



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PAGINA

1 de 2

Neiva, 19 de febrero de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El suscrito:

Carlos Augusto Guzman Martinez, con C.C. No. 7713588, Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado

DETERMINACION DE LA EVITABILIDAD EN ACCIDENTE DE TRANSITO CON SIMULACION DE LA TECNICA DE MONTECARLO, presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de FÍSICO; Autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

CARLOS AUGUSTO GUZMAN MARTINEZ

Firma: 

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: DETERMINACION DE LA EVITABILIDAD EN ACCIDENTE DE TRANSITO CON SIMULACION DE LA TECNICA DE MONTECARLO

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GUZMAN MARTINEZ	CARLOS AUGUSTO

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CRISTANCHO FIERRO	JOSE MIGUEL

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Tovar Galindo	Faiver
Cuellar Santanilla	Carlos Eduardo

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: FISICO

FACULTAD: CIENCIAS EXACTAS

PROGRAMA O POSGRADO: FISICA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2024

NÚMERO DE PÁGINAS: 71

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones
Tablas o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: PDF

MATERIAL ANEXO: Ninguno

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. MonteCarlo	Montecarlo	6. Fuerza	Force
2. Accidente	Accident	7. Impulso	Impulse
3. Reconstruccion	Reconstruction	8. coeficiente	coefficient
4. Vehiculos	Vehicles	9. Huellas	Fingerprint
5. Energia	Energy	10. arrastre	Drag

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Actualmente en la reconstrucción de accidentes no se incluye el análisis de evitabilidad del accidente de tránsito, cuando la velocidad de circulación pre-impacto y post-impacto de los vehículos involucrados constituyen la hipótesis del choque, este concepto es importante ya que está relacionado con el análisis de los aspectos físicos del impacto entre dos vehículos y determina a partir de esos parámetros establecer si el impacto, accidente o evento era evitable o no.

En el análisis de evitabilidad, se debe tener en cuenta la incertidumbre de los parámetros involucrados en el accidentes, en el presente Trabajo de Grado, se examinan y se cuantifican la incertidumbre de las variables presentes en la investigación del accidente, con el uso de la técnica de Montecarlo y se estima la distribución de probabilidad de acuerdo con las variables aleatorias, la resultante tiende a ser una distribución normal y se presta bien a la interpretación estadística en cuanto al valor más probable. El análisis de este trabajo se realizó con un complemento para Excel llamado Rick Simulator, el cual permite filtrar de forma selectiva los resultados menos probables y tener en cuenta el resultado mas probable. Con el fin de brindar mayor visión a las autoridades judiciales para tomar decisiones respecto al caso.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Currently, accident reconstruction does not include the analysis of accident avoidability in traffic accidents when the pre-impact and post-impact speeds of the involved vehicles constitute the collision hypothesis. This concept is important as it is related to analyzing the physical aspects of the impact between two vehicles and determining, based on these parameters, whether the impact, accident, or event was avoidable or not.

In the analysis of avoidability, the uncertainty of the parameters involved in the accident must be taken into account. In this thesis, the uncertainty of the variables present in the accident investigation is examined and quantified using the Monte Carlo technique. The probability distribution is estimated based on the random variables, which tends to be a normal distribution and is well suited for statistical interpretation regarding the most probable value. The analysis in this study was performed using an Excel add-in called Rick Simulator, which allows selectively filtering out less probable results and considering the most probable outcome. This is done to provide greater insight to judicial authorities in making decisions regarding the case.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre presidente Jurado:

Firma:

Carlos Eduardo Céliz Santanillo

Nombre Jurado:

Firma:

[Handwritten signature]

Nombre Jurado: *Faiver Rosal Galindo*

Firma:

[Handwritten signature]

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE FÍSICA



**Determinación de la Evitabilidad en Accidente de
Transito con Simulación de la Técnica de Montecarlo**

Trabajo de Grado para optar al título de Físico

Desarrollado por:

Carlos Augusto Guzman Martinez

Código: 20151132740

Firma:

Director: PhD. Jose Miguel Cristancho Fierro

Firma:

Área: Accidentologia

Neiva-Huila
17 de febrero de 2024

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón a mi madre y a mi esposa que estuvieron en todo el tiempo y camino recorrido en esta agradable experiencia como estudiante de tan hermosa carrera de física y a mis compañeros con los cuales compartí buenos momentos.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Grado es el resultado de un esfuerzo conjunto en el que participaron varias personas brindando opiniones, correcciones, dando palabras de ánimo, acompañamiento en tiempos de crisis y en momentos de felicidad.

Por lo tanto, al terminar el presente trabajo, es inevitable expresar agradecimientos a todas las personas que hicieron posible este gran logro.

En primer lugar, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible llevar a cabo la culminación de mi pregrado.

A mi madre Rosalba, por su ejemplo de honestidad, fortaleza, sabiduría y esposa, Diana Yineth Arguello Anacona e hijos, por el apoyo, sus palabras de alivio y superación. Este logro es por ellos y para ellos.

En segundo lugar, deseo agradecer de manera especial y sincera al profesor José Miguel Cristancho Fierro por aceptarme y apoyarme al momento de realizar este trabajo de grado bajo su dirección; debido a que gracias a su apoyo, confianza y orientación se obtuvieron los resultados deseados.

Finalmente, quiero agradecer a la facultad de ciencias exactas y naturales de la Uni-

versidad Surcolombiana, más específicamente al programa de Física por brindarme la oportunidad de iniciar y terminar mis estudios para convertirme en un nuevo profesional.

RESUMEN

Actualmente en la reconstrucción de accidentes no se incluye el análisis de evitabilidad del accidente de tránsito, cuando la velocidad de circulación pre-impacto y post-impacto de los vehículos involucrados constituyen la hipótesis del choque, este concepto es importante ya que está relacionado con el análisis de los aspectos físicos del impacto entre dos vehículos y determina a partir de esos parámetros establecer si el impacto, accidente o evento era evitable o no.

En el análisis de evitabilidad, se debe tener en cuenta la incertidumbre de los parámetros involucrados en el accidentes, en el presente Trabajo de Grado, se examinan y se cuantifican la incertidumbre de las variables presentes en la investigación del accidente, con el uso de la técnica de Montecarlo y se estima la distribución de probabilidad de acuerdo con las variables aleatorias, la resultante tiende a ser una distribución normal y se presta bien a la interpretación estadística en cuanto al valor más probable. El análisis de este trabajo se realizó con un complemento para Excel llamado Rick Simulator, el cual permite filtrar de forma selectiva los resultados menos probables y tener en cuenta el resultado mas probable. Con el fin de brindar mayor visión a las autoridades judiciales para tomar decisiones respecto al caso.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	9
2.0.1. Objetivo General	9
2.0.2. Objetivos Específicos	9
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. MÉTODOS TEÓRICOS DE SOLUCIÓN	12
4.1. RECONSTRUCCIÓN DE UN ACCIDENTE DE TRÁNSITO	13
4.1.1. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRENADO	14
4.2. MECÁNICA DE IMPACTO	15
4.2.1. Principio de conservación del momento lineal	16
4.2.2. Principio de conservación de Energía	19
4.2.3. Modelos para el cálculo de la energía de deformación	21
4.3. APLICACIÓN CONJUNTA DE AMBOS PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN	22
4.4. EVITABILIDAD FISICA DEL ACCIDENTE DE TRANSITO	24
4.4.1. Distancias cinematicas y evaluacion de acciones	25
4.4.2. Distancias de percepción, reacción y total	26
4.4.3. Tiempos de Reacción y Decisión	27
4.5. MEDIDAS ESTADÍSTICAS	28

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
4.5.1. Rango	28
4.5.2. La media	28
4.5.3. Desviación estandar	29
4.5.4. Varianza	29
4.5.5. Coeficiente de variación	30
4.6. SIMULACIÓN DE MONTECARLO	30
4.6.1. FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD	31
4.7. APLICACION DE MONTECARLO	32
4.7.1. Montecarlo y evaluación de integrales	32
5. RESULTADOS	35
5.0.1. Análisis del choque	35
5.0.2. Análisis físico del accidente de tránsito	39
5.0.3. Análisis de evitabilidad	45
5.0.4. Gráficas obtenidas con la técnica de Montecarlo	47
6. CONCLUSIONES	56

Índice de Figuras

4.1.	Gráfica modelizada de la deceleracion obtenida en el caso de frenada	14
4.2.	Representación de los momentos lineales en un sistema coordinado (x, y) antes y después de un impacto	18
4.3.	Representación gráfica del impacto y su deformación	19
5.1.	Imagen del informe policial de accidente de tránsito (IPAT), diligenciado por la autoridad de tránsito.	36
5.2.	Fotografía aérea aportada por testigo y tomada con dron mavic air 2 se observa las evidencias fijadas topográficamente por la autoridad de tránsito	36
5.3.	Fotografía aérea aportada por testigo y tomada con dron mavic air 2 se observa las evidencias fijadas topográficamente por la autoridad de tránsito	38
5.4.	Ángulos de entrada teniendo en cuenta las trayectorias de los vehículos .	39
5.5.	Resultado del analisis de deformación, velocidad equivalente de barrera con software Eyescloud3d	42
5.6.	Distancias de los vehículos 1 y 2 antes del impacto	45
5.7.	Distancia y posición del vehículo 2 de acuerdo al tiempo que duro el riesgo que genero el vehículo No. 1	46
5.8.	Distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada	46
5.9.	Distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector	47
5.10.	Histograma de 1000 valores de la velocidad post-impacto vehículo 1 por huella arrastre metálico	47

5.11. Medidas de tendencia para la velocidad post-impacto vehículo 1	48
5.12. Histograma de 1000 valores de la velocidad post-impacto vehiculo 2 con dos coeficiente y dos distancias diferentes	48
5.13. Medidas de tendencia para la velocidad post-impacto vehículo 2	49
5.14. Histograma de 1000 valores de la velocidad pre-impacto por conservación de momento lineal del vehículo 1	50
5.15. Medidas de tendencia para la velocidad pre-impacto vehículo 1	50
5.16. Histograma de 1000 valores de la velocidad impacto por conservación de momento lineal mas energía de deformación vehículo 2	51
5.17. Medidas de tendencia para la velocidad impacto vehículo 2	51
5.18. Histograma de 1000 valores de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector 30 km/h.	53
5.19. Medidas de tendencia para la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector.	53
5.20. Histograma de 1000 valores de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada del vehículo 2	54
5.21. Medidas de tendencia de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada del vehículo 2	54

Índice de Tablas

5.1. Valores de las variables y sus respectivos rangos y distribuciones	38
5.2. Valores de las variables y sus respectivos rangos y distribuciones	39

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El accidente de tránsito es un suceso inesperado, impremeditado e indeseado, el cual genera resultados como: lesiones, muerte y/o daños a cosas. El accidente de tránsito, sucede en un espacio y un tiempo, donde su actor principal es un vehículo y/o cuerpos en movimiento. Definido de esta manera, el accidente es una situación dinámica y cinemática; en otras palabras cuando se analiza el concepto “accidente”, la Real Academia Española lo define como “suceso eventual o acción que involuntariamente resulta en daño para las personas o cosas” sin embargo, en materia normativa, se define el accidente de tránsito como un “evento generalmente involuntario, generado al menos por un vehículo en movimiento, que causa daños a personas que se movilizan por la vía o vías comprendidas en el lugar o dentro de la zona de influencia del hecho” Ley 769, (2002).

Los factores humanos, de acuerdo a estudios realizados por la dirección general de tráfico de España, indican: “cuándo existe velocidad excesiva la proporción de accidente mortales es un 60 % superior a cuándo no hay” DGT, (2020). En el PLAN MUNDIAL decenio de acción para seguridad vial 2021-2030, elaborado por la Organización Mundial de la Salud y las comisiones regionales de las Naciones Unidas, en cooperación con los asociados del grupo de colaboración de las Naciones Unidas para la Seguridad Vial y otras partes interesadas, reconocen que el exceso de velocidad contribuyen a los fallecimientos

y traumatismo por choques en accidentes de tránsito OMS, (2021).

En Colombia, según la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), el exceso de velocidad es considerado como el principal factor de mortalidad en los siniestros viales; los estudios afirman que “un peatón que es arrollado por un vehículo viajando a 30 km por hora tiene un 85 % de probabilidades de no perder la vida. Sin embargo, si el vehículo se desplaza a 50 km por hora, la probabilidad se reduce en un 20 % ANSV, (2022). El accidente de tránsito hace parte de la categoría de los delitos culposos, como homicidio culposo, Artículo 109 y lesiones culposas, artículo 120 Ley 599, (2000). En las ciencias del derecho o ciencias jurídicas, la palabra culpa como conducta punible se define así: “artículo 23 culpa: La conducta es culposa cuando el resultado típico es producto de la infracción al deber objetivo de cuidado y el agente debió haberlo previsto por ser previsible, o habiéndolo previsto, confió en poder evitarlo” Ley 599, (2000). Esta evitabilidad es de gran importancia al momento de realizar un investigación y reconstrucción de accidente de tránsito y la cual se debe demostrar mediante parámetros cinemáticos y dinámicos en procesos judiciales; actualmente en las reconstrucciones de accidentes de tránsito en el análisis físico matemático del perito solo se establece la causa determinante, la cual en la mayoría de conclusiones es por el exceso de velocidad.

La investigación de accidente de tránsito está en cabeza de las fiscalía y/o el juez, quienes en la mayoría de casos siempre pide consejo a expertos, acá es donde los profesionales en física pueden contribuir con su conocimiento, pero solo si los abogados los invitan a elaborar un informe pericial, ya que el proceso legal es del dominio exclusivo de los abogados, y en la mayoría de los casos, los peritos expertos solo se limitan a contestar las solicitudes de las autoridades judiciales, requerimiento que generalmente son: determinar la velocidad de los vehículo involucrados en los accidentes de tránsito y determinar si esa velocidad calculada fue la causa determinante del accidente, pero es de gran importancia en la reconstrucción de accidente de tránsito, realizar los cálculos como distancia total de

parada, distancia de percepción y elaborar el análisis de evitabilidad teniendo en cuenta la velocidad del sector.

La evitabilidad en los accidentes de tránsito se refiere a la capacidad de prevenir o evitar un accidente antes de que ocurra, pero también hacerlo menos traumático, o disminuir las consecuencias. En general, se considera que muchos accidentes de tránsito son evitables si se toma las medidas adecuadas de seguridad y se sigue las normas de tránsito. Cronrath et al. (1989) Realizaron la investigación MOTORCYCLE AND SEMI TRUCK ACCIDENT RECONSTRUCTION – A CASE STUDY OF HUMAN FACTORS AND AVOIDABILITY ANALYSIS en el Estado de Oregon, Estados Unidos, su objetivo fue realizar la reconstrucción del accidente de tránsito entre una motocicleta y un tractocamión, incluyendo las velocidades, análisis de colisión y análisis de evitabilidad, la metodología utilizada en esa investigación se basó en analizar el informe policial, fotografías de la escena, testimonios, inspección a vehículos, realizar análisis de cálculos de velocidad, análisis de colisión y análisis de convergencia de tiempo-distancia de los vehículos, los resultados de la reconstrucción fueron identificar la convergencia mutua tiempo-distancia entre los vehículos, posiciones relativas de impacto, velocidades de los vehículos, distancias totales de parada de cada vehículo con velocidad calculada, distancia de percepción y reacción, tiempos de percepción y reacción, posiciones finales de los vehículos, su trabajo fue determinar las velocidad de los vehículos y hallar la evitabilidad con la velocidad establecida para el sector, evitabilidad que era posible desde el cálculo físico y matemático, para el vehículo tipo motocicleta el cual se desplazaba a exceso de velocidad.

La reconstrucción de accidente de tránsito es una disciplina que involucra la mecánica newtoniana (modelos físicos), herramientas de la ingeniería (Automotriz, Topográfica), ciencias forenses y la medicina, con el fin de determinar con precisión la secuencia de un accidente de tránsito, sus causas y el análisis de evitabilidad, el resultado es en valores numérico y magnitudes (velocidades, distancias, ángulos) que están afectados de incerteza.

Bartlett et al. (2002) en el artículo *EVALUATING THE UNCERTAINTY IN VARIOUS MEASUREMENT TASKS COMMON TO ACCIDENT RECONSTRUCTION*, world congress, Detroit, Michigan Estados Unidos, presenta resultados de una variedad de experimentos para cuantificar la incertidumbre en algunas tareas de medición presentes en la investigación y reconstrucción de accidente, como medidas tomadas con cinta, rueda de rodillo y tránsito láser, mediciones de marca de derrapes, arcos y marcas de guiñada, medición de daños por aplastamiento, estimación de daños por aplastamiento a partir de fotografías y medición de factor de arrastre mediante varios métodos. Modelaron la probabilidad de muchas variables de reconstrucción de accidente con una distribución normal. Presentaron la desviación estandar de las tareas de medición y determinaron los rangos apropiados para las variables utilizadas en los análisis de incertidumbre de reconstrucción de accidente. Demostraron que la única tarea de medición con gran desviación estandar fue el experimento de medición de factores de arrastre con trineos por la falta de capacitación estandarizada. Demostraron que evidentemente la repetibilidad de algunas tareas comunes a la reconstrucción de accidente mejoraría los protocolos estandarizados.

La técnica de Montecarlo evalúa límites de confianza y distribuciones de probabilidades de valores calculados, es útil para definir tasas de errores, esta técnica de análisis de probabilidades fue usada por primera vez por los científicos que trabajaron en el proyecto Manhattan y hoy en día tiene una alta aceptación en muchos campos, algunos como física nuclear, meteorología, decisiones financieras, predicción de fallas etc. Martinez (2003) en su artículo “CÁLCULO DE COTAS DE ERROR EN ACCIDENTOLOGIA USANDO LA TÉCNICA DE MONTECARLO”, en Bariloche - Argentina, al explicar con un ejemplo concreto, como aplicar la técnica de Montecarlo a la accidentología con los programas en uso, así como los alcances y limitaciones, de este procedimiento; la metodología de la investigación de este Trabajo de Grado, está basada en el análisis y reconstrucción de un caso real, de una colisión lateral en una intersección urbana entre un vehículo automóvil

Peugeot y un automóvil IES super América, el resultado fue el cálculo de : velocidad y propagación de errores en dos variables tenidas en cuenta por el autor como son: los coeficientes de fricción neumático-asfalto y las masas de los vehículos, su conclusión fue que la técnica de Montecarlo presenta una manera eficaz y práctica de tratar la propagación de errores en los cálculos de reconstrucción, llegando a estimaciones más realistas y acertadas de los rangos de error probable, y por lo tanto a veredictos más atinados y confiables.

A nivel nacional, la investigación de Alejandro Rico: CUANTIFICACION DE LA PROBABILIDAD O CHANCE DE EVITABILIDAD EN UN ACCIDENTE DE TRANSITO CUANDO SUPERA LA VELOCIDAD LIMITE EN UN TRAMO VIAL, IRVIAL, Bogotá-Colombia, su objetivo fue concretar y parametrizar técnicamente la situación puntual del análisis de evitabilidad de un accidente de tránsito de un caso real donde estuvieron involucrados un vehículo tipo campero y un peatón, el procedimiento fue identificar una zona de impacto, calcular el área de percepción y reacción, calcular la distancia total de parada y como conclusión se obtiene un 100 % de probabilidad o chance de evitar el contacto con el peatón si hubiera transitado a la velocidad del sector.

La importancia del proyecto de determinar la evitabilidad de un accidente de tránsito con el uso de la técnica de Montecarlo, es demostrar que si la causa de la situación crítica es por ocupación de carril o, no respetar la prelación o, no detener un vehículo ante una señal reglamentaria de pare o semáforo o, cambio de carril sin indicaciones; esas causas dejan de ser determinante cuando el accidente es evitable por parte del vehículo que lleva su prelación o vía y esto se obtiene mediante la elaboración de cálculos físicos matemáticos de distancia total de parada a la velocidad con la cual circulaba, con respecto a la distancia total de parada con la velocidad establecida para el sector, esa velocidad de circulación se calcula de acuerdo a las evidencias fijadas topográficamente en actos urgentes (huellas de frenado, arrastre, derrape, zonas de impacto, ángulos de impacto) como también información dejada por el producto de la colisión en los vehículos (velocidad por

deformación), esta información es: valores de distancias, ángulos, coeficientes de fricción, masas; valores que están afectados por incertidumbre en la recolección por parte de la autoridad; como también la variabilidad con respecto a los valores escogidos en cuanto al coeficiente de fricción. Bartlett (2007), en su investigación SKIDDING FRICTION: A REVIEW OF RECENT RESEARCH, cuyo objetivo fue evaluar valores de fricción establecidas en diferentes tablas, con variedad de vehículos, conductores, superficies, diferentes herramientas de medición y considerando vehículos sin ABS en asfalto seco; la conclusión arrojó valores promedios en el rango de 0.76 con desviación estándar de 0,04 a 0,07, dando un valor promedio de $0,76 \pm 0,06$. Valor que se utilizará en el presente trabajo para los cálculos necesarios.

Los resultados calculados por algunos peritos, usando los valores de las variables escogidas de acuerdo con la bibliografía, como lo son los coeficientes de fricción, coeficientes de rigidez, tiempos de reacciones, entre otros, o los tomados en la escena como distancias de huellas, se seleccionan a conveniencia del perito, para obtener velocidades máximas, velocidades mínimas y velocidad media sin fundamentos científicos. Las velocidades pre-impacto calculadas en las reconstrucciones de los accidentes de tránsito de los vehículos involucrados, en algunas ocasiones su parámetros (mínimo y máximo) se encuentran por encima y por debajo de la velocidad permitida del sector, resultado que hace difícil tomar la decisión por parte de la autoridad judicial para juzgar si iba a exceso de velocidad, aquí es donde el perito físico determina un valor medio, pero quedan interrogantes como por ejemplo si contemplo todos los valores de las variables relacionadas con la investigación.

La técnica de Montecarlo contempla todos los valores posibles de las variables relacionadas con la investigación del accidente de tránsito, dando como resultado un rango con un valor mínimo y un valor máximo, pero además determina el valor más probable, despejando crítica que se haga con respecto al análisis en el peritaje entregado al Juez. El uso de la Técnica de Montecarlo es una herramienta poderosa para evaluar límites

de confianza y las distribuciones de probabilidades de los valores calculados durante el análisis de accidente. Kost y Werner (1994) describieron el uso del paquete de software Crystal Ball, que es complementario de Excel, para evaluar la velocidad inicial de un vehículo en función de la energía disipada durante el choque, describieron tres distribuciones de probabilidades comunes, (normal, triangular y rectangular, también conocida como uniforme), pero no brindan la orientación sobre la selección de valores apropiados para los rangos.

Desde esas primeras exposiciones, ha habido una serie de artículos que describen la base, los atributos y las aplicaciones de la técnica para la reconstrucción. Moser et al. (2003) discutieron una aplicación de variación de parámetros estilo Montecarlo en PC-Crash. Kimbrough y Scott (2004) describió el uso de Montecarlo para analizar una situación de paso que condujo a un choque, pero no la mecánica de la técnica. Moser et al (2003), describieron el uso de Montecarlo para evaluar las velocidades de los vehículos al momento del impacto y analizaron un choque de prueba. Ball et al (2007) utilizaron el complemento Crystal Ball y analizaron el efecto de la selección de distribución en los resultados. Bartlett (2007), utilizó el complemento RiskAmp, esta versión incluye la capacidad de muestreo Latin Hipercube (LHS) para algunos de distribución que pueden reducir significativamente la cantidad de cálculos necesarios para un análisis de Montecarlo.

En el presente trabajo de grado se utilizará el simulador Risk (Software Shop - Risk Simulator (software-shop.com), ya que cuenta con una versión de prueba de 30 días, funciona como complemento de Microsoft Excel y permite realizar simulaciones de Montecarlo.

Por ultimo y como referencia local, Gonzalez (2021) en su investigación: peritaje físico de accidente de tránsito. Su objetivo fue desarrollar cálculos de velocidad de 7 casos de

accidentes de tránsito del departamento del Huila, y sustentación en juicio de los peritajes.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.0.1. Objetivo General

- Determinar la evitabilidad de accidente de tránsito, en un caso sucedido en el departamento del Huila aplicando la técnica de Montecarlo.

2.0.2. Objetivos Específicos

- Determinar los valores de las variables existentes en el caso analizado.
- Identificar en el caso analizado la probabilidad con el valor más adecuado de acuerdo con los intervalos de las variables escogidas.
- Establecer la mayor certeza con la técnica de Montecarlo dentro de un marco probable y determinar si accidente de tránsito era evitable o no.

Capítulo 3

JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a las Naciones Unidas (ONU) los accidentes de tránsito dejan 1,3 millones de personas muertas y 50 millones más heridas de gravedad en el mundo cada año, afirmando que “Los accidentes en las carreteras son una epidemia silenciosa y ambulante” ONU (2022). La Organización Mundial de la Salud, manifiesta que, desde la invención del automóvil, el número de víctimas mortales es superior a las víctimas mortales de la primera guerra mundial o de las peores epidemias ONU (2022). En Colombia, según reporte de medicina legal, un 45 % corresponde al exceso de velocidad y el 42 % a desobedecer señales de tránsito 4%, por embriaguez y conducir en contravía (3 %) Olaya, (2023); de igual forma la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), el exceso de velocidad es considerado como el principal factor de mortalidad en los siniestros viales, ANSV, (2022).

La Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), a través del Observatorio Nacional de Seguridad Vial (ONSV), identificó 10 ciudades en lo corrido del primer semestre de 2023, que presentó aumento en fallecimiento por causa de accidentes de tránsito, dentro de las cuales se encuentra la ciudad de Neiva, que entre enero y diciembre 2022 se registraron 66 fallecidos. Entre enero y junio 2023 se registraron 36 fallecidos, lo que representa un aumento de 9 personas, en comparación al mismo periodo en 2022, ANSV, (2023). Teniendo en cuenta la anterior información el homicidio culposo es uno de los delitos con

mayor aumento en el departamento del Huila, las investigaciones que son asumidas por la Fiscalía General de la Nación y desarrolladas por investigadores de la Dirección de Investigación Criminal (DIJIN) de la Policía Nacional o Cuerpo Técnico de Investigación (CTI) de la Fiscalía General de la Nación, investigaciones de las cuales solo se limitan a realizar los actos urgentes en el lugar del hecho realizando actividades como: fijación topográfica y fotográfica del lugar del hecho y todas las evidencias físicas (posiciones finales de los vehículos, zona de impacto, todo vestigios con referencias al accidente de tránsito), entrevistas a posibles testigos, solicitud de videos si en el sitio existen cámaras, inspección a vehículos, inspección a cadáver, etc. Ya en el campo de la investigación científica forense y la reconstrucción de accidente de tránsito, estas instituciones (DIJIN, CTI), no cuentan con el personal profesional en física o ingeniería mecánica en el departamento, convirtiéndose como una necesidad en el departamento del Huila; el Semillero de Accidentología del programa de Física de la facultad de ciencias exactas, desarrolla una labor de colaboración con la Fiscalía, el cual se vienen desarrollando en casos de reconstrucción de accidentes de tránsito, que implican cálculos de velocidad fundamentados en las leyes del movimiento, principio universal de conservación de cantidad de movimiento y energía, permitiendo identificar si el factor humano por exceso de velocidad es causa determinante del accidente.

El presente trabajo enfoca su interés en determinar la evitabilidad de un accidente de tránsito; específicamente aplicado a 1 caso real ocurrido, usando el método de Montecarlo, contemplando los valores posibles de las variables relacionadas con la investigación de un accidente y así determinar si se lograba o no evitar el suceso del accidente de tránsito.

Capítulo 4

MÉTODOS TEÓRICOS DE SOLUCIÓN

Uno de los principales interrogantes que se presenta en la investigación y reconstrucción de accidentes de tránsito, es la velocidad de circulación de los vehículo involucrados previa al impacto, la cual se puede hallar a partir de marcas de arrastre o huellas de frenado sobre la carpeta asfáltica e incluso cuando se conoce la distancia de desaceleración, considerando que la posición del vehículo queda al final de la huella, hasta este instante la solución física matemática se da por conservación de energía por fricción y las variables a tener en cuenta son los coeficientes de fricción y la distancia fijada en actos urgentes, distinto es cuando posterior a la huella impactan, y se desplazan formando ángulo entre los dos vehículos, su solución es por conservación de cantidad de movimiento lineal y también se presenta la energía disipada a partir de la deformación residual en los vehículos, la cual se determina mediante el modelo de McHenry y McHenry, (2014) o modelo de Prasad (1990), en estos modelos físicos de solución, se incluyen varias variables como masa, distancias, coeficientes, ángulos, variables que se contemplan en el cálculo de evitabilidad; con la técnica de Montecarlo, se pretende mostrar de manera eficaz y práctica la propagación de errores en el cálculo de la reconstrucción y con ello llegar a estimaciones más realistas y acertadas de los rangos de error más probable para ajustar los informes finales.

Los modelos físicos son algoritmos que involucran una serie de variables y parámetros que reflejan las condiciones en las cuales se desarrolló el accidente; estos desarrollos analíticos se determinan a partir de las leyes de la mecánica clásica, biomecánica, ingeniería y patología. La utilización de estos modelos requiere un alto rigor científico que permita, a partir de la utilización de la matemática y la estadística, llegar a resultados que muestren las condiciones reales ocurridas del accidente, si el modelo físico utilizado para inferir la dinámica de los objetos-cuerpos protagonistas, no contemplan las variables que incidieron sobre el episodio puede conducir a conclusiones equivocadas sobre el hecho. El método de investigación será poco confiable si el modelo físico escogido es muy “sencillo” o no contemplan los aspectos fundamentales del accidente de tránsito que estamos intentando resolver, lo que equivale a no considerar un conjunto importante de variables que influyen sobre la mecánica de los objetos. Decimos entonces que los modelos físicos empleados son “muy simplificados”, o que el reconstructor a simplificado mucho el análisis del accidente para resolverlo.

4.1. RECONSTRUCCIÓN DE UN ACCIDENTE DE TRÁNSITO

La reconstrucción de accidente de tránsito tiene como finalidad determinar los parámetros cinemáticos y seguir la evolución del accidente a partir de las posiciones relativas de las masas que interactúan durante el impacto, con base en modelos físicos matemáticos aplicados al análisis de los diferentes elementos materia de prueba (EMP) y evidencias físicas (EF) hallados y fijados en el lugar de los hechos, Alvarez y Luque (2007).

4.1.1. MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FRENADO

El proceso real de frenado puede modelizarse como formado por dos etapas con valores de deceleraciones claramente diferenciadas, el tiempo de respuesta del sistema mecánico con aceleración (deceleración) creciente lineal (t_0 a t_1) y el campo parcial de deceleración total media con aceleración constante (t_1 a t_2), los cálculos que hay que realizar según esta modelización también consta de dos fases:

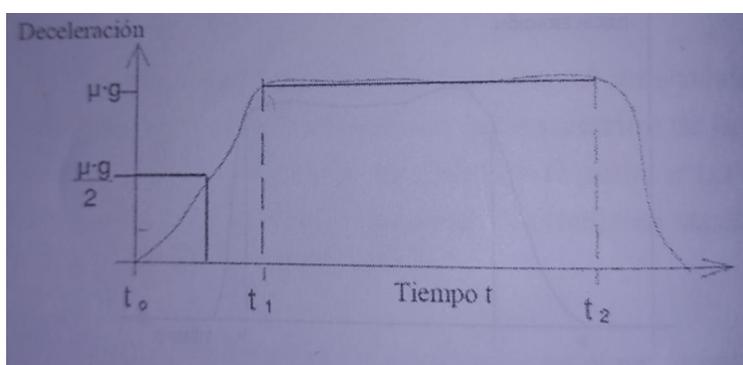


Figura 4.1: Gráfica modelizada de la deceleración obtenida en el caso de frenada

Primera fase: Calcular la velocidad considerando tan solo la longitud de medidas de la huella de frenada "d".

$$\frac{1}{2}mv_{inicial}^2 = \mu mgd + \frac{1}{2}mv_{final}^2 \quad (4.1)$$

$$v_{antesdelbloqueo} = \sqrt{2\mu gd + v_{despuesdelbloqueo}^2} \quad (4.2)$$

Segunda fase: A la velocidad antes calculada, añadir la velocidad perdida por la deceleración debida a la frenada previa al bloqueo de las ruedas:

$$v_{inicial} = v_{antesdelbloqueo} + at = v_{antesdebloqueo} + \frac{1}{2}g\mu t \quad (4.3)$$

Para la aceleración “a” debido a la frenada previa al bloqueo de rueda se adopta un valor medio de $\frac{1}{2}.g.\mu.t$ correspondiente a la recta con la que se ha modelizado esta gráfica. El valor de tiempo de respuesta del sistema de frenado “t” en condiciones optimas puede considerarse igual a 0.25 segundos, Reed y T (1989).

4.2. MECÁNICA DE IMPACTO

Campon et al. (2019) en su texto de física de partículas aplicando las leyes de la mecánica, específicamente la conservación de cantidad de movimiento y, en su caso, de la energía, a las colisiones entre partículas adimensionales o infinitesimal, en condiciones de perfecta plasticidad o elasticidad, se pueden averiguar las velocidades de esas partículas antes del impacto en un escenario bidimensional, pero cuando pasamos del modo limitado y simplificado al mundo real y se aplica las mismas leyes a la colisión entre dos solidos tan complejos como son dos vehículos, tanto la metodología a emplear como la solución a alcanzar se complica.

Una parte importante de la reconstrucción de siniestros viales es la estimación de las velocidades pre-impacto y post-impacto de los vehículos y personas implicadas. Para calcular estos cambios en las velocidades de los vehículos se utilizan las leyes del movimiento de Newton expresadas de acuerdo con los conceptos de impulso y momento Damask, (1995).

4.2.1. Principio de conservación del momento lineal

Este principio según Campon et al (2019), Nos dice que el momento lineal o cantidad de movimiento (p) es el vector resultante del producto de la masa, considerado como escalar y el vector velocidad (v), ambos coinciden en dirección y sentido, Matemáticamente, el momento lineal se define como:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (4.4)$$

Donde m es la masa del objeto en movimiento y v es su velocidad. Por su parte, el impulso mecánico se define como el vector resultante del producto del vector de la fuerza F por el intervalo de tiempo Δt durante el que ésta actúa, considerando como un escalar, el impulso es una magnitud vectorial que tiene la dirección y el sentido de la fuerza que lo produce y se define como:

$$\vec{I} = \vec{F} \Delta t \quad (4.5)$$

Durante una colisión, el momento lineal o cantidad de movimiento se conserva en virtud de la 3ra ley de Newton de acción y reacción, por lo tanto, el momento lineal total de un sistema antes de una colisión es igual al momento total después de la colisión Tomasz y E (2004, p. 10).

La expresión matemática del principio de conservación del momento lineal (PCML) es la siguiente:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (4.6)$$

Cuando dos vehículos colisionan se pone en juego innumerables fuerzas, las que deforman, tuercen y rompen el plástico, los metales y los tejidos humanos. Sin embargo, ninguna de ellas tiene entidad suficiente, como regla general, para afectar al momento global del sistema.

Para que estos conceptos y principios puedan aplicarse a colisiones reales entre vehículos automóviles se deben asumir como ciertas las siguientes condiciones, Lopez y F (2005, P. 35):

1. La duración del impacto de los dos cuerpos es pequeña y durante ese tiempo se desarrollan grandes fuerzas entre los dos cuerpos. Como consecuencia adicional no se produce ningún cambio en la posición de los centros de masas, ya que como la masa se conserva igual y los cambios en la orientación angular de los cuerpos son muy pequeños.

2. Solo se puede analizar un impacto, de tal forma que si hubiese más de uno se debería analizar cada uno independientemente del resto.

3. Los impulsos debidos a las fuerzas externas son de tal magnitud que se puede obviar. Estas fuerzas externas serian el rozamiento entre los neumáticos y la superficie de contacto o la resistencia aerodinámica.

4. El vector impulso tiene una dirección y un punto específico de aplicación, por lo que se considera que el impacto está localizado ahí.

En tales condiciones, el principio de conservación del momento constituye una herramienta simple y directa para estimar los parámetros antes de la colisión a partir del movimiento observado después del impacto.

Antes de aplicar este principio a un caso real es necesario definir un sistema de ejes de coordenadas y de medición de ángulos, para poder conservar la igualdad vectorial (1) en dos igualdades escalares según la proyección de los vectores sobre ambos ejes. En la figura 4,2 : se puede observar el sistema de ejes y la forma de medir ángulos para poder aplicar PCML.

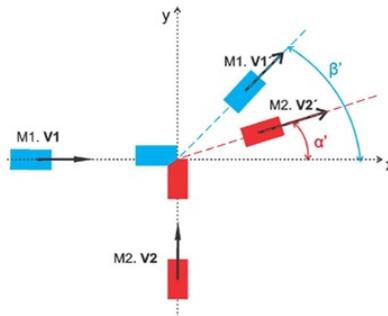


Figura 4.2: Representación de los momentos lineales en un sistema coordenado (x, y) antes y después de un impacto

Aplicando ahora la ecuación de PCML según sus proyecciones sobre sus ejes de coordenadas x e y , quedarían las siguientes ecuaciones:

$$m_1 v_1 \cos(\alpha) + m_2 v_2 \cos(\beta) = m_1 v'_1 \cos(\gamma) + m_2 v'_2 \cos(\theta) \quad (4.7)$$

$$m_1 v_1 \sin(\alpha) + m_2 v_2 \sin(\beta) = m_1 v'_1 \sin(\gamma) + m_2 v'_2 \sin(\theta) \quad (4.8)$$

El método de estimación de los ángulos de entrada en una colisión debe hacerse midéndolos sobre una fotografía o representación gráfica de las posiciones que los vehículos ocupan en el momento del impacto, imagen que se puede conseguir tomando fotografías cenitales de los vehículos deformados.

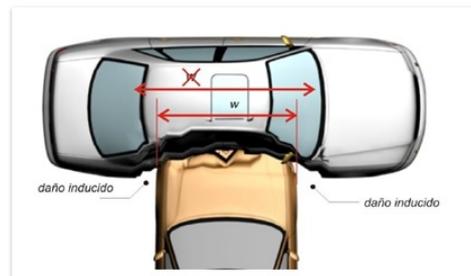


Figura 4.3: Representación gráfica del impacto y su deformación

Por lo contrario, el método de estimación de los ángulos de salida de los vehículos es sensiblemente más complejo. Pasa por describir la trayectoria que el centro de gravedad del vehículo ha realizado desde su posición de impacto hasta su posición final. Se puede determinar gráficamente en el croquis uniendo el centro de gravedad del vehículo con ese mismo punto en la posición final, el ángulo de la recta que los une, según el sistema de medición y el convenio de signos, será el ángulo de salida de ese vehículo. Es obvio que este procedimiento es aproximado y susceptible de error y por lo tanto, se debería intentar minimizar, empleando técnicas de comprobación de los resultados o métodos estadísticos, más o menos, complejos.

4.2.2. Principio de conservación de Energía

Un cuerpo tiene energía cuando tiene capacidad para realizar un trabajo. Existen diferentes tipos de energía que pueden participar en una colisión real entre vehículos:

1. Energía Cinética (E_c), es la energía que posee un objeto de una determinada masa en movimiento al circular a una velocidad determinada.

2. Energía Potencial (E_p), es la energía que posee un cuerpo en relación a su posición en un determinado campo, por ejemplo, el gravitatorio.

3. Energía de rozamiento (E_r), es la energía que se desprende por trabajo de la fuerza de fricción normal a la superficie en contacto.

4. Energía de Deformación (E_d), es la energía absorbida por los materiales y la estructura de cada uno de los vehículos y que produce un cambio en su forma generalmente, en forma de acortamiento y compresión.

5. Energía Calorífica (E_c), para detener el vehículo se ha utilizado el sistema de frenado y por el rozamiento de los frenos o zapatas contra los discos o tambores, estos desprenden calor.

De acuerdo con el principio de conservación de la energía (PCE), la energía ni se crea, ni se destruye, tan solo se transforma, como por ejemplo, un vehículo en movimiento, dotado de una determinada energía cinética, se detiene por la aplicación del sistema de frenos, transformando esa energía cinética en energía de rozamiento entre los neumáticos y calorífica en el sistema de frenado. El resto de formas de energía, ya sea calorífica o sonoras, simplemente se desprecia por su poca influencia en el resultado final y por la dificultad de la estimación del cálculo de su magnitud.

Por lo tanto, después del impacto en una colisión entre vehículos la energía cinética no siempre se conserva. Esto ocurre solamente cuando es nula la resultante de las fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema, y además el trabajo de las fuerzas interiores es nulos (Aparicio Izquierdo, et al., 2002)

4.2.3. Modelos para el cálculo de la energía de deformación

Los primeros avances para conseguir un modelo de la deformación que se produce en una colisión entre vehículos tiene como punto de partida los trabajos realizados en Europa por la Fiat, entre los años 1962 y 1968 y Locati y L (1964). En 1968, Emori fue uno de los primeros investigadores en analizar el comportamiento dinámico de impacto de los vehículos en colisiones frontales y traseras con el objetivo de mejorar la seguridad pasiva de sus ocupantes.

Modelo Campbell

Poco tiempo después, Campbell desarrolló una relación empírica entre la deformación residual y la velocidad de impacto de barrera, a partir de los datos obtenidos en los crash test, llevados a cabo por la General Motors, empresa para la que trabajaba Campbell y K (1974).

Modelo McHenry

Raymond McHenry utilizó, al año siguiente, el trabajo de Campbell para el programa CRASH, que en uno de sus módulos, calculaba la velocidad de impacto a partir del perfil de deformación residual del vehículo, Campon et al. (2019P,177). En este modelo se propuso una dependencia lineal entre la fuerza que actúa el vehículo y la deformación permanente.

Modelo de Prasad

El modelo lineal de McHenry fue la base del algoritmo del cálculo de la energía de deformación del programa CRASH 2. A mitad de la década de los ochenta se comprobó que el uso de los coeficientes de rigidez de las tablas basadas en experimentos de colisión de la NHTSA (National Highway traffic Safety Administration), que se utilizaban en este modelo, para una reconstrucción específica de una determinada colisión entre

vehículos estaba sujeta a un amplio margen de error. Para superar este problema se desarrollaron cuatro modelos diferentes de respuesta estructural al impacto (strother, et al., 1986, p,265).

4.3. APLICACIÓN CONJUNTA DE AMBOS PRINCIPIOS DE CONSERVACIÓN

Las leyes que en física tienen máximo interés son las leyes de conservación, que enuncian las condiciones en las que una determinada magnitud física (masa, carga, energía y momento lineal) permanece constante en el transcurso de un fenómeno. Entre ellas están las referidas a la conservación de la masa y de la energía que fueron agrupadas por Einstein en una sola que se refiere a la conservación de la masa y de la energía, en un sistema aislado, del conjunto de ambas magnitudes, y las que se refiere a la conservación del momento lineal y angular, Burbano de Ercilla et al., (2003, p. 152). Su aplicación conjunta permite resolver una amplia gama de casos de colisiones reales entre vehículos.

De acuerdo con el principio de conservación de momento lineal y según las proyecciones sobre ambos ejes se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\text{Sobre el eje } x: m_1 v_1 \cos(\alpha) + m_2 v_2 \cos(\beta) = m_1 v'_1 \cos(\gamma) + m_2 v'_2 \cos(\theta)$$

$$\text{Sobre el eje } y: m_1 v_1 \sin(\alpha) + m_2 v_2 \sin(\beta) = m_1 v'_1 \sin(\gamma) + m_2 v'_2 \sin(\theta)$$

Con el arreglo al principio de conservación de la energía se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 + E_{d1} + E_{d2} \quad (4.9)$$

Donde E_{d1} y E_{d2} son la energía de deformación. En el caso general, al plantear el sistema de ecuaciones siempre se tiene más incógnitas que ecuaciones, el uso de estos conceptos, principios y leyes requiere realizar simplificaciones para poder aplicarlos de forma práctica a la reconstrucción técnica del accidente de tránsito.

Para poder acceder a una solución única, con una estimación adicional del error probable cometido, el investigador deberá estimar los valores de algunos de los parámetros, utilizar relaciones empíricas o acudir a otros sub-parámetros, principalmente:

- Coeficiente de rozamiento (μ) entre llantas y las superficies de contacto.
- La energía disipada en la deformación (E_d), que se calcula indirectamente a través de la estimación de los coeficientes de rigidez de las diversas zonas del vehículo.
- Los ángulos de salida de la colisión de los vehículos en la fase post-impacto.

A algunas variables se les asigna un valor estimado, pero técnicamente razonable apoyado en tablas o valores de referencia halladas en la literatura universal aplicadas a estos casos, por lo tanto, hay que comprender que los métodos de reconstrucción de accidentes de tránsito, sea cual sea el que se utilice no pueden ser completamente precisos, o en otras palabras ningún reconstructor puede afirmar que sus resultados son 100 % precisos y fiables.

La incertidumbre en los datos recogidos en el procesamiento de la escena y otros datos de entrada necesarios para resolver el complejo sistemas de ecuaciones hace necesario en cada proceso de reconstrucción técnica realizar un análisis de las limitaciones del método o técnica utilizado y del error probablemente cometido. El error siempre existe generalmente a causa del desconocimiento de un cierto porcentaje de condiciones, circunstancias

e, incluso, de la propia configuración y desarrollo del accidente de tránsito. El error en que incurre es, posiblemente, el resultado de las simplificaciones que tiene que realizar en esta metodología. Las propias leyes y principios en determinadas circunstancias no son un modelo preciso de la realidad, además, el hecho de utilizar parámetros que realmente son desconocidos o difícilmente calculables y que se estima a partir de coeficientes expresados en tablas (coeficientes de rozamiento, coeficientes de rigidez, ...) lo que implica necesariamente un cierto grado de error, esto no significa que el investigador sea responsable del error, sino que es técnicamente imposible no cometer ningún porcentaje de error, lo que debe de intentar es minimizarlo.

En este trabajo de grado, se pretende abordar el tema de la colisión entre vehículos no desde un punto de vista determinístico sino desde un punto de vista aleatorio, para esto, se consideran las variables involucradas en la colisión como variables aleatorias, ya que de esta forma podemos considerar los muchos posibles escenarios que no se consideran en el momento del perito. Siendo así, es posible determinar algunas medidas estadísticas de las variables en cuestión.

4.4. EVITABILIDAD FISICA DEL ACCIDENTE DE TRANSITO

La evitabilidad es la posibilidad o imposibilidad reales existentes para evitar un accidente, que realmente ocurrió, mediante las acciones ejecutadas por cada uno de los conductores implicados. Para entrar a desarrollar el método de análisis de evitabilidad es conveniente hacer la distinción de riesgo de accidente y peligro del accidente. Un riesgo es una situación que puede evolucionar hasta convertirse en peligrosa. Las señales de prevención son avisos de riesgos, un peligro es una situación tal que, de no modificarse lo suficiente algunos de los parámetros cinemáticos de los conductores, finalizaran en

accidentes o siniestros viales.

Desde el punto de vista cinemático y dinámico, la prevención de accidentes de tráfico se centra en comprender y aplicar principios relacionados con el movimiento y las fuerzas que actúan sobre los vehículos en movimiento. Aquí hay una explicación de ambos conceptos:

1. Cinemática: La cinemática se refiere al estudio del movimiento de los objetos sin tener en cuenta las causas del movimiento. En el contexto de la prevención de accidentes de tráfico, la cinemática se utiliza para analizar cómo cambia la posición, la velocidad y la aceleración de un vehículo con el tiempo, sin considerar las fuerzas que lo afectan. Por ejemplo, al aplicar la cinemática, los conductores pueden calcular distancias de frenado basadas en la velocidad inicial, la velocidad de frenado y el tiempo de reacción.

2. Dinámica: La dinámica, por otro lado, se centra en las causas del movimiento, es decir, las fuerzas que actúan sobre un objeto. En el contexto de la prevención de accidentes de tráfico, la dinámica se utiliza para comprender cómo las fuerzas, como la fricción entre los neumáticos y la carretera, la masa del vehículo y las fuerzas de frenado, afectan el movimiento del vehículo. Por ejemplo, la dinámica se puede aplicar para determinar cómo la fuerza de frenado afecta la velocidad y la distancia de detención de un vehículo.

Para evitar accidentes de tráfico desde el punto de vista cinemático y dinámico, los conductores deben tener en cuenta factores como la velocidad del vehículo, la distancia de frenado, el tiempo de reacción y las condiciones de la carretera. Al comprender cómo estos factores influyen en el movimiento de los vehículos, los conductores pueden tomar decisiones informadas para mantener una conducción segura y prevenir colisiones.

4.4.1. Distancias cinematicas y evaluacion de acciones

La evaluación de acciones en el contexto de distancias cinemáticas se refiere al análisis de los efectos de diferentes acciones o decisiones sobre el movimiento de un objeto o sistema. Esto implica examinar cómo cambios en variables como la velocidad, la aceleración, el tiempo o la dirección afectan las distancias recorridas o la trayectoria seguida por un objeto en movimiento.

4.4.2. Distancias de percepción, reacción y total

La distancia total de parada en un accidente de tráfico es la suma de las distancias que un vehículo recorre durante la percepción del peligro, la reacción del conductor y la frenada hasta detenerse completamente. Esta distancia incluye:

1. Distancia de percepción: Es la distancia que el vehículo recorre desde que el conductor detecta un peligro potencial hasta que decide pisar el freno. Esta distancia está influenciada por la velocidad del vehículo, las condiciones del conductor (por ejemplo, fatiga o distracciones) y las condiciones del entorno (como la visibilidad y el estado de la carretera).

2. Distancia de reacción: Es la distancia que el vehículo recorre mientras el conductor está reaccionando ante el peligro percibido, es decir, desde el momento en que decide frenar hasta que efectivamente pisa el pedal del freno. Esta distancia también depende de la velocidad del vehículo y del tiempo de reacción del conductor.

3. Distancia de frenado: Es la distancia que el vehículo recorre una vez que se ha activado el sistema de frenos hasta detenerse por completo. Esta distancia está determinada principalmente por la velocidad del vehículo, las condiciones de los frenos y la adherencia de los neumáticos con la superficie de la carretera.

La distancia total de parada es una medida importante para comprender la capacidad de un vehículo y su conductor para detenerse de manera segura en caso de una emergencia o peligro en la carretera. Además, factores como la velocidad, la capacidad de frenado del vehículo y las condiciones de la carretera pueden afectar significativamente esta distancia.

La distancia total de parada se expresa con la siguiente ecuación:

$$d_{tp} = \frac{v^2}{2g\mu} + vt \quad (4.10)$$

4.4.3. Tiempos de Reacción y Decisión

Los tiempos de reacción y toma de decisiones juegan un papel crucial en los accidentes de tránsito, ya que pueden influir en la capacidad de evitar una colisión o mitigar sus efectos.

Tomar una acción evasiva requiere la identificación de peligros, la toma de decisiones y la implementación de acciones evasivas. el tiempo requerido para la identificación del peligro se suele denominar tiempo de percepción. el tiempo requerido para la toma de decisiones y para comenzar la implementación de acciones evasivas generalmente se conoce como tiempo de reacción. El tiempo de percepción-reacción es el tiempo requerido para identificar un peligro, tomar la decisión de qué hacer para evitar el peligro y comenzar la implementación. se produce cierta confusión, ya que todo el proceso se denomina con frecuencia tiempo de reacción o tiempo de reacción total. diferentes autores en el campo de la reconstrucción de accidentes tienen diferentes tiempos y descripciones para estos eventos.

El tiempo de percepción se puede definir como un lapso de tiempo entre el momento en que un conductor ve una situación y la reconoce como un peligro... En situaciones normales de tráfico, el tiempo de percepción promedio es de aproximadamente 0.75 o un segundo. El tiempo de reacción puede definirse como el tiempo requerido para decidir si girar, frenar o acelerar, y para actuar sobre esta decisión una vez que se ha reconocido un peligro. El tiempo de reacción incluye el proceso de toma de decisiones, así como su implementación. El tiempo de reacción promedio también es aproximadamente 0.75 de segundo... los tiempos combinados de percepción y reacción ascienden a 1,5 segundos, J.C COLLINS (1979).

el tiempo de reacción es el tiempo requerido desde la percepción hasta el inicio del control del vehículo para operaciones tácticas o estratégicas.” se hace referencia a cuatro tipos diferentes de reacciones, reacciones reflejas, reacciones simples, reacciones complejas. Las reacciones complejas son aquellas en las que no se ha tomado una decisión de antemano. el tipo de reacciones que ocurren en una situación de emergencia. ”Normalmente

se pueden requerir de 0.5 segundo a 2 segundos, Standard Baker (1980).

Victor Irureta, en su libro *Accidentologia vial y pericia*. Definio como reaccion compleja el tiempo de reaccion de 1 segundo, y tiempo de reaccion total de 1.5 segundos, que es la utilizable en la mayoria de los accidentes; obedece a la seleccion de respuestas posibles habituales; ocurre ante situaciones inesperadas; estan presentes todas las etapas de la percepcion-reaccion, aunque pueden estar superpuestas.

4.5. MEDIDAS ESTADÍSTICAS

Las medidas estadísticas se utilizan para describir la variabilidad o la dispersión de un conjunto de datos. Ayudan a comprender cuán dispersos o agrupados están los valores dentro de un conjunto de datos. Algunas de las medidas de dispersión más comunes son:

4.5.1. Rango

El rango es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en un conjunto de datos. Es una medida simple de la dispersión y proporciona información sobre la amplitud de los datos.

4.5.2. La media

La media aritmética, comúnmente conocida como "promedio", se calcula sumando todos los valores en un conjunto de datos y dividiendo la suma por el número de datos, es una medida de ubicación central que se ve afectada por todos los valores en el conjunto, su expresión es la siguiente:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (4.11)$$

donde X_i es el numero datos dentro de la variable aleatoria y N es el número de datos.

Mediana

La mediana es el valor de la variable que divide la serie estadística ordenada en dos partes iguales, dejando tanto valores por encima como por debajo y pos consiguiente la frecuencia a uno y a otro lado de la mediana también son iguales.

4.5.3. Desviación estandar

La desviación estándar mide cuánto se desvían los valores individuales de la media de un conjunto de datos. Es una de las medidas de dispersión más utilizadas. Una desviación estándar más grande indica una mayor dispersión, mientras que una desviación estándar más pequeña indica una menor dispersión.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (4.12)$$

4.5.4. Varianza

La varianza es el cuadrado de la desviación estándar, al igual que la desviación estándar, proporciona información sobre la dispersión de los datos. Una varianza mayor indica una mayor dispersión, se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (4.13)$$

4.5.5. Coeficiente de variación

El coeficiente de variación es la desviación estándar dividida por la media, expresada como un porcentaje, se utiliza para comparar la dispersión relativa entre dos conjuntos de datos con diferentes escalas.

4.6. SIMULACIÓN DE MONTECARLO

Se llama “de Montecarlo”, en alusión a las ruletas del casino de ese principado, a cualquier técnica que use números aleatorios para resolver un problema, James (1980). La idea básica de la técnica de Montecarlo es que si conocemos el rango en el que se encuentran nuestras variables de entrada, podemos seleccionar al azar un valor posible para cada variable de ese rango y ejecutar el análisis para obtener el resultado, Bartlet (2007).

Los métodos de simulación estadística puede compararse con los métodos convencionales de discretización empleados en el modelo de sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. Con Montecarlo los procesos físicos pueden ser simulados directamente, aún sin plantear las ecuaciones que describen el sistema. El principal requisito es disponer de una función de densidad de probabilidades inherente a la descripción del proceso en estudio.

Una vez conocida una función de densidad de probabilidades, la simulación Montecarlo procede con un muestreo aleatorio sobre la función densidad de probabilidad. Se hace muchos ensayos pruebas, y se obtiene resultados promedios a partir de algunas o

miles de pruebas, según sea el caso.

La evaluación se repite un número estadísticamente válido de veces y el resultado del análisis es una probabilidad de distribución en lugar de un único valor, el investigador puede entonces usar la distribución de probabilidad para estimar tanto el rango de valores “más probable” para la solución y la tasa de error probable.

4.6.1. FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD

La función de densidad de probabilidad en estadística es la que describe la probabilidad relativa según la cual dicha variable aleatoria tomará determinado valor. Ayuda a calcular la probabilidad de que la variable aleatoria continua, asuma un valor entre el intervalo asignado.

Existen varias funciones y distribuciones de probabilidades, pero las dos más importantes para el campo de la accidentología son:

1. Distribución uniforme: Con la distribución uniforme todos los valores caen entre el mínimo y el máximo y ocurren con la misma probabilidad

Siendo a : mínimo y b : máximo en el intervalo $[a, b]$

Función densidad:

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & \text{si } a < x < b \\ 0 & \text{otros valores de } x \end{cases} \quad (4.14)$$

Distribución: $F(x) = (x - a)/(b - a)$

Variable aleatoria: $x = a + (b - a)r$

Siendo r una variable aleatoria independiente con distribución uniforme en el intervalo

$[0, 1]$

la media (μ) es $\frac{(b+a)}{2}$

2. Distribución normal es la más importante distribución en teoría de probabilidad porque describe muchos fenómenos naturales.

Función densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \text{EXP} \left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.15)$$

Variable aleatoria:

$$x = \left[\left(\sum_1^{12} n - 6 \right) \sigma + \mu \right]$$

Para n=12 valores de r.

4.7. APLICACION DE MONTECARLO

El amplio campo de acción de la simulación de Montecarlo se explica por que este método transforma un modelo determinístico en un modelo probabilístico.

Un modelo probabilístico es un modelo que toma un conjunto de entradas, de las cuales por lo menos una sigue una distribución de probabilidad, y produce una o más salidas n distribución de probabilidad.

4.7.1. Montecarlo y evaluación de integrales

Considerar la siguiente integral:

$$I = \int_a^b g(x) dx \text{ considerando } g(x) = g'(x)$$

Se tiene $I = (b - a) g'(x)$

$$\text{Donde: } x = (b - a) r$$

Siendo r una variable aleatoria continua con distribución uniforme sobre el intervalo $[0, 1]$

Por consiguiente:

$$I = \frac{b - a}{n} \sum_1^n g(x) \quad (4.16)$$

El enfoque básico del método de Montecarlo implica los siguientes pasos:

Definir el problema: Se debe establecer claramente el problema que se desea resolver y expresarlo en términos matemáticos.

Generar números aleatorios: Se generan números aleatorios que siguen una distribución específica, dependiendo del problema, estos números aleatorios se utilizan para muestrear el espacio de soluciones.

Muestreo de datos: Utilizando los números aleatorios generados, se toman muestras en el espacio de soluciones, las muestras pueden ser puntos en un dominio, valores de variables, o cualquier otra cantidad relacionada con el problema.

Estimar la solución: A partir de las muestras obtenidas, se calculan estimaciones numéricas de la solución del problema, esto puede implicar calcular promedios, sumas ponderadas o realizar otras operaciones estadísticas.

Las ecuaciones específicas que se utilizan en el método de Montecarlo dependerán del

problema que se esté abordando.

Capítulo 5

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la determinación de la evitabilidad en un accidente de tránsito entre dos vehículos en una intersección en el municipio de Neiva, usando la técnica de Montecarlo.

5.0.1. Análisis del choque

El accidente de tránsito analizado se produce entre dos vehículos como se muestra en la figura 5.1 en las posiciones finales. El vehículo No. 1 camioneta marca Renault, línea Captur, modelo 2021, donde se desplazaban dos personas en su interior (conductor, acompañante), el cual transitaba sentido Norte-Sur. El vehículo No. 2 automóvil marca Renault, línea Sandero, modelo 2012, donde se desplazaba una persona (conductor), el cual se transitaba sentido oriente occidente, la zona de impacto identificada en el inicio de la evidencia No. 2 (huella de arrastre metálico), el tipo de choque fue por un “choque lateral izquierdo oblicuo”, Ramos Henríquez y Quiroga Amaya, (2017, pág. 25).

No se registraron marcas antes del impacto. Las condiciones de la calzada era una superficie en material asfalto buena, seca y limpia. Posterior al impacto y teniendo en cuenta la zona dañada por contacto directo en el costado izquierdo del vehículo No. 1 la camioneta se desplaza en sentido perpendicular a su desplazamiento dejando una huella de arrastre metálico de 9.88 metros (evidencia No.2), se infiere que el producto de esta

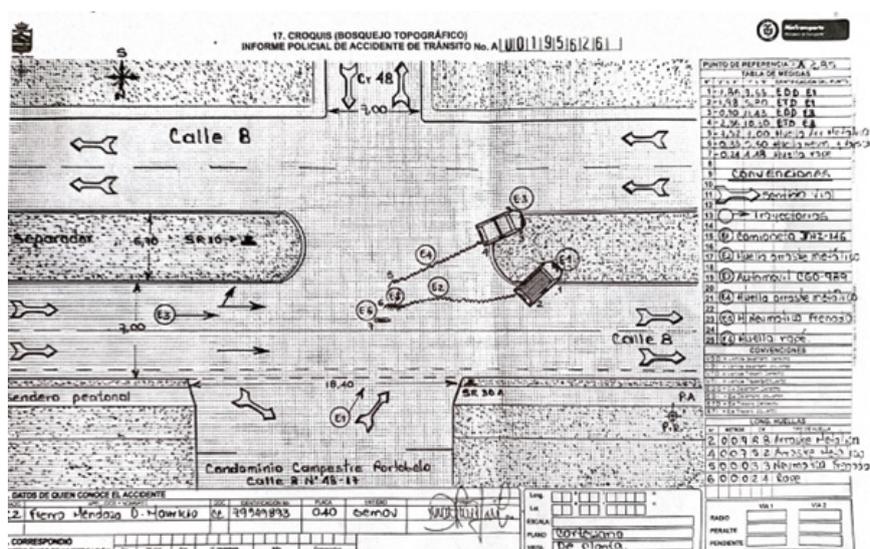


Figura 5.1: Imagen del informe policial de accidente de tránsito (IPAT), diligenciado por la autoridad de tránsito.

huella es por el aplastamiento y fractura de la llanta delantera izquierda hasta su posición final, previo a esta huella en el plano y en la fotografía aérea se observa una huella de derrape (evidencia No. 6), que según la autoridad de tránsito fue de 0.24 metros, esta huella de acuerdo a su desplazamiento no corresponde como huella de derrape sino que se infiere una huella de arrastre de llanta.

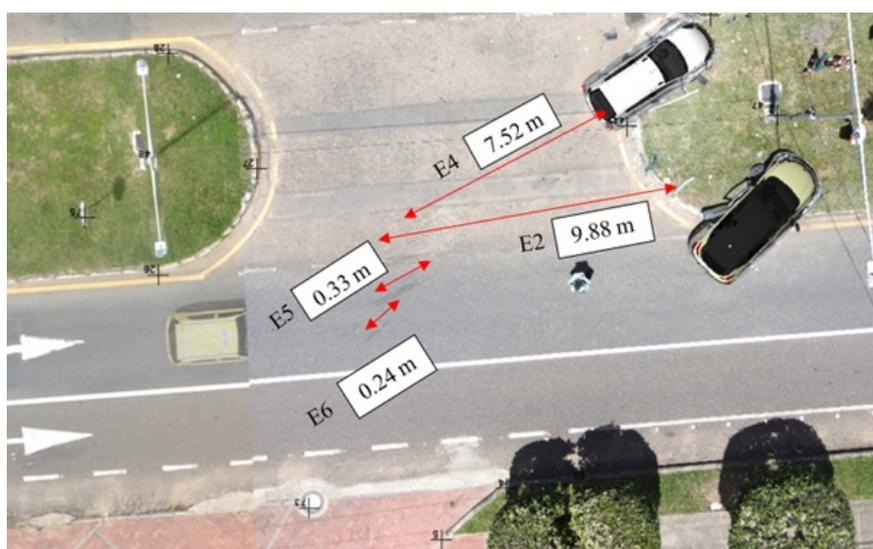


Figura 5.2: Fotografía aérea aportada por testigo y tomada con dron mavic air 2 se observa las evidencias fijadas topográficamente por la autoridad de tránsito

El vehículo No. 2, se desplaza después del impacto dejando una huella de arrastre

metálico de 7.52 metros (evidencia 4), antes de ésta se observa una huella de frenada de 0.33 metros, dejada por el vehículo No. 2 (evidencia No. 6). En la carpeta del caso, no hay evidencias de fallas mecánicas por parte de los vehículos, por lo cual se considera en buenas condiciones mecánicas antes del choque. Inicialmente las autoridades de tránsito escribieron como hipótesis: 132: no respetar la prelación: No detener el vehículo o ceder el paso, cuando se ingresa a una vía de mayor prelación donde no existe señalización y 157: otra: por establecer el posible exceso de velocidad de acuerdo a deformación y posición final de los vehículos, Ministerio de transportede Colombia (2012, Resolucion 0011268).

Del análisis de las hipótesis, la 132: no respetar la prelación, es una de las hipótesis mas claras atribuida al vehículo No.1, de acuerdo a su trayectoria pre-impacto; pero con respecto a la segunda hipótesis no estaba solucionada; dentro del procedimiento que se realizo para hallar la velocidad se inicio con el cálculo de energía cinética que se disipó en ambos vehículos por fricción luego del impacto, teniendo en cuenta los datos aportados y recolectados por la autoridad de tránsito en el lugar del hecho (evidencias); posterior al impacto con la ley de conservación de momento lineal en el choque de acuerdo a la dinámica del accidente se infiere que todo el momento lineal fue en sentido de la calle 8 y fue aportada por el vehículo No. 2 Sandero, con una pequeña contribución por el vehículo No. 1.

Los valores de las distancias de las evidencias (huellas de arrastre y huella de frenado) en dinámica post-impacto, se obtuvieron de acuerdo a las medidas fijadas topográficamente en el lugar del hecho y plasmadas en el informe policial de accidente de tránsito (figura 5.1 y 5.2), pero se infiere una medida que se deben tomar en cuenta de acuerdo a la fotografía aérea tomada con el dron y escalada en software de reconstrucción trimble forensics, que no corresponde a las medida real y por error humano, se pudo consignar mal la medida por lo cual se tiene en cuenta la medida que se observa en la figura 5.3.

Las velocidades post-impacto se calculan por el principio conservación de energía, el rango los valores de coeficientes de fricción, se basó en los extremos para asfalto seco y viejo detallados en la literatura publicada por Bartlett, (2007), los demás coeficientes de

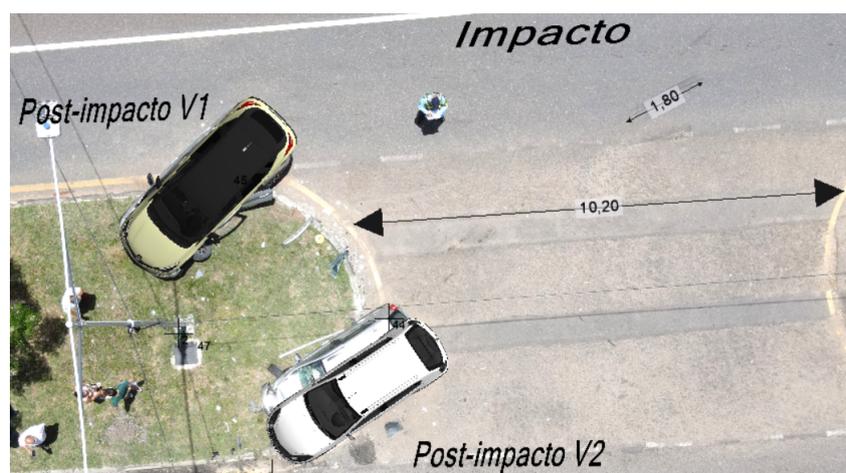


Figura 5.3: Fotografía aérea aportada por testigo y tomada con dron mavic air 2 se observa las evidencias fijadas topográficamente por la autoridad de tránsito

fricción como huella de arrastre metálico se usaron de acuerdo a la literatura publicada por Irureta, (2011), los límites de las distancias son teniendo en cuenta las fijadas topográfica por la autoridad tránsito y las distancias procesadas por la fotografía aérea.

Variable para el cálculo de velocidad post-impacto, por conservación de energía.

Variable	Rango	Distribución
Huella de arrastre Vehículo 1	(9.88 ± 0.10) m	Normal
Huella de arrastre Vehículo 2	(7.52 ± 0.10) m	Normal
Huella de frenado Vehículo 2	(1.568 ± 0.235) m	Normal
coeficiente de arrastre (metal-asfalto)	$0.35 \geq \mu_{v1} \leq 0.50$	Uniforme
coeficiente de arrastre (llanta-asfalto)	(0.76 ± 0.06)	Normal

Tabla 5.1: Valores de las variables y sus respectivos rangos y distribuciones

Los ángulos pre-impacto y ángulo post-impacto, se tomaron de acuerdo con las evidencias fijadas topográfica y fotográficamente; los límites de las masas de los vehículos se tomaron con las especificaciones técnicas de la casa ensambladora de cada vehículo, como límite máximo en orden de marcha, mientras que el límite mínimo de acuerdo a la

información aportada de los expedientes de la Fiscalía tomados en actos urgentes.

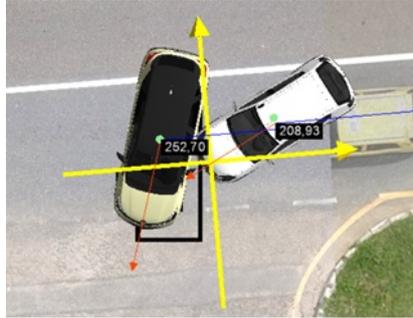


Figura 5.4: Ángulos de entrada teniendo en cuenta las trayectorias de los vehículos

Variables para el cálculo de velocidad inicial por conservación de momento lineal no perpendicular:

Variable	Rango	Distribución
velocidad post-impacto Vehículo 1	$(9.06 \pm 0,46)$ m/s	Normal
velocidad post-impacto Vehículo 2	(9.20 ± 0.40) m/s	Normal
Masa vehículo 1	(1382-1412) kgm	Normal
Masa vehículo 2	(1597-1627)kgm	Normal
angulo de aproximación vehículo 1	$247^{\circ} \leq \alpha_{v1} \leq 257^{\circ}$	uniforme
angulo de aproximación vehículo 2	$203^{\circ} \leq \alpha_{v2} \leq 213^{\circ}$	uniforme
angulo de salida vehículo 1	$210^{\circ} \leq \theta_{v1} \leq 220^{\circ}$	uniforme
angulo de salida vehículo 2	$211^{\circ} \leq \theta_{v2} \leq 221^{\circ}$	uniforme

Tabla 5.2: Valores de las variables y sus respectivos rangos y distribuciones

5.0.2. Análisis físico del accidente de tránsito

El fundamento físico es de suma importancia, en la investigación y reconstrucción de un accidente de tránsito, los cuales están vinculadas con las velocidades de circulación de los vehículos involucrados, posiciones relativas, momentos post-impacto, pre-impacto y

velocidad por deformación; en este caso de acuerdo a las deducción analítica, se utilizaron modelos físicos basados en las leyes física de la cinemática y la dinámica.

Modelo por fricción simple sin pendiente para cálculo de velocidad post-impacto

Como primer paso, se utilizó el principio de conservación de la energía, entre el momento inmediatamente posterior al impacto y el momento en que alcanza la posición final el vehículo 1.

$$v_{1post} = \sqrt{2g\mu d} \quad (5.1)$$

Donde:

d = distancia máxima de la huella de arrastre metálico evidencia No. 2 (9,88metros).

g = valor de la aceleración (9,8m/s²)

μ =coeficiente de rozamiento metal sobre asfalto (0,35 – 0,50)

Resultados: velocidad min: 8,17m/s, Velocidad maxima: 9,90m/s, velocidad media: 9,06m/s \pm 0,46.

Modelo por fricción simple sin pendiente para cálculo de velocidad post-impacto, con dos coeficientes diferentes

Se utilizó el principio de conservación de la energía, entre el momento inmediatamente posterior al impacto, donde quedaron marcadas dos huellas sobre la superficie, la primera huella fue de neumático por frenada y la segunda huella fue de arrastre metálico hasta la posición final del vehículo 2.

$$\Delta V = [(2g\mu_1d_1) + (2g\mu_2d_2)]^{1/2} \quad (5.2)$$

Donde:

d_1 = distancia maxima de la huella de neumatico por frenada evidencia No. 5. (1,568 \pm

0,235)m

g = valor de la aceleración ($9,8m/s^2$)

μ_1 =coeficiente de rozamiento llanta sobre asfalto ($0,72 \pm 0,06$)

d_2 = distancia maxima de la huella de arrastre metalico evidencia No. 4. ($7,52 \pm 0,10$)m

μ_2 =coeficiente de rozamiento metal sobre asfalto (0.35-0.50).

Resultados: Velocidad min: $8,11m/s$, velocidad max: $10,24m/s$, velocidad media: $9,20m/s \pm 0,40$

Modelo momentum lineal-caso bi-dimensional

Como segundo paso, se utilizó el principio de conservación de momento lineal bi-dimensional, donde después de colisionar se proyectan friccionando sus ruedas hasta detenerse. La planimetría hecha en el lugar muestra la distancia recorrida posterior al impacto y el primer ángulo en la separación o salida del vehículo.

$$V_1 = \frac{W_1 V_3 (\cos(\theta) \sin(\psi) - \sin(\theta) \cos(\psi)) + W_2 V_4 (\cos(\varphi) \sin(\psi) - \sin(\varphi) \cos(\psi))}{W_1 (\cos(\alpha) \sin(\psi) - \sin(\alpha) \cos(\psi))} \quad (5.3)$$

$$V_2 = \frac{W_1 V_3 (\cos(\theta) \sin(\alpha) - \sin(\theta) \cos(\alpha)) + W_2 V_4 (\cos(\varphi) \sin(\alpha) - \sin(\varphi) \cos(\alpha))}{W_2 (\cos(\psi) \sin(\alpha) - \sin(\psi) \cos(\alpha))} \quad (5.4)$$

Donde:

V_1 y V_2 = son las velocidades pre-impacto (ver tabla 5.2). W_1 = masa del vehículo 1 y W_2 = masa del vehículo 2 (ver tabla 5.2)

V_3 = Velocidad post-impacto vehículo 1 y V_4 = velocidad post-impacto vehículo 2

θ = Ángulo de salida V_1 (ver tabla 5.2)

ψ = Ángulo de aproximación V_2 (ver tabla 5.2)

φ = Ángulo de salida V_2 (ver tabla 5.2)

α = Ángulo de aproximación V_2 (ver tabla 5.2)

Resultados: Velocidad min V1: Velocidad min V1: 0km/h , velocidad max: $24,37\text{km/h}$, velocidad media: $12,25\text{km/h} \pm 0,40$

Resultados km/h : Velocidad min V2: Velocidad min V1: $43,71\text{ km/h}$, velocidad max: $66,06\text{ km/h}$, velocidad media: $53,43\text{ km/h} \pm 3,79$

Cálculo de la energía de deformación a partir del perfil de deformación

La medición del perfil de deformación de un vehículo implicado en un accidente de tránsito, es útil para el cálculo de la energía de deformación necesaria para producir esos daños, para este caso se tuvo solo acceso al vehículo No. 1, donde se tomaron fotografía alrededor del vehículo y vídeos, según las indicaciones para el uso y manejo del programa de EyesCloud3D, plataforma www.eyescloud3d.com dispositivo que genera modelos en 3D y permite calcular la velocidad y energía de deformación plástica (Eyescloud3d, 23)

Análisis de Deformación

Parámetro	Valor
Energía de Deformación	141309 J
Ángulo de Impacto	23 °
Velocidad Equivalente de Barrera	46 km/h

Figura 5.5: Resultado del analisis de deformación, velocidad equivalente de barrera con software Eyescloud3d

Considerando el porcentaje de error aceptable del 12 % de los valores reales la velocidad por deformacion queda asi:

$$(46 \pm 5,52) \text{ km/h o } (12,77 \pm 1,53) \text{ m/s}$$

Suma de velocidades del vehículo No. 2 (conservación de momento lineal y energía de deformación)

Velocidad pre-impacto, considerando la energía de deformación.

$$v_o = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots v_n^2} \quad (5.5)$$

Donde:

v_1 = velocidad por conservación de momento lineal $53,43 \pm 3,79$ km/h.

v_1 = velocidad por conservación de momento lineal $46 \pm 5,52$ km/h.

Resultados: $70,50 \pm 4,74$ km/h o $19,55 \pm 1,32$ m/s.

Modelo de calculo de tiempo y distancia a velocidad constante y distancia total de parada

Tiempo V1

Tiempo que recorre una distancia el vehículos No. 1 desde el momento donde inicia a generar el riesgo hasta el punto de impacto, con velocidad media calculada, es el tiempo con el que se puede hallar la distancia del vehículo No. 2 a la velocidad calculada.

$$t = \frac{d}{v} \quad (5.6)$$

Donde:

$d = 8$ metros Es la distancia desde el borde de via hasta la zona de impacto.

$v = 3,35$ m/s, Velocidad media calculada del V1 calculada

Resultados: tiempo 2,39 segundos.

Distancia V2

la distancia de posición del vehículo No.2 con velocidad constante, con el tiempo empleado por el vehículo No. 1 desde que genero el riesgo, hasta la zona de impacto hallado en la ecuación 5.5

$$d = v * t \quad (5.7)$$

Donde:

$v = 19,55$ m/s Es la velocidad media del V2.

$t =$ tiempo calculado del V1 2,39 segundos.

Resultados: 46,72 metros

Distancia total de Parada a velocidad calculada del vehiculo No. 2

Es la distancia y posicion del vehiculo No. 2 desde el momento de percepción, decisión y reacción, de acuerdo a la velocidad transitada o velocidad permitida. Para este caso se hallaron las dos distancias para cálculo de evitabilidad.

$$D_{tp} = \frac{v_i^2}{2g\mu} + t_r v_i \quad (5.8)$$

Donde:

D_{tp} = Es la distancia total de parada.

v_i^2 = Velocidad inicial calculada.

g = valor de la aceleración

μ_1 = coeficiente de rozamiento llanta sobre asfalto

t_r = Timpo de reaccion.

Resultados: Distancia minima: 36.69 metros, Distancia Maxima: 66.07 metros, Distancia Media: 50.37 metros

Distancia total de Parada segun velocidad del sector

Resultados: Distancia minima: 9.05 metros, Distancia Maxima: 25.15 metros, Distancia Media: 15.22 metros

Teniendo las dos distancias calculadas y determinadas la distancia de reacción, como se observa en la figura 5.6 se determina la evitabilidad del accidente de tránsito a continuación.

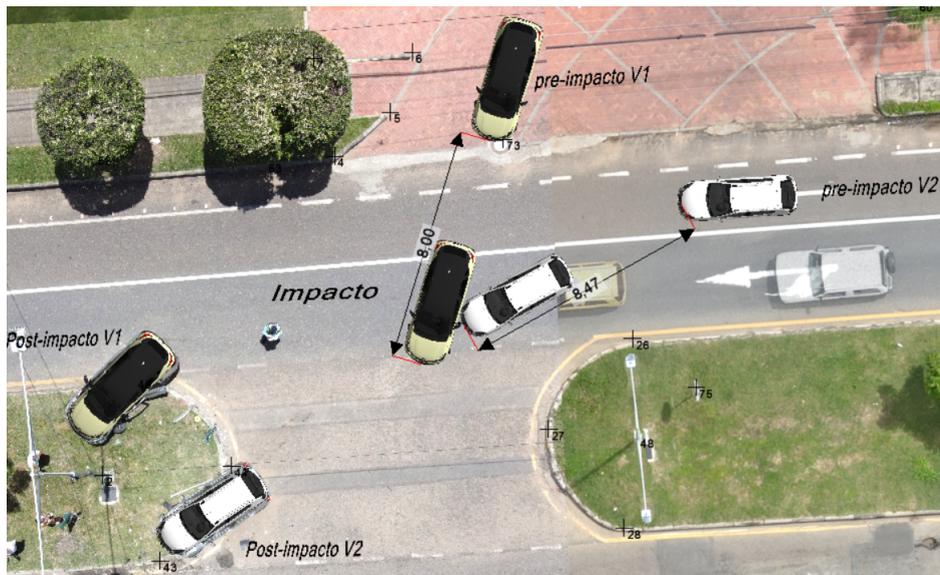


Figura 5.6: Distancias de los vehículos 1 y 2 antes del impacto

5.0.3. Análisis de evitabilidad

El vehículo No. 1 entra a la Calle 8 en el sentido norte-sur para cruzarla, con una velocidad de cero (reposo) hasta llegar a una velocidad de 3,35 m/s o 12,06 km, cálculos obtenidos, y empleando un tiempo en su recorrido 2,39 segundos. Al entrar a la avenida 8 el conductor del vehículo No. 1 lo hace sin identificar a qué velocidad venía el vehículo No. 2, que para este caso su velocidad está entre 56,46 y 86,07 km/h o equivalente entre 16,03 y 23,57 m/s y una velocidad media de 19,55 m/s.

Vehículo No. 2 Teniendo en cuenta el tiempo (2,39 segundos) que duró el cruce del vehículo No. 1, si el conductor del vehículo 2 lo hubiese visto, por consiguiente, tendría ese tiempo para reaccionar y evitar el accidente, considerando que el tiempo de reacción de un conductor en estado atento a su labor es de 1 segundo y 1.5 segundos de acuerdo a literatura universal, Irureta, (2011), lo cual tiene el tiempo necesario para evitarlo.

la posición del vehículo No. 2, al momento que el vehículo No.1 genera el peligro se ubica a una distancia de 46.72 de acuerdo a la ecuación 5.7 y como se observa en la figura 5.7

Por otra parte, analizando velocidad permitida en el sector, cuya señal vertical informativa está localizada en el área del incidente, indica que es de 30 km/h, ejecutar la

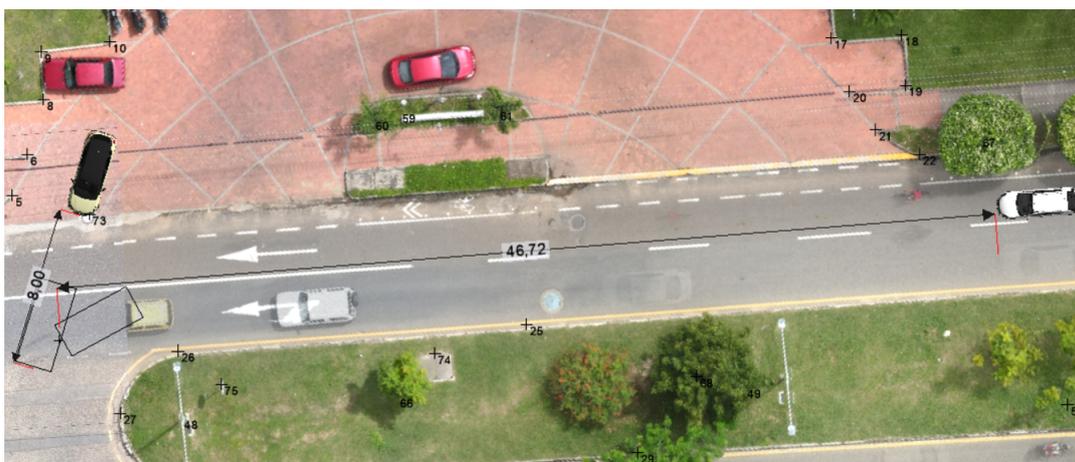


Figura 5.7: Distancia y posición del vehículo 2 de acuerdo al tiempo que duro el riesgo que genero el vehículo No. 1

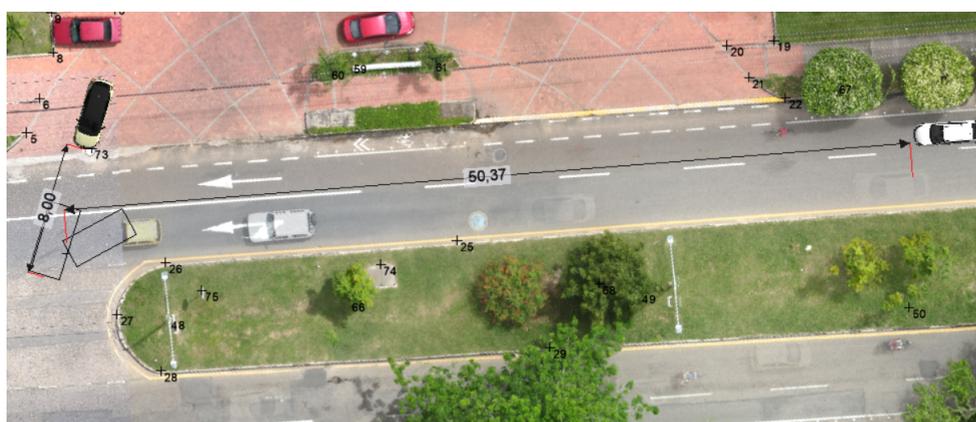


Figura 5.8: Distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada

acción de frenado total requeriría de una distancia, de acuerdo con la simulación de entre 9,05 y 25,15 metros, con una distancia media de 15,22 metros, para detener totalmente la marcha, como se observa en la figura 5.8. Sabiendo que el tiempo de reacción y detención total de un vehículo, efectuado por un conductor atento esta entre 1 y 1.5 segundos.

Al analizar el evento a la velocidad obtenida en el presente cálculo, en un rango entre 56,46 y 86,07 km/h o equivalente a 16,03 y 23,57 m/s y aplicando un coeficiente de rozamiento entre $0,76 \pm 0,06$, el conductor del vehículo No. 2 necesitaba una distancia total para detener el vehículo de 36,69 ó 66,07 metros y una distancia media de 50,37 metros de acuerdo a resultados de simulación con técnica de Montecarlo. Ver figura 5.9.



Figura 5.9: Distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector

5.0.4. Gráficas obtenidas con la técnica de Montecarlo

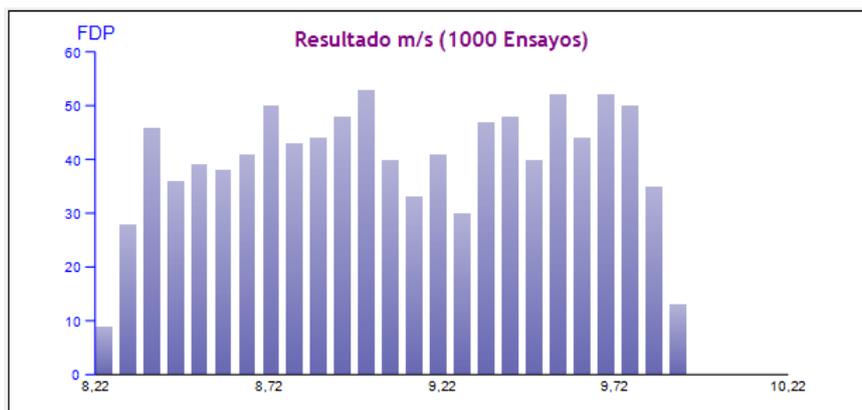


Figura 5.10: Histograma de 1000 valores de la velocidad post-impacto vehículo 1 por huella arrastre metálico

La Figura 5.7 muestra el histograma con una distribución uniforme de la velocidad post-impacto del vehículo 1, teniendo en cuenta el coeficiente por huella de arrastre metálico, en la figura 5.8 se observa las medidas de tendencias del análisis de Montecarlo donde la velocidad mas probable después del impacto con el vehículo 2 es de 9.06 m/s, con una desviación estándar de 0.46 m/s, se realizaron 1000 ensayos aleatorios para calcular esta probabilidad. Se asignó como valores de entrada de los coeficientes de fricción con una distribución uniforme, y la distancia de la huella de arrastre con distribuciones normales, considerando los rangos de la tabla 5.1.

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	9.0639
Mediana	9.0415
Desviación Estándar	0.4631
Variación	0.2145
Coefficiente de Variación	0.0511
Máximo	9.9011
Mínimo	8.1753
Rango	1.7258
Asimetría	-0.0337
Curtosis	-1.1938
25% Percentil	8.6803
75% Percentil	9.4795
Precisión de Error al 95% de Confianza	0.3167%

Figura 5.11: Medidas de tendencia para la velocidad post-impacto vehículo 1

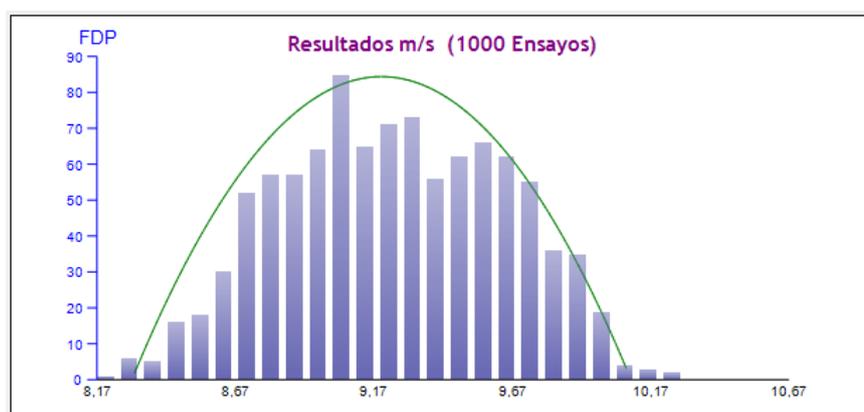


Figura 5.12: Histograma de 1000 valores de la velocidad post-impacto vehículo 2 con dos coeficiente y dos distancias diferentes

La Figura 5.9 muestra el histograma con una distribución normal de la velocidad post-impacto del vehículo 2. En la figura 5.10 se observa las medidas de tendencias del análisis de Montecarlo donde la velocidad más probable después del impacto con el vehículo 1 es de 9.20 m/s, con una desviación estándar de 0.40 m/s, se realizaron 1000 ensayos aleatorios para calcular esta probabilidad. Se asignó como valores de entrada 4 variables del algoritmo 5.2 de la unión de dos ecuaciones, la primera variable con coeficiente de fricción llanta-asfalto de 0.76 con desviación estándar de 0.06, se le asignó una distribución normal. La segunda variable la distancia de huella de frenado de 1.568 metros, con desviación estándar de 0.235 metros, se le asignó una distribución normal. La tercera va-

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	9.1979
Mediana	9.1890
Desviación Estándar	0.4031
Variación	0.1625
Coefficiente de Variación	0.0438
Máximo	10.2465
Mínimo	8.1148
Rango	2.1317
Asimetría	-0.0238
Curtosis	-0.7078
25% Percentil	8.8934
75% Percentil	9.5206
Precisión de Error al 95% de Confianza	0.2717%

Figura 5.13: Medidas de tendencia para la velocidad post-impacto vehículo 2

riable un coeficiente de fricción metal-asfalto de 0.35 mínimo y 0.50 máximo, se le asigno una distribución uniforme, la cuarta variable la distancia de la huella de arrastre con una medida de 9.88 metros con desviación estándar de 0.10 metros, con una distribución normal, los anteriores rangos se encuentran en la tabla 5.1.

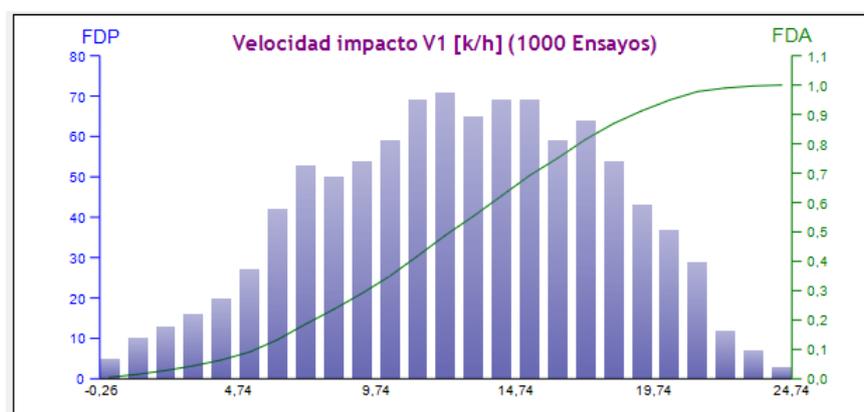


Figura 5.14: Histograma de 1000 valores de la velocidad pre-impacto por conservación de momento lineal del vehículo 1

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	12,2516
Mediana	12,4409
Desviación Estándar	5,1484
Variación	26,5060
Coefficiente de Variación	0,4202
Máximo	24,3759
Mínimo	-0,9131
Rango	25,2890
Asimetría	-0,1673
Curtosis	-0,6226
25% Percentil	8,4861
75% Percentil	16,2253
Precisión de Error al 95% de Confianza	2,6045%

Figura 5.15: Medidas de tendencia para la velocidad pre-impacto vehículo 1

Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran la velocidad de impacto más probable para la velocidad de impacto del vehículo 1, se observa que la velocidad más probable es de 12.25 km/h, con una desviación estándar de 5.14 m/s, de igual forma se aprecian las medidas de tendencia y de dispersión para la velocidad de impacto del vehículo 1, la velocidad media del vehículo 1 se encuentra dentro el limite de velocidad del sector, el cual es de 30 km/h, de igual forma el limite máximo de 24.37 km/h también permanece dentro del limite de velocidad.

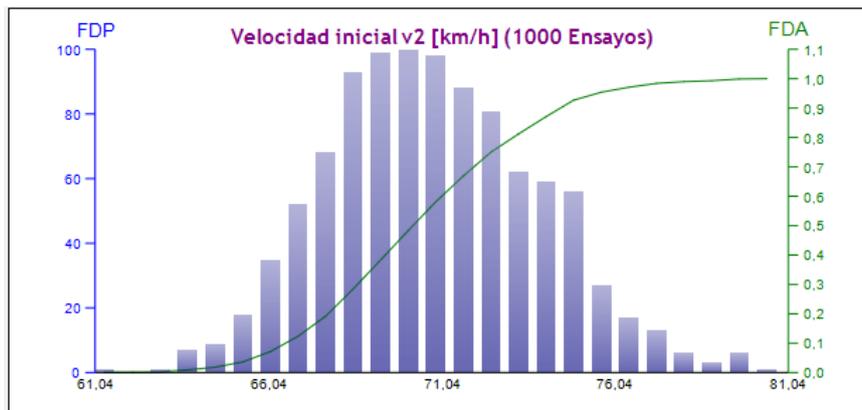


Figura 5.16: Histograma de 1000 valores de la velocidad impacto por conservación de momento lineal mas energía de deformación vehículo 2

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	70,3913
Mediana	70,2482
Desviación Estándar	3,0559
Variación	9,3385
Coefficiente de Variación	0,0434
Máximo	80,4172
Mínimo	60,5194
Rango	19,8978
Asimetría	0,2248
Curtosis	-0,1081
25% Percentil	68,2107
75% Percentil	72,4428
Precisión de Error al 95% de Confianza	0,2691%

Figura 5.17: Medidas de tendencia para la velocidad impacto vehículo 2

Las Figuras 5.13 muestra el histograma como una distribución normal. La figura 5.14 muestran la velocidad impacto mas probable para la velocidad de impacto del vehículo 2, se observa que la velocidad mas probable es de 70.39 km/h, velocidad que supera el limite de velocidad del sector de 30 km/h, de igual forma la velocidad mínima de 60.51 km/h también supera la velocidad del sector.

Con la simulacion Montecarlo, se ingreso las variables de entrada de la tabla 5.2 y se ingreso también la velocidad de deformación con su desviación estándar esta operación normalmente se realiza desarrollando ecuaciones individuales con limites máximos y mínimos, Montecarlos permitió calcular la velocidad pre-impacto, controlando todas

las incertidumbres de las variables, que condiciona resultados confiables y con un buen margen de error y de forma rápida.

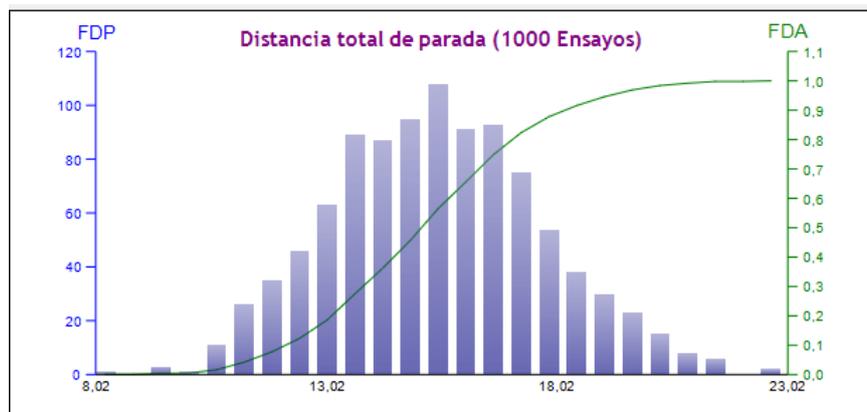


Figura 5.18: Histograma de 1000 valores de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector 30 km/h.

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	15,1195
Mediana	15,0982
Desviación Estándar	2,3179
Variación	5,3725
Coefficiente de Variación	0,1533
Máximo	22,6486
Mínimo	7,6260
Rango	15,0225
Asimetría	0,1544
Curtosis	-0,1859
25% Percentil	13,4637
75% Percentil	16,6518
Precisión de Error al 95% de Confianza	0,9502%

Figura 5.19: Medidas de tendencia para la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector.

Las Figuras 5.15 presentan el histograma de 1000 ensayos con una distribución normal. la figura 5.16 muestra las medidas de tendencia para el cálculo de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del sector, la ecuación de distancia total de parada con la simulación Montecarlo, permitió ingresar las variables de entrada como los coeficientes llanta-neumático y su desviación estándar, la velocidad del sector de 30 km/h con una desviación estándar del 10 por ciento y el tiempo de percepción y reacción de 1 y 1.5 segundos de acuerdo a la literatura universal, Irureta (2011). Ingresando estas variables con sus desviaciones permitió controlar todas las incertidumbre de las variables, dando como resultado una distancia más probable de 15.15 metros y desviación estándar de 2.34

metros, de igual forma distancia mínima de 9.19 metros y máxima de 23.99 metros; estas distancias es el espacio mínimo que debe tener un vehículo para parar sin impactar con ningún objeto. Con Montecarlo asignó como valores de entrada con distribución de probabilidad uniforme en el tiempo de percepción y reacción y distribución de probabilidad normal para las variables de velocidad y coeficientes.

Estadísticas	Resultado
Número de Pruebas	1000
Media	50,3704
Mediana	50,4640
Desviación Estándar	4,8719
Variación	23,7356
Coefficiente de Variación	0,0967
Máximo	66,0714
Mínimo	36,6945
Rango	29,3769
Asimetría	0,1235
Curtosis	-0,1954
25% Percentil	46,8236
75% Percentil	53,5916
Precisión de Error al 95% de Confianza	0,5995%

Figura 5.20: Histograma de 1000 valores de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada del vehículo 2

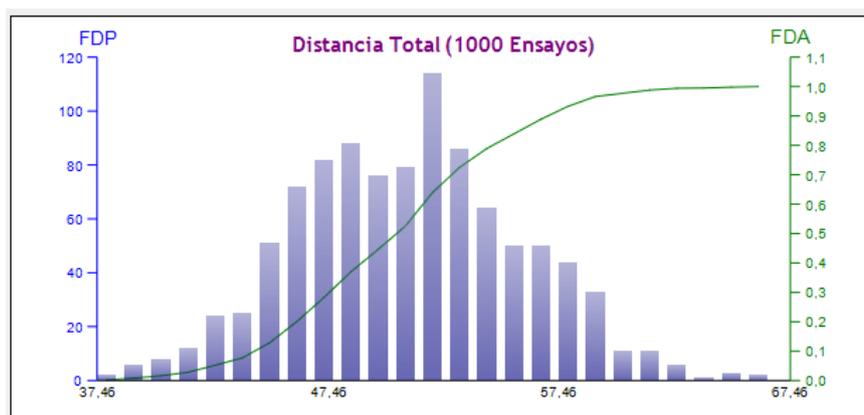


Figura 5.21: Medidas de tendencia de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad calculada del vehículo 2

Las Figuras 5.17 presentan el histograma de 1000 ensayos con una distribución normal. la figura 5.18 muestra las medidas de tendencia para el cálculo de la distancia total de parada de acuerdo a la velocidad del vehículo 2, con la simulación Montecarlos dio

como resultado la distancia más probable de 65.69 metros, con una desviación estándar de 5.68 metros, una distancia mínima de 39.19 metros y distancia máxima de 78.49 metros, de acuerdo a la distancia demostrada como reacción y percepción en la figura 5.6 de 8.47 metros al accidente era inevitables, de acuerdo a los cálculos de distancias total de parada, tanto con la velocidad que circulaba como la velocidad del sector.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

La determinación de la evitabilidad en los accidentes de tránsito permite encontrar la causas determinante y contribuyente de manera objetiva desde el punto de vista técnico-científico, sin caer en subjetividad al dar conclusiones desde el punto de vista normativo. El análisis de reconstrucción de accidentes de tránsito requiere el desarrollo de ecuaciones analíticas, en el caso tratado se determinó un exceso de velocidad por el vehículo No. 2 Sandero y una desatención por parte del conductor ejecutando una reacción tardía ante un riesgo generado por el vehículo No 1. riesgo de este vehículo que no fue determinante.

Con el análisis de velocidades post-impacto por conservación de energía, pre-impacto por conservación de momento lineal y distancia total de parada, usando la técnica de Montecarlo, permitió estimar valores reales y acertados de los rangos de errores probables, y por lo tanto a dictámenes periciales confiables.

Los resultados en la técnica de Montecarlo permitieron mostrar la distribución de probabilidad de cada uno de los parámetros de requeridos en el accidente.

La simulación de Montecarlo desde el programa risk simulator como complemento de Excel es una herramienta fácil de usar y eficaz para definir tasas de errores y rangos más

probables, para la reconstrucción en accidentes de tránsito.

En el análisis del accidente la determinación de los parámetros físicos como velocidad, tiempo y distancias, con la técnica de Montecarlo se presentan valores de mayor criterio para toma de decisiones por parte de las autoridades judiciales.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la técnica de Montecarlo, en el caso del accidente de tránsito, con el cálculo de distancia total de parada con la velocidad calculada del vehículo No.2 y la velocidad del sector, el accidente de tránsito era evitable si el conductor respeta la velocidad permitida del sector, ya que contaba con el espacio suficiente para reaccionar ante un peligro como se observa en la figura 5.8, como conclusión la causa determinante del accidente es la velocidad excedida de acuerdo a la velocidad del sector.

Bibliografía

BIBLIOGRAFIA

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (27 de septiembre de 2022). Guia Práctica de Sensibilización en velocidad. Obtenido de <https://ansv.gov.co/es/escuela/6886>

Agencia Nacional de Seguridad Vial. (11 de agosto de 2023). ANSV alerta a los municipios con mayor incrementos en muertes por siniestro viales. Obtenido de <https://www.ansv.gov.co/es/prensa-comunicados/10132>

Aldana Sánchez , W., Rodriguez , F., y Palacios Martín , M. (2022). El estándar Daubert y valoración pericial en el sistema Penal con Tendencia Acusatorial en Colombia. Universidad Gran Colombia.

Alvarez, D. M., y Luque , R. P. (2007). Investigación de Accidente de tráfico: Manual de Reconstrucción. La Coruña, España: Netbiblo.

Aparicio Izquierdo, y Otros. (2002). Accidente de trafico: investigación, reconstrucción y costes. Univeridad Politécnica de Madris España.: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

Ball, Jeffrey, Danaher David, y Ziernicki, R. (2007). Considerations for Applying and Interpreting Montecarlo Simulation Analyses in Accident Reconstruction . SAE paper 2007-01-0741.

Bartlet, W. (2007). Montecarlo Analysis for Accident Reconstruction. MECHANICAL FORENSICS ENGINEER SERVICE.

Bartlett, W. (2007). Skidding Friction: A Review of Recent Research.

Bartlett, W., Brach, R., Baxter, