente a los propietarios de la carga transportada, los consumidores o clientes finales de los productos, los conductores de vehículos pesados que deben en algunas ocasiones responder por los daños causados tanto del vehículo como de la carga transportada y por último las empresas aseguradoras de los vehículos.

Figura 16. Consecuencias o efectos que producen los accidentes.



Fuente. Autor.

Otra consecuencia que afecta en gran proporción son los cierres temporales o totales de las vías, ya que perjudican la movilidad de los demás usuarios que transitan por la vía y a su vez retrasa los tiempos de llegada a sus destinos.

La pérdida de vidas es una consecuencia de gran importancia debido a que los accidentes de tránsito son uno de los principales responsables de los índices de mortalidad en Colombia, según el Ministerio de Salud MinSalud (2015), ocupando el segundo lugar, con un porcentaje del 18,81% de la totalidad de las muertes en el año 2014. El primer puesto de mortalidad lo ocupan las agresiones (homicidios).

En algunos casos los accidentes pueden ocasionar daños a otros vehículos, que a su vez pueden causar heridos y muertos, esto disminuye la seguridad vial de las personas que transitan por la vía.

Grislis (2010) asegura que todas estas consecuencias ocasionadas por accidentes de vehículos pueden reducirse si:

1. Se conduce de forma adecuada respecto a las condiciones de carga, diseño geométrico de las carreteras, parámetros técnicos de los vehículos, condiciones climáticas y condiciones superficiales la vía.
2. Todas las personas que transitan en la vía siguen a cabalidad las señales de tránsito y conducen con prudencia y precaución.

5.2.1 Medición de los puntos críticos.

Una vez obtenida la información suministrada por la Policía de Tránsito y Transporte, y realizado el estudio estadístico, se procedió a medir los diferentes parámetros geométricos de

la vía (Fig. 17), en los puntos críticos seleccionados se determinaron las siguientes características: ancho de la vía, ángulo de pendiente transversal, ángulo de pendiente longitudinal y radio de la curva, como se describe la Tabla 2, mediante una estación topográfica.

Figura 17. Medición de los puntos críticos.



Fuente. Autor.

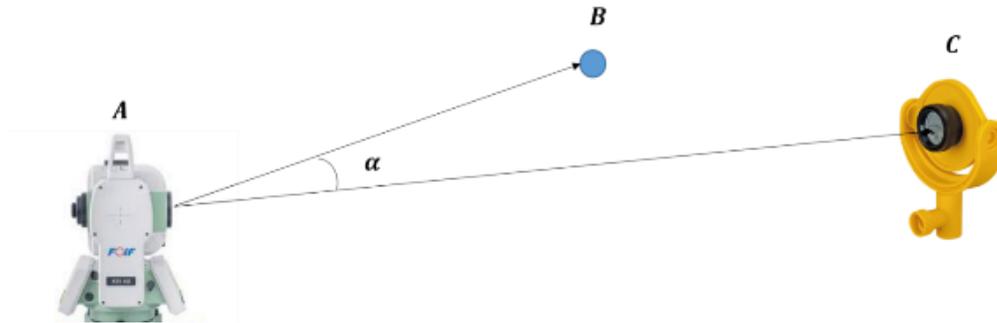
Al momento de hablar de topografía es necesario tener en cuenta algunos conceptos fundamentales que ayudaran a entender de manera más clara el tema que se va a tratar. Estos conceptos son:

Ángulos horizontales o ángulo de pendiente transversal (α).

Es un ángulo formado por dos líneas rectas trazadas sobre el suelo, que se mide horizontalmente. Las líneas trazadas sobre el suelo se pueden reemplazar con dos líneas visuales AB y AC. Donde A es el ojo del observador (estación topográfica), C es el prisma donde la estación toma la ubicación del punto y B es norte arbitrario para encontrar la posición relativa de los puntos.

Estas líneas visuales parten del ojo del observador (estación topográfica) que constituye el vértice A del ángulo BAC, y se dirigen hacia los puntos a levantar de la vía como lo indica la Fig.18. (FAO 2019).

Figura 18. Ángulo de pendiente transversal (α).



Fuente. Adaptado de UNSJ (2019)

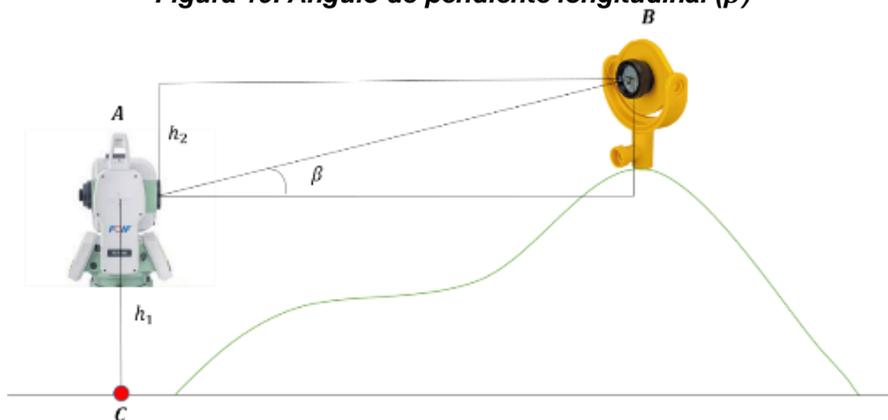
Ángulo de pendiente longitudinal (β).

Es el ángulo formado por dos rectas situadas en el plano vertical, o sea entre un punto bajo y dos puntos más elevados. Dado que estos ángulos están situados en el plano vertical, las líneas rectas que constituyen sus lados generalmente son líneas visuales.

El ángulo vertical está formado por la visual AB que comienza en la estación topográfica A, y se dirige hacia el prisma B que está ubicado en un sitio determinado (punto sobre la vía) con respecto a una horizontal. La visual AC parte de la estación A toma como referencia el punto C que está situado debajo de A al nivel del terreno o la vía, para facilitar los cálculos de la altura del punto B y por diferencias de alturas entre estos dos puntos encontrar el ángulo vertical como se observa en la Fig. 19. (FAO 2019).

Los ángulos horizontales y verticales en general se expresan en grados. Un círculo completo se divide en 360 grados.

Figura 19. Ángulo de pendiente longitudinal (β)



Fuente. Adaptado de FAO (2019).

Para obtener los datos necesarios del modelo cinemático tridimensional, se realizó un levantamiento topográfico de radiación para cada punto crítico seleccionado, mediante el siguiente procedimiento:

1. Se situó la estación total en un punto en el cual era posible ver toda la curva y se tomó su ubicación geográfica por medio de un GPS.
2. Se procedió a nivelar la estación total y configurar el equipo.
3. Se ubicó el Norte de forma arbitraria debido que la sección a medir no era continua.
4. Luego se situó el prisma en el punto de inicio de la medición, procurando que esté en la misma dirección de la estación.
5. El operador de la estación debe dirigir la visual del equipo con el prisma, tratando de encontrar el centro del prisma y una vez que se haya visado se procede a hacer la lectura del punto.
6. Posterior a ello, se inicia con la medición del primer punto, donde la estación emite una señal EMD (Medición Topográfica de distancias), que se refleja en el prisma y vuelve a la estación, permitiendo de esta forma encontrar la distancia a la que se encuentra dicho punto mediante el tiempo que tarde en ir y regresar dicha señal. Este punto es guardado en la memoria del equipo.
7. De igual manera se hace la medición de los demás puntos, que fueron tomados cada dos metros, encontrando así las coordenadas y alturas de las líneas de división (líneas blancas y amarilla) de la curva (perfiles de cada punto crítico).

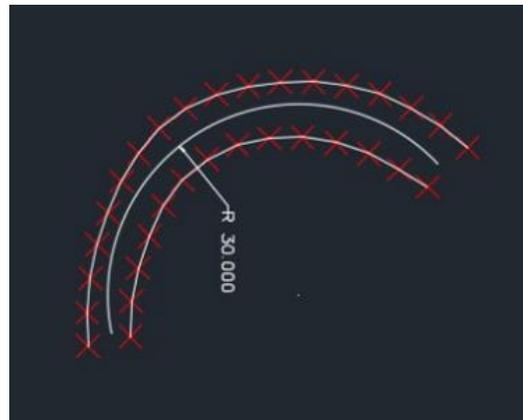
Una vez obtenidos los datos de las coordenadas y alturas de las líneas divisorias de las curvas, se modelaron mediante software AutoCAD Civil 3D, en el cual se dibujó cada una de las curvas como se observa en la Fig. 20, y de esta forma obtener los datos requeridos para el estudio como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Características geométricas de los puntos críticos.

Punto crítico	Ángulo de inclinación lateral Máxima (inl₁) (%)	Ángulo de inclinación longitudinal Máxima (inlo₁) (%)	Radio de la curva (m)
Corozal 1	12.56	7.17	34
Corozal 2	14	7.6	47.291
La Donjuana	9.5	3.85	78.95
El Diamante	9.3	7.8	56.2
La Miguelera	7.9	8.42	36.8
Las Cocalinas	10.25	7.96	82.3
Antes de las Cocalinas 1	12.4	6.87	13.8
Antes de las Cocalinas 2	7.25	7.4	24.6
El Rincón de los Caballos	10.3	3.8	30
Pamplonita	7.9	5.3	33.8

Fuente. Autor.

Figura 20. Modelamiento de la curva en AutoCAD Civil 3D

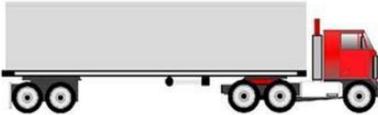


Fuente. Autor.

5.3 VEHÍCULO CRÍTICO

Otro aspecto importante para el presente trabajo fue determinar el tipo de vehículo pesado de carga con mayor incidencia o probabilidad de accidentes de la vía Cúcuta – Pamplona. La encuesta desarrollada determinó que el vehículo más propenso a los accidentes es el tracto-camión con el 87% de incidencia, como lo indica la Tabla 3.

Tabla 3. Tipo de vehículos pesados que presenta mayor accidentalidad.

Tipo de vehículo	Porcentaje (%)
Tractocamión de 5 o 6 ejes	
	87
Camión de 2 o 3 ejes	
	13
	

Fuente. Autor.

5.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL

Una vez definidos los parámetros geométricos de los puntos críticos de la vía (Tabla 2) y las características del vehículo pesado Figs. 21, 22 y 23, se realizaron los respectivos análisis de estabilidad y se determinaron los valores del SRT de cada uno de estos, debido a que cada punto crítico consta de características diferentes (declive longitudinal y lateral) con respecto a otro.

Adicionalmente, para el vehículo se utilizaron los siguientes parámetros de los sistemas mecánicos de este (Moreno, 2017):

Tabla 4. Parámetros del tractocamión

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Altura del neumático (l_{01})	0.499	m
Distancia del eje delantero al CG (a)	6.04	m
Distancia del eje delantero al eje trasero (L)	8.55	m
Altura de la suspensión al CG (l_{12})	1.24	m
Trocha del vehículo (t_1, t_3)	1.86	m
Longitud lateral del eje rígido del vehículo (t_2, t_4)	1.86	m
Separación lateral entre los muelles de la suspensión (S_{11})	1.075	m
Separación lateral entre la 5ta rueda y la suspensión (S_1)	0.6	m
Altura de los muelles de la suspensión (l_0)	0.22	m
Rigidez vertical de la suspensión delantera (k_f)	1800000	N/m
Rigidez vertical de la suspensión trasera (k_r)	1800000	N/m
Número de ejes delanteros (n_{ef})	2	
Número de ejes traseros (n_{er})	3	
Peso de vehículo (W)	400000	N
Rigidez vertical del neumático delantero (k_{1f})	840000	N/m
Rigidez vertical del neumático trasero (k_{1r})	840000	N/m
Rigidez vertical de la 5ta rueda (k_1)	4000000	N/m
Desviación de la 5ta rueda (l_{16})	0.215	m
Altura de la 5ta rueda (l_{qr})	0.1	m
Distancia entre la quinta rueda y el eje delantero (l_{13})	0.11	m
Ángulo de giro (tt_{29})	0	%
Transferencia lateral de carga (TLC)	60 o 100	%

Fuente. Autor.

Para calcular el SRT (Ec. (4.8)), se asumió que la carga en el vehículo esta uniformemente distribuida y se aplicó una fuerza de inercia gradualmente hasta que la transferencia lateral de carga en el eje trasero sea completa.

Otro aspecto importante de analizar en esta simulación fue la transferencia lateral de carga TLC, según Woodrooffe et al., (2010) y AASHTO (2001), por normativa el factor de estabilidad

SRT, se debe calcular cuando la transferencia de carga en el eje trasero sea del 60% (TLC = 0.6), debido a que si sobrepasa ese valor, el vehículo se vuelve inestable y tiende a volcarse.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, en la Tabla 5 se muestran los valores del SRT obtenidos para cada uno de los puntos críticos detectados en la vía Cúcuta-Pamplona, con transferencia lateral completa y del 60%.

Adicionalmente para el cálculo de estos factores de estabilidad, se tuvo en cuenta que los vehículos transitaban en bajada, ya que este aspecto hace que la distribución de carga sea diferente, haciendo más liviano el eje trasero, lo cual desfavorece la estabilidad del vehículo.

Tabla 5. Factores de estabilidad (SRT) para las curvas críticas de la vía Cúcuta - Pamplona

Punto Crítico	SRT del tractocamión con 60%	SRT del tractocamión con 100%
	de TLC	de TLC
	Curva	Curva
Corozal 1	0.340469	0.475025
Corozal 2	0.358818	0.491335
La Donjuana	0.307849	0.444444
El Diamante	0.301733	0.434251
La Miguelera	0.285423	0.417941
Las Cocalinas	0.311927	0.446483
Antes de las Cocalinas 1	0.340469	0.472987
Antes de las Cocalinas 2	0.279307	0.411825
El Rincón de los Caballos	0.318043	0.452599
Pamplonita	0.287462	0.422018
Los Adioses	0.336391	0.468909

Fuente. Autor

5.4.1 Cálculo de la velocidad

Finalmente se calculó la velocidad segura con la que el vehículo pesado puede transitar por las curvas seleccionadas sin riesgo de volcamiento o salida de la vía. De la Ecu. 4.8 se tiene que el factor de estabilidad depende de la aceleración lateral, la cual a su vez es función de la velocidad con la cual el vehículo recorre la curva y del radio de esta ($a_y = V^2/r$), por consiguiente, reemplazando se obtiene la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{SRT * r * g} \quad (5.1)$$

Donde:

V = Velocidad segura de tránsito del vehículo en cada punto crítico.

SRT = Umbral de Vuelco Estático del tractocamión en cada punto crítico.

r = Radio de curvatura del punto crítico.

g = Aceleración Gravitacional (9,81 m/s²)

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según el artículo 107 del código nacional de tránsito en Colombia MinTransporte (2002), la velocidad máxima para vehículos de carga en vías nacionales o primarias, no debe sobrepasar los 80 kilómetros por hora (Km/h). A su vez, las autoridades de tránsito deben establecer estos límites en cada departamento, teniendo en cuenta aspectos como tráfico vehicular, condiciones medioambientales, infraestructura vial, estado de las vías, visibilidad, velocidad de diseño y las características de la operación de la vía.

Teniendo en cuenta este aspecto, a continuación, se analizan los resultados obtenidos para cada punto crítico de la vía.

6.1 PUNTO CRÍTICO COROZAL 1 Y COROZAL 2

Los puntos críticos Corozal 1 y 2 (Fig. 11) se caracterizan por un elevado riesgo de accidentalidad por volcamiento, esto se evidencia en la señalización que presenta el tramo: **PRECAUCIÓN, CURVA PELIGROSA**, curva peligrosa a la derecha y a la izquierda, pendiente peligrosa. Así mismo, se tienen reductores de velocidad antes de iniciar la curva (Figs. 24, 25 y 26).

Según lo indicado en la Tabla 5, el factor de estabilidad, teniendo en cuenta la normativa (60% TLC) para el punto crítico Corozal 1, es $SRT = 0.34047$ (como se señala en la Fig. 27), sabiendo que el radio de esta curva es de $r = 34$ metros, de la Ec. (5.1) se obtiene que la velocidad de tránsito para vehículos pesados es de 38,36 Km/h.

Figura 24. Señales de tránsito en el punto crítico Corozal 1



Fuente. Google Maps (2019).

Figura 25. Señales de tránsito en el punto crítico Corozal 2



Fuente. Google Maps (2019).

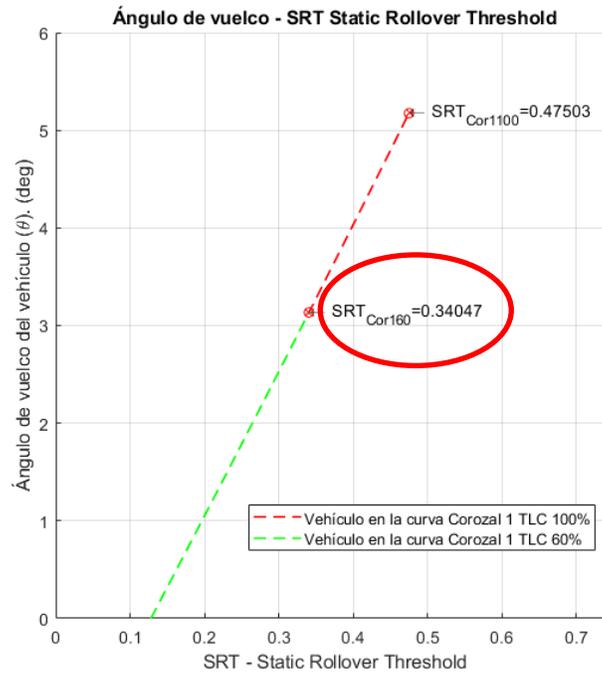
Figura 26. Señales de tránsito en los puntos críticos



Fuente. Google Maps (2019).

De acuerdo con la Fig. 24, la normativa dispuesta por INVIAS (Instituto Nacional de Vías), la velocidad recomendada para este tramo de vía es de 30 Km/h, lo que indica que las velocidades obtenidas mediante el modelo son mayores que las recomendadas, por lo tanto, es una velocidad segura de tránsito para todos los vehículos de estas características que frecuentan esta vía. Muchas veces los accidentes se presentan porque los vehículos pesados violan estos límites de velocidad, o sus configuraciones de carga hacen que el centro de gravedad se ubique muy alto, lo cual favorece el proceso de volcamiento del vehículo.

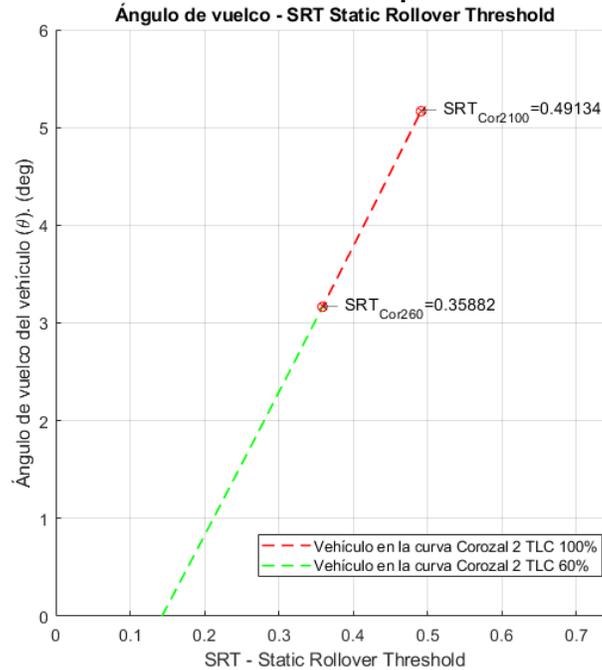
Figura 27. Factor de estabilidad SRT del punto crítico Corozal 1.



Fuente. Autor.

Para el punto crítico Corozal 2 el SRT = 0,35882 (Fig. 28), y con un radio de 47, 291 metros, se obtiene una velocidad de tránsito de 46,447 Km/h.

Figura 28. Factor de estabilidad del punto crítico Corozal 2.



Fuente. Autor.

Los puntos Corozal 1 y Corozal 2 cuentan con una ventaja en asuntos de movilidad, debido a que este trayecto pertenece a la doble calzada y solo transitan vehículos en un sentido. Esta característica favorece al conductor, ya que puede tomar la curva con mayor tranquilidad debido a que no transita a la vez con otro vehículo, tiene mejor visibilidad y en cuestión de concentración, solo debe estar pendiente del vehículo que está delante, reduciendo las maniobras direccionales y de frenado que ocasionan inestabilidad en el vehículo y que pueden causar el volcamiento.

Sin embargo, en la Fig. 29, se observa el volcamiento de una volqueta (vehículo pesado de dos ejes), según los datos reportados, uno de los problemas que posiblemente afectó a este vehículo, (no articulado), fue el transporte de carga sobredimensionada, en este caso carbón, lo cual hace que el centro de gravedad del vehículo se ubicara a gran altura, favoreciendo el fenómeno de volcamiento.

Figura 29. Volcamiento de un vehículo pesado (volqueta) en el punto crítico Corozal 1 - 15 de agosto 2019



Fuente. Autor.

6.2 PUNTO CRÍTICO LA DONJUANA

El punto crítico La Donjuana (Fig. 12), muestra un menor riesgo de accidentalidad por volcamiento, respecto a las características superficiales de la vía, debido a que sus declives son bajos y el ancho de curvatura es grande, como se puede apreciar en la Fig. 30. Pero en materia de señalización, representa gran peligrosidad para los usuarios de la ruta, ya que este

punto solo cuenta con una señal de tránsito que indica curva peligrosa a la derecha y no exterioriza señales de tránsito de velocidad adecuada para tomar la curva.

De acuerdo con la normatividad trabajada y descrita para los puntos anteriores, el STR de este punto es de 0.30785 (Fig. 31) y con un radio de $r = 78,95$ metros, la velocidad de tránsito corresponde a 55.588 Km/h.

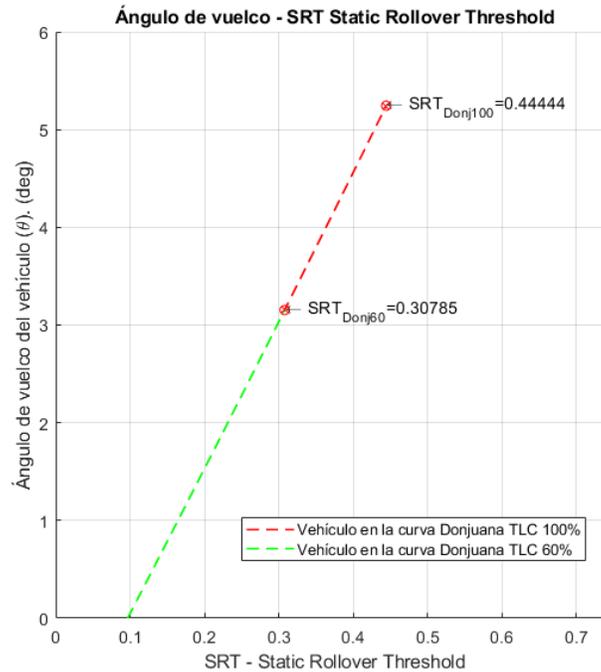
Sin embargo, según el Ministerio de Transporte, para este tramo aplica la normativa de tránsito en vía nacional que es de 80 Km/h. Con lo cual, si se compara con la velocidad calculada para este punto crítico, se sobrepasa en un 31%, lo que denuncia que el trayecto necesita una señal de tránsito que muestre que la velocidad máxima de desplazamiento es de 55 Km/h, ayudando a prevenir la ocurrencia de accidentes por volcamiento.

Figura 30. Punto crítico la Donjuana



Fuente. Autor.

Figura 31. Factor de estabilidad del punto crítico La Donjuana.



Fuente. Autor.

Además, este punto crítico está castigado con poca visibilidad, puesto que al lado de la curva existe una zona montañosa que no permite obtener la visual de los vehículos que se aproximan, provocando grandes riesgos; adicionalmente, al pasar la curva hay varios paraderos de vehículos pesados que incrementan las posibilidades de que el conductor tenga que realizar una maniobra direccional o de frenado en el caso de que un vehículo se encuentre mal estacionado y transite otro vehículo por el carril del lado en ese instante.

La acumulación de estos factores de riesgo hace que el trayecto se vuelva más propenso a la presencia de accidentes por volcamiento y a su vez, represente un mayor peligro para los usuarios de la vía.

6.3 PUNTO CRÍTICO EL DIAMANTE

En el sector El Diamante se encuentra el siguiente punto crítico de la ruta, (ver Fig. 12), este ostenta deficiencias significativas en cuanto a la señalización vial, la cual solo consta de señales de delineación simple que describen el perfil de la curva.

Otra problemática que se observó es la presencia de una vivienda muy cerca de la zona más crítica de la curva (ver Fig. 32). Según la ley 1228 del 2008 (Gobierno Nacional, 2013), la distancia mínima de una zona de exclusión (viviendas o construcciones) es de veinte (20) metros a lado y lado de la vía, que se medirán a partir del eje de cada calzada exterior. Además, esta curva no presenta ningún tipo de protección (barreras metálicas), por lo que, en caso de

accidente, se verían afectados los vehículos que estén transitando por la curva, la vivienda y sus habitantes.

Figura 32. Punto Crítico el Diamante.

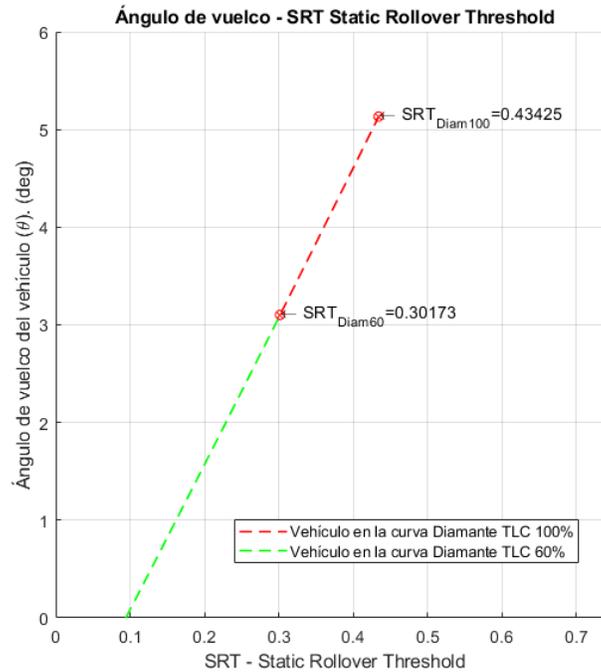


Fuente. Google Maps (2019).

De acuerdo con el procedimiento y normativa ya descrita, con un SRT = 0,30173 (Fig. 33) y un radio de curvatura de 56,2 metros, la velocidad con la cual el vehículo debe transitar por este trayecto es de 46,4319 Km/h.

Cuando no se observa ningún tipo de señalización de indique la velocidad con que un vehículo se puede movilizar, se asume la velocidad establecida por el Ministerio de Transporte de 80 Km/h y comparando con la velocidad calculada, se sobrepasa en un 42%, siendo esta curva altamente proclive a los accidentes por volcamiento. Para contrarrestar esto, se recomienda adecuar la señalización vial que indique que la velocidad máxima de tránsito en este trayecto para vehículos pesados de 46 Km/h.

Figura 33. Factor de estabilidad del punto crítico el Diamante



Fuente. Autor.

Este trayecto presenta una zona de vegetación abundante que no permite visualizar el vehículo que se acerca en sentido contrario, siendo una calzada bidireccional. Esta visual es importante porque hay numerosos conductores imprudentes en la vía, que abarcan más espacio del carril delimitado en la carretera.

Según Choi (2001) el off-tracking (fuera de seguimiento) es el espacio adicional que ocupa el vehículo cuando toma una curva con respecto a su ancho. Se calcula teniendo en cuenta el radio de la curva. El valor encontrado, se suma con el ancho del vehículo pesado y se obtiene el espacio total que abarca el vehículo al tomar dicha curva. El off-tracking, para el vehículo de estudio, cuando presencia la curva a 56,2 metros de radio es de 0,9143 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 3,4141 metros. Este valor es muy cercano al medido en la vía (3,45 metros), lo que indica que el espacio es bastante reducido si se encuentran dos vehículos de las mismas características en el mismo instante. Estos factores de riesgo propician maniobras direccionales y de frenado que pueden repercutir en el volcamiento del vehículo pesado.

De acuerdo con lo anterior, se observa que la vía no cumple con las especificaciones mínimas para la operación segura de los vehículos, traduciéndose esto en altos índices de accidentalidad. Para este trayecto se hace necesario construir sobreechamientos o ensanchamientos, el sobreechamiento se define básicamente como el espacio extra requerido en una trayectoria de giro para la circulación segura de vehículos (Puerto, 2017), cuyo objetivo es minimizar los tiempos de viaje y mejorar la seguridad vial.

6.4 PUNTO CRÍTICO LA MIGUELERA

Con la ausencia de señalización vial, el punto crítico la Miguelera (Fig. 13) representa un gran riesgo de accidentalidad por volcamiento (ver Fig. 34). Este trayecto ostenta una zona de montaña rocosa y un radio de curvatura pequeño, que no permite visualizar el vehículo que se acerca en sentido contrario.

Figura 34. Punto crítico la Miguelera.

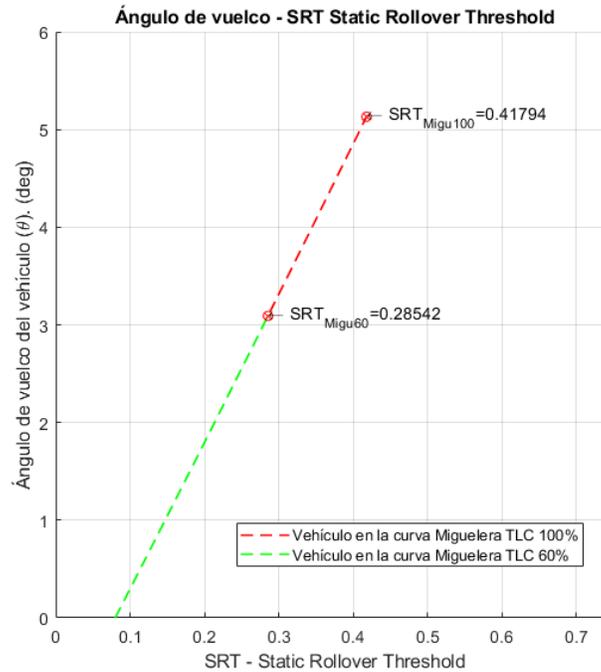


Fuente. Google Maps (2019)

Según lo previamente descrito, se calculó el off-tracking, para el vehículo de estudio cuando presencia esta curva de radio 36,8 metros, en 1,3735 metros. Esto quiere decir que el espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 3,8735 metros. Este valor es mayor al medido en la vía (3.7 metros), lo que indica que el carril por donde transita el vehículo no es el adecuado para que los dos vehículos de las mismas características transiten en el mismo instante, esto hace que un vehículo invada parte de la vía que está destinada para otras funciones (por ejemplo, cunetas). Esta práctica de invasión se hace peligrosa debido a la visibilidad que ofrecen los alrededores de la curva y es propensa a que ocurran maniobras direccionales y de frenado que pueden repercutir en el volcamiento del vehículo. En este trayecto es importante la construcción de sobreechamientos, debido a que la calzada no cuenta con la correcta geometría que permita el alto volumen vehicular y que garantice el correcto desplazamiento de los vehículos.

Ahora bien, el factor de estabilidad para este punto crítico es de 0,28542 (Fig. 35), con un radio de curvatura de 36,8 metros, la velocidad con la cual el vehículo debe transitar por este trayecto es de 36.543 Km/h.

Figura 35. Factor de estabilidad del punto crítico la Miguelera.



Fuente. Autor.

En cuestiones de velocidad, el punto crítico no presenta ningún tipo de señalización dando por entendido, nuevamente, que se puede transitar a la velocidad establecida por INVIAS (80 km/h). Y al comparar con la velocidad máxima de tránsito obtenida, la sobrepasa más del doble. Por su condición de peligro inminente, se aconseja incluir señalización de 36 km/h como velocidad máxima.

6.5 PUNTO CRÍTICO LAS COCALINAS

Presentando grandes deficiencias en cuanto a la señalización vial, el siguiente punto crítico analizado fue Las Cocalinas (ver Fig. 13). Este solo refleja señales de tránsito de delineación simple que describen el perfil de la curva como se observa en la Fig. 36.

No obstante, una ventaja de este trayecto es la presencia de gran visibilidad respecto al vehículo que se acerca en sentido contrario. Esta visual es significativa porque hay muchos conductores imprudentes en la vía que abarcan más espacio que el delimitado en la carretera.

Figura 36. Punto crítico Las Cocalinas

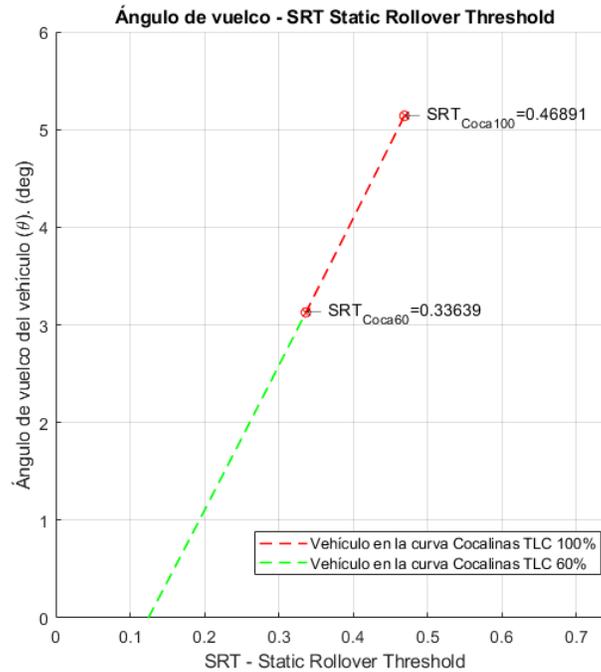


Fuente. Google Maps (2019).

Continuando con la dinámica descrita, el factor de estabilidad para este punto crítico es de 0,31193 (Fig. 37). Si el radio de curvatura es $r = 82,3$ metros, la velocidad segura con la cual el vehículo pesado debe desplazarse por el sector sin ocasionar volcamiento es de $V = 57,132$ Km/h.

En cuestiones de velocidad, este punto crítico presenta gran riesgo de accidentalidad, ya que no presenta ningún tipo de señalización que indique la velocidad de tránsito segura en ese trayecto. Según lo anteriormente descrito, es necesario instalar una señal de tránsito que muestre que la velocidad máxima de desplazamiento en esta curva es de 57 Km/h.

Figura 37. Factor de estabilidad del punto crítico las Cocalinas.



Fuente. Autor.

Este trayecto presenta un radio de la curva de 82,3 metros y el off-tracking del vehículo de estudio es de 0,6128 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 3.1128 metros. Este valor es menor al medido en la vía (5.6 metros), lo que indica que refleja un sobreechanco que permite el tránsito correcto de los vehículos en ambas direcciones. Esta característica, evita que ocurran maniobras direccionales o de reducción súbita de la marcha, logrando minimizar el riesgo por volcamiento.

6.6 PUNTO CRÍTICO ANTES DE LAS COCALINAS 1 Y 2

Los puntos críticos antes de Las Cocalinas 1 y 2 (Fig. 13), presentan señales de tránsito de delineación simple para describir el perfil de la curva como se observa en las Figs. 38 y 39.

Este trayecto al igual que el punto crítico anterior, presenta gran visibilidad respecto al vehículo que se acerca en sentido contrario. Esta visual es de gran importancia porque permite tomar la curva de forma segura, ya que esta vía por ser bidireccional no consta con las geometrías correctas para el adecuado tránsito vehicular.

Figura 38. Punto Crítico Antes de las Cocalinas 1



Fuente. Google Maps (2019).

Figura 39. Punto crítico Antes de las Cocalinas 2



Fuente. Google Maps (2019)

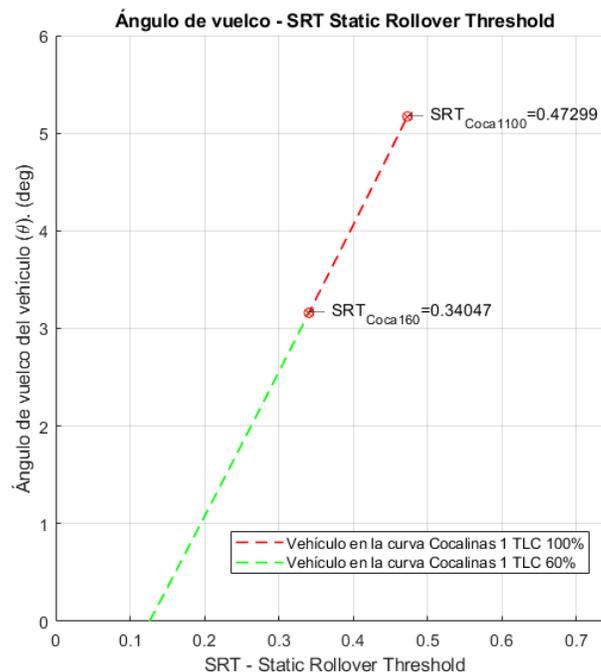
Según lo indicado en la Tabla 5, y utilizando los procedimientos anteriormente enunciados, el factor de estabilidad para el punto crítico antes de las Cocalinas 1 es 0.34047 (Fig. 40), y con un radio de 13,8 metros, se obtiene una velocidad de tránsito de 24.44 Km/h.

Para el punto crítico Corozal 2 el $SRT = 0,27931$ (Fig. 41), donde el radio de esta curva es de 24,6 metros, la velocidad de tránsito debe ser de 29.556 Km/h.

Si se observa la velocidad establecida para el trayecto antes de las Cocalinas 1, la supera 3.3 veces, si se compara con la velocidad que establece INVIAS, y para el tramo antes de las Cocalinas 2 en 2.8 veces.

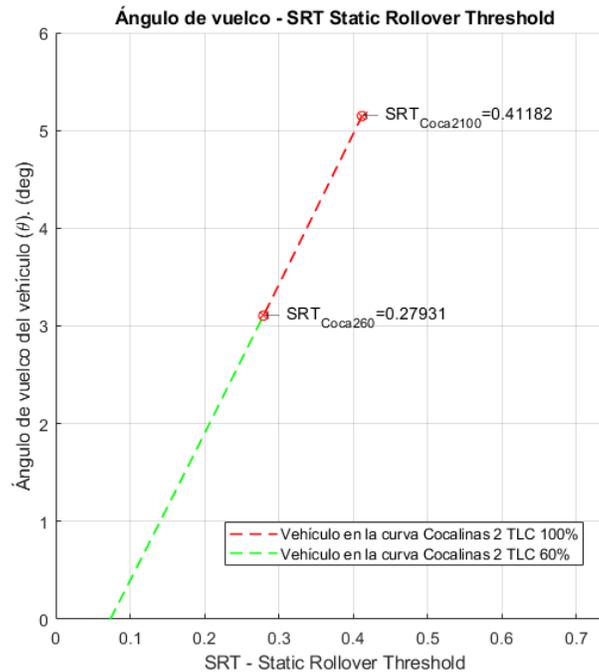
El factor velocidad en estos trayectos es bastante crítico, debido que la velocidad establecida mediante el estudio es demasiado baja y no existe ningún tipo de señalización que pueda llegar a reducirla. El factor de riesgo que produce los mayores índices de volcamiento en esta vía es el aumento de velocidad Policía Nacional (2018). Se recomienda instalar en el punto crítico antes de las Cocalinas 1 y 2, una señal de tránsito de velocidad máxima de 24 Km/h y 29 Km/h respectivamente.

Figura 40. Factor de estabilidad del punto crítico Antes de las Cocalinas 1.



Fuente. Autor.

Figura 41. Factor de estabilidad del punto crítico Antes de las Cocalinas 2.



Fuente. Autor.

Según Choi (2001), el off-tracking para el vehículo de estudio del punto crítico antes de las Cocalinas 1, que cuenta con un radio de curva de 13,8 metros es de 3,8 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 6,3 metros. Para el punto crítico Antes de las Cocalinas 2, que presenta un radio de curva de 24,6 metros es de 2.1 metros. El espacio que abarca el vehículo al tomar la curva es de 4,6 metros.

Según las mediciones topográficas realizadas a cada punto crítico, se determinó que el ancho del carril para las curvas antes de las Cocalinas 1 y 2 son 4,95 metros y 4,15 metros respectivamente.

Si se compara el ancho del carril para cada punto crítico con el espacio para transitar del vehículo, se observa que la vía en estos trayectos no cumple con las especificaciones necesarias para que dos vehículos de las mismas características circulen en el mismo instante. El vehículo debe ocupar más de un carril para transitar, por consiguiente, opta por invadir el espacio delimitado por la cuneta (trayecto de la vía que se usa para recoger el agua lluvia) para poder tomar la curva y no colisionar con el vehículo que se acerca.

En algunas ocasiones el vehículo que va bajando, cede el paso al vehículo que se aproxima. Estas acciones no son recomendables, debido a que los vehículos pesados requieren una mayor distancia y tiempo de respuesta del sistema de los frenos, por su gran tamaño y peso, que maximizan el riesgo de accidentalidad Güemez (2013).

Se recomienda construir sobreelevaciones en estas curvas que presentan radios mínimos, para evitar los frenados bruscos, maniobras direccionales y de este modo, permitir la correcta circulación de los vehículos.

6.7 PUNTO CRÍTICO EL RINCÓN DE LOS CABALLOS

El trayecto el Rincón de los Caballos (Fig. 13), es un punto crítico como los anteriormente nombrados que también presenta grandes deficiencias en cuanto a la señalización vial. Solo consta de señales de delineación simple como se observa en la Fig. 42.

La visibilidad en este tramo de la ruta es buena si se analiza con respecto al vehículo que se acerca en sentido contrario, lo que permite mayor espacio para afrontar la curva.

Figura 42. Punto Crítico el Rincón de los Caballos

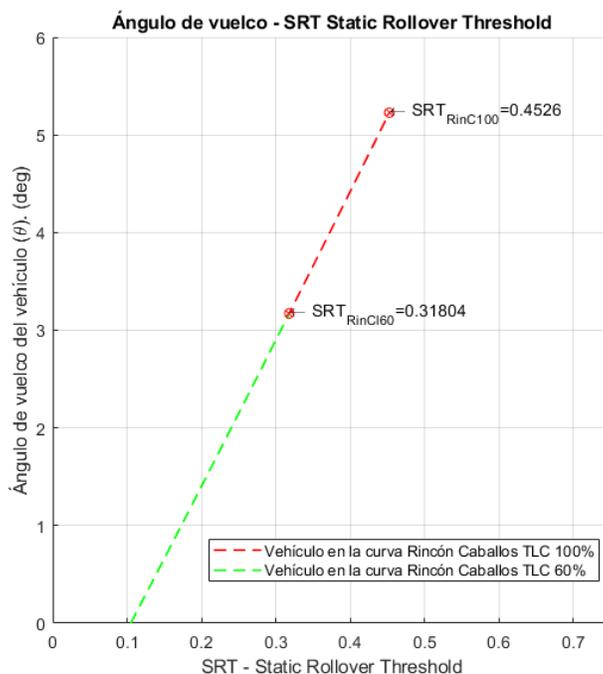


Fuente. Autor.

Realizando el mismo procedimiento de los puntos anteriores, el factor de estabilidad para este punto crítico es de 0,31804 (Fig. 43). Si el radio de curvatura es 30 metros, la velocidad segura de desplazamiento es 34.8289 Km/h.

La velocidad determinada en el estudio es demasiado baja si comparada con la velocidad máxima de tránsito para vehículos pesados en vías nacionales ($V = 80$ Km/h), la supera 2.3 veces. Además, no existe ningún tipo de señalización vial que pueda disminuirla. Se recomienda instalar una señal de tránsito que muestre que la velocidad máxima de circulación en ese trayecto es de 34 Km/h.

Figura 43. Factor de estabilidad del punto crítico el Rincón de los Caballos.



Fuente. Autor.

Según Choi (2001), el off-tracking para el vehículo de estudio en este punto crítico de radio 30 metros es de 1,6939 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 4,1939 metros. Este valor es menor al medido en la vía (4,015 metros), lo que indica que las dimensiones del carril no son las adecuadas para la circulación correcta de los vehículos y el alto flujo vehicular que presenta la vía.

En ocasiones el vehículo debe ocupar espacios que no les corresponde (cunetas u otro carril), que pueden generar todo tipo de accidente ya que se realizan maniobras direccionales o de frenado. Para este trayecto es necesario la construcción de sobreebanchos que permitan el flujo vehicular adecuado sin generar retrasos y mantener la seguridad vial.

6.8 PUNTO CRÍTICO PAMPLONITA

En el sector Pamplonita (Fig. 14), está ubicado un trayecto que presenta grandes deficiencias en cuanto a la señalización vial, pues solo consta de señales de delineación simple como se observa en la Fig.44. Este trayecto presenta poca visibilidad con respecto al vehículo que se acerca en sentido contrario debido a que hay presencia de montañas y zonas rocosas, y a su vez, son curvas que presentan un radio de curvatura pequeño (son muy cerradas). Esta visual es importante, porque este tramo exhibe una intersección para ingresar a la zona urbana del municipio de Pamplonita.

Un factor que podría causar accidentes es la visibilidad para los vehículos que salen del pueblo, debido a que no se observan claramente los vehículos que se aproximan subiendo. Si estos vehículos transitan a gran velocidad pueden causar un accidente y en el caso de un vehículo

pesado que al realizar maniobras direccionales o de frenado, podrían verse involucrados en un volcamiento. Así mismo, en las encuestas se manifestó la necesidad de implementar un espejo para observar el vehículo que se acerca y prevenir cualquier tipo de accidente.

Figura 44. Punto crítico Pamplonita.

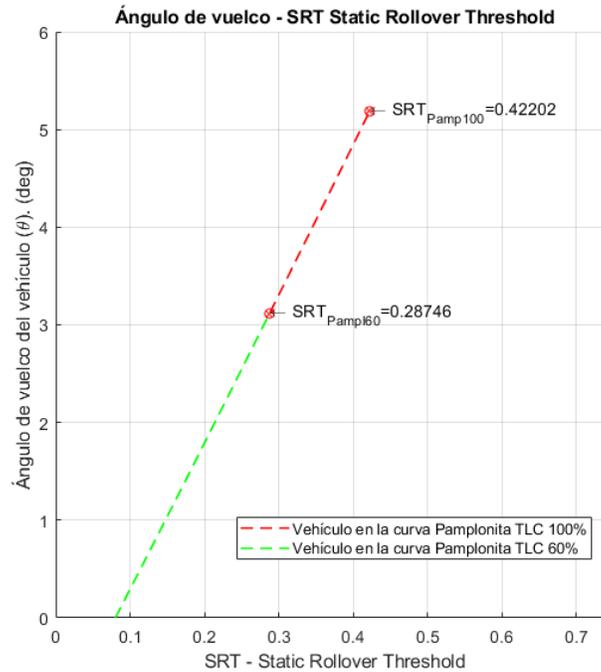


Fuente. Google Maps (2019)

Para este trayecto, al seguir los lineamientos anteriormente detallados, el factor de estabilidad es 0,28746 (Fig. 45). Si el radio de curvatura de la curva es $r = 33,8$ metros, su velocidad segura de tránsito es 35,1467 Km/h.

La velocidad obtenida mediante el estudio demuestra que un vehículo pesado no puede transitar en este tramo con las condiciones impuestas por INVIAS, siendo necesario la implementación de una señal de tránsito de velocidad máxima de 35 Km/h que permita reducirla drásticamente.

Figura 45. Factor de estabilidad del punto crítico Pamplonita.



Fuente. Autor.

Según Choi (2001), el off-tracking para el vehículo de estudio para este tramo de radio 33.8 metros es 1,5 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 4 metros. Este valor es muy cercano al medido en la vía (4,09 metros), lo que indica que el espacio para transitar es bastante reducido para el vehículo de estudio.

En este trayecto, el espacio para transitar dos tractocamiones al mismo instante es demasiado ajustado. Los dos conductores deben tomar la curva perfectamente para no colisionar. Estos factores de riesgo propician maniobras direccionales y de frenado que pueden repercutir en un accidente. Se recomienda construir sobrecanchos en este trayecto con el objetivo de mejorar la circulación y la visualización de los vehículos que ingresan o salen del pueblo.

6.9 PUNTO CRÍTICO LOS ADIOSES

Exhibiendo grandes deficiencias en señalización vial (Fig.14), el punto crítico los Adioses solo consta de señales de delineación simple como se observa en la Fig. 46.

Este trayecto a través de los años, ha registrado accidentes por volcamiento de vehículos pesados, siendo las causas más comunes, exceso de velocidad, mal estado de la vía y maniobras direccionales, según la información suministrada por la Policía Nacional (2018).

Figura 46. Punto crítico los Adioses.

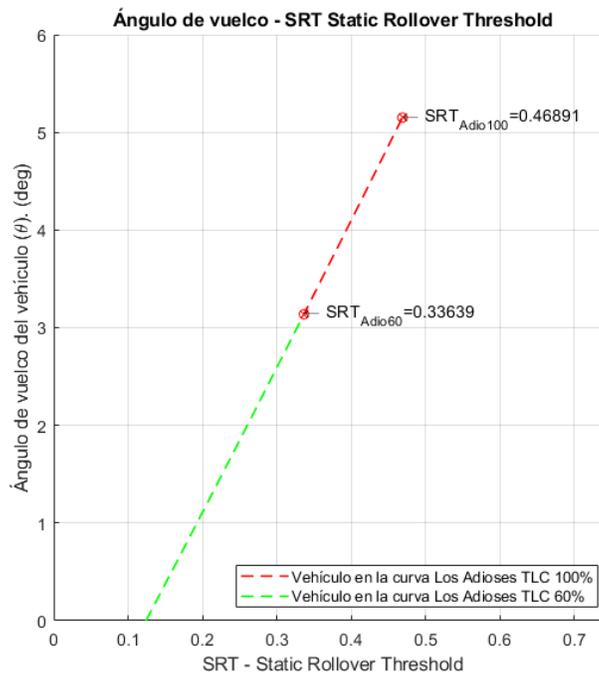


Fuente. Google Maps (2019).

Según la normativa anteriormente detallada, el factor de estabilidad de este trayecto es 0,33639 (Fig. 47). Si el radio de la curva es 26,5 metros, traduce una velocidad de circulación igual a 33.665 Km/h.

Este trayecto requiere una señal de tránsito que exhiba la velocidad máxima de circulación de 33 Km/h.

Figura 47. Factor de estabilidad del punto crítico los Adioses.



Fuente. Autor.

Según Choi (2001), el off-tracking para el vehículo de estudio en este punto crítico que presenta un radio de curvatura de 26,5 metros es de 1,95 metros. El espacio que ocupa el vehículo al tomar la curva es de 4,45 metros. Si se compara esta dimensión con el ancho del carril medido en la vía (4,65 metros), se observa que el espacio para moverse es bastante estrecho, si transitan dos vehículos de estudio al mismo instante.

En este trayecto es necesario el mejoramiento de la calzada, mediante la construcción de ensanchamientos que permita la operación segura de los vehículos, reduciendo la accidentalidad y demoras en el tiempo de viaje.

Anteriormente, se describió cada uno de los puntos críticos, analizando diferentes aspectos como señalización, visibilidad, off-tracking y velocidad de tránsito en cada uno de ellos. La Tabla 6, indica la comparación entre las velocidades máximas para el vehículo pesado según el modelo cinemático tridimensional, la velocidad máxima en una vía nacional y la señalización impuesta por la concesión vial en cada punto crítico seleccionado.

Tabla 6. Comparación de las velocidades en cada punto crítico con respecto a la velocidad establecida.

Punto Crítico	Velocidad del tractocamión con 60% de TLC (Km/h)	Velocidad Máxima en vías nacionales (Km/h)	Señal de tránsito que indica la velocidad segura en cada curva (Km/h)
Corozal 1	38.3632	80	30
Corozal 2	46.447	80	30
La Donjuana	55.588	80	-
El Diamante	46.4319	80	-
La Miguelera	36.543	80	-
Las Cocalinas	57.13	80	-
Antes de las Cocalinas 1	24.44	80	-
Antes de las Cocalinas 2	29.556	80	-
El Rincón de los Caballos	34.8289	80	-
Pamplonita	35.1467	80	-
Los Adioses	33.665	80	-

Fuente. Autor

7. CONCLUSIONES

Al analizar los diferentes aspectos asociados con la accidentalidad por volcamiento de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona, se observa que existen graves problemas de seguridad vial asociados a la falta de señalización vial en diversos sectores por las características y geometrías de la vía.

En primera parte, la mayoría de los trayectos críticos no cuentan una señalización adecuada que indique a qué velocidad debe transitar un vehículo pesado por esta zona, ya que presentan una serie de pendientes longitudinales y laterales, y un pequeño radio de curvatura, asimilando que la velocidad de tránsito es la velocidad máxima establecida por el Ministerio de Transporte (80 Km/h).

Del presente estudio cinemático se observa que la velocidad determinada en la mayoría de los puntos es de menor valor al recomendado entre dos y hasta 3 veces con respecto a la velocidad establecida. Esto indica que el riesgo de que ocurra un volcamiento o salida de la vía por exceso de velocidad es inminente, y se hace más propenso, cuando los conductores de vehículos pesados carecen de pericia al conducir o frecuentan la vía por primera vez.

Las curvas las S de Corozal 1 y 2, son los dos únicos puntos críticos que presentan una correcta señalización de velocidad. La velocidad recomendada para este tramo de vía es de 30 Km/h, lo que indica que las velocidades obtenidas mediante el modelo son mayores que las recomendadas, por lo tanto, es una velocidad segura de tránsito para todos los vehículos de estas características que frecuentan esta vía. En cuanto a señalización por características y geometría, presenta señales de tránsito **PRECAUCIÓN, CURVA PELIGROSA**, curva peligrosa a la derecha y a la izquierda, pendiente peligrosa. Así mismo, se tienen reductores de velocidad antes de iniciar la curva. Este sector presenta alta accidentalidad de volcamiento, debido a que los conductores de vehículos pesados violan o no acatan las señales de tránsito ni límites de velocidad.

En segunda instancia, en el análisis que se realizó con respecto al espacio que ocupa el vehículo pesado cuando gira (off-tracking), se observa que el diseño de la carretera en algunas zonas no es adecuado para su correcta y cómoda circulación, puesto que no facilita que los vehículos puedan transitar adecuadamente y al mismo tiempo cuando otro vehículo de las mismas características presencia la curva (tractocamión). En ciertos casos, los vehículos ocupan espacios de la vía que no están destinados para su circulación (cunetas), para poder afrontar la curva de la mejor manera y evitar el accidente. En esta situación se observa que las empresas o concesiones que diseñan las carreteras realizan los estudios de off-tracking, pero ajustan demasiado sus diseños para ahorrarse costos en su construcción. En estos trayectos es necesario la construcción de sobreanchos, que permitan la correcta circulación de los vehículos, mejorando los tiempos de viaje y la seguridad vial.

Otra circunstancia que afecta la correcta circulación de los vehículos es la poca visibilidad que ofrece la curva con respecto a los vehículos que se acercan en sentido contrario, ya que hay presencia de zonas rocosas y de gran vegetación, que no permite tener una gran visual, asociado con el poco espacio para transitar, generando un factor de riesgo basado en la maniobras direccionales o de frenado en el caso de que un vehículo de las mismas características haya tomado la curva de forma incorrecta.

En algunos casos se observa que los vehículos que se aproximan al punto crítico en las pendientes descendentes frenan y permiten que el vehículo que circula en sentido contrario tome la curva y luego continúan con su camino. Estas acciones no son recomendables, debido a que los vehículos pesados requieren una mayor distancia por su peso y mayor tiempo de respuesta del sistema de los frenos, que maximizan el riesgo por volcamiento.

Así mismo, en las encuestas los usuarios de la vía sugieren la necesidad de implementar un espejo en cada punto crítico, con el fin de adquirir una mejor visibilidad con respecto al vehículo que se acerca, tomar adecuadamente la curva y prevenir cualquier tipo de accidente.

Los puntos Corozal 1 y Corozal 2 a diferencia de los demás, cuentan con una ventaja en asuntos de movilidad, debido a que este trayecto pertenece a la doble calzada y solo transitan vehículos en un sentido. Esta característica favorece al conductor, ya que tiene mejor visibilidad lo que permite reducir las maniobras direccionales y de frenado que ocasionan inestabilidad en el vehículo y que pueden causar el volcamiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2001). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, 4th. ed.(ISBN 1-56051-156-7.).
- Chang, T. (2001). Effect of Vehicles' Suspension on Highway Horizontal Curve Design. Journal of Transportation Engineering, 127, 89–91.
- Chu, D., Li, Z., Wang, J., Wu, C., & Hu, Z. (2018). Rollover speed prediction on curves for heavy vehicles using mobile smartphone. Measurement, 130, 404–411.
- Colfecar. (2019). Ventajas del transporte por carretera en Colombia. Tecnología Para Logística Empresarial. <https://blog.liftit.co/ventajas-del-transporte-por-carretera-en-colombia/>
- Comunidad Andina. (2017). Accidentes de tránsito en la Comunidad Andina , 2007-2016. 48.
- García Depestre, R. A., Delgado Martínez, D. E., Díaz García, E. E., & García Armenteros, R. R. (2012). Caracterización de la accidentalidad vehicular y análisis de las causas en la provincia de Villa Clara, Cuba. Dyna, 79(175), 10.
- Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale, PA.: SAE International, 7th. ed.(ISBN 1560911999).
- Gobierno Nacional. (2013). LEY 1228 DEL 2008. 1, 8.
- Gonzalo Guillermo Moreno Contreras. (2017). A kinestatic model for the three-dimensional static analysis of long combination vehicles. 213.
- Google. (2019). Google Maps. <https://www.google.com.co/maps/@7.3830674,-72.6505842,15z?hl=es-419>
- Grislis Aivis. (2010). Longer combination vehicles and road safety. 25(3), 336–343.
- Güemez Shedden, C. R. (2013). Comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada en el cantón de San José (2011-2012). Infraestructura Vial, 15 Núm. 26, 18.
- Jaisung Choi, Jongdae Baek, Seungiun Lee, W. K. (2001). Offtracking model on horizontal curve sections. Proceedings of Rhe Eastern Asia Socieiy for Transportation Studies., 3, 13.
- Kamnik, R.; Boettiger, F.; Hunt, K. (2003). Roll dynamics and lateral load transfer estimation in articulated heavy freight vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Automobile Engineering, Sage Publications Sage UK: London, England, 217, N° 11, 985–997.
- Melo, R. P. De. (2004). Avaliação Da Estabilidade Lateral. 127.
- Melo, R. P. De. (2008). Truck Rollover and Partially Filled Tanks. 45.

- Ministerio de Salud. (2015). Accidentes de transporte. 2013–2014.
- Navarro, L., García, J. G., Rodríguez, H. R. (2018). Cinematic and dynamic considerations for the development of control a un suspension system. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, v. 1 (No 3)(ISSN 1692-7257. 2017), 1–4.
- Navin, F. (1992). Estimating Truck's Critical Cornering Speed and Factor of Safety. *Journal of Transportation Engineering*.
- Noticias, H. (2019). TRANSPORTE DE CARGA: En Colombia debe asumir los retos de Fortalecimiento y Modernización. <http://www.eltransporte.com/transporte-de-carga-en-colombia-debe-asumir-los-retos-de-fortalecimiento-y-modernizacion/>
- Nzta. (2008). Heavy vehicle stability guide. Land Transport Safety Authority, 1, 1–13.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, F. (2019). Medición de ángulos horizontales. http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707s/x6707s03.htm
- Patiño, A. R., Ramón, B. A., Moreno, G. G. (2018). Análisis del Riesgo de Accidentalidad de Vehículos Pesados en la Vía Cúcuta – Pamplona. In: IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica – COLIM2018 – Casa de Nazareth - Universidad de Pamplona – Pamplona – Colombia, 28, 29 Y 30 de noviembre, 2018. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 31, 6.
- Policía Nacional, Dirección de Tránsito y Transporte, Seccional Norte de Santander, C. (2018). Accidentes de Tránsito, Vía Cúcuta - Pamplona. Policía Nacional, 1, 2018.
- Puerto Higuera Geisa Jinnett. (2017). Determinación del sobreechanco requerido para vías con bajas velocidades de diseño en Colombia. Universidad Santo Tomas, 1, 19–39.
- Radio, R. (2019). En Colombia fallecen 15 personas al día por accidentes de tránsito. <https://www.rcnradio.com/colombia/en-colombia-fallecen-15-personas-al-dia-por-accidentes-de-transito>
- Rempel, M. R. (2001). Improving the dynamic performance of multiply-articulated vehicles. Doctoral Thesis, University of British Columbia, November, 184.
- Rill, G. (2011). *Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling*. Boca Ratón, Florida: CRC Press, ISBN 978-1-4398-3898-3.
- Transporte, M. de T. y. (2002). Código nacional de tránsito terrestre (Ley 769 de 2002) (p. 101).
- UNSJ, Universidad Nacional de San Juan, A. (2010). Topografía Aplicada. Agrimensura. <ftp.unsj.edu.ar>
- Vanguardia. (2019). Volcamiento de camión vía entre Bucaramanga y Bogotá. volcamiento de

camión vía entre Bucaramanga y Bogotá

- Winkler, C.; Fancher, P.; Bareket, Z.; Bogard, S.; Johnson G.; Karamihas, S.; Mink, C. (1992). Heavy Vehicle Size and Weight - Test Procedure for Minimum Safety Performance Standards. UMTRI Research Review, The University of Michigan Transportation Research Institute.
- Winkler, C. (2000). Rollover of Heavy Commercial Vehicles. UMTRI Research Review, The University of Michigan Transportation Research Institute, 31, 1–20.
- Woodrooffe, J.; Sweatman, P.; Arbor, A.; Middleton, D.; James, R.; Billing, J. R. (2010). Review of Canadian Experience with the Regulation of Large Commercial Motor Vehicles. Washington, D.C. National Cooperative Highway Research Program - NCHRP., ISBN 978-0-309-15518-2.
- Zhou, S.; Zhang, S. (2013). Assessing the effect of chassis torsional stiffness on tractor semi-trailer rollover. Appl. Math, 7, n. 2, 633–637.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO 1

Encuesta sobre accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona.

1. Tipo de persona encuestada.

Conductor _____, Persona que vive sobre la vía _____, Persona que trabaja en la vía o Policía de Tránsito y Transporte_____.

2. Conoce o sabe de algún punto, tramo o trayecto de alto riesgo de accidentalidad por volcamiento de vehículos pesados en esta vía. Si ____, No ____.

¿Cuál o cuáles?

3. Qué tipo de vehículo pesado presenta mayor accidentalidad.

Tractocamión ____, camión de un eje ____, camión de 2 ejes ____, camión con remolque_____.

4. Que factor de riesgo cree usted que influye en la accidentalidad de estos vehículos.

Alta velocidad ____, Falta de pericia del conductor____ Maniobras peligrosas del conductor _____, Condiciones de carga del vehículo _____, Condiciones de mala superficie de la vía _____, Mal diseño de la vía _____, Vehículos en mal estado _____, Mala señalización de la vía _____.

5. Qué consecuencias o efectos observó en el accidente del vehículo pesado.

Pérdida de vidas _____, heridos _____, cierres temporales o totales de la vía _____, pérdida de la mercancía _____, daños a otros vehículos _____.

5. Qué tipo de accidente de vehículos pesados es más frecuente en esta vía.

Volcamiento _____, salida de la vía _____, atropellamiento _____, choques _____

6. Crees que es suficiente la señalización vial que se encuentra actualmente en esta vía para evitar los accidentes de vehículos pesados? ¿Sí o No y por qué?

7. Ha observado deficiencias o irregularidades en el estado de la vía Cúcuta – Pamplona que influyan en la accidentalidad de vehículos pesados? ¿Sí o No y por qué?

8. En qué condiciones climáticas cree usted que ocurren más accidentes de vehículos pesados.

Despejado _____, Lluvioso _____, Con neblina _____.

ADRIAN RICARDO PATIÑO M.
Docente de la universidad de
Pamplona.
Estudiante de maestría en
ingeniería industrial

GONZALO MORENO
Docente titular de la universidad de
Pamplona.
Director de trabajo de grado.



9.2 ANEXO 2

Cúcuta, 21 de agosto del 2018

Señor:
LUIS MIGUEL BASTIDAS ROJAS
Mayor de la Policía Nacional
Director General de SETRA DENOR

Cordial saludo

Mi nombre es ADRIAN RICARDO PATIÑO MORANTES, soy ingeniero mecánico y docente de la Universidad de Pamplona, en la actualidad me encuentro adelantando mis estudios de maestría en ingeniería industrial. Actualmente estoy trabajando en la tesis de titulada: ANÁLISIS DE RIESGO DE ACCIDENTALIDAD POR VOLCAMIENTO DE VEHÍCULOS PESADOS MEDIANTE UN MODELO CINEMÁTICO TRIDIMENSIONAL EN LA VÍA CÚCUTA – PAMPLONA, dirigida por el PhD Gonzalo Guillermo Moreno Contreras. Para el desarrollo de este trabajo, solicito información (causas, efectos, tipo de vehículo, lugar del accidente) o estadística de la accidentalidad por volcamiento o salida de la carretera de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona de los años 2010 a 2018, para determinar los puntos o trayectos críticos donde mayor accidentalidad se presenta y además encontrar el vehículo pesado más propenso a estos tipos de accidentes.

Agradezco la atención prestada y espero su colaboración.

ADRIAN RICARDO PATIÑO M.
Docente de la Universidad de
Pamplona.
Estudiante de maestría en
ingeniería industrial.

GONZALO MORENO
Docente titular de la Universidad de
Pamplona.
Director de trabajo de grado.



Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz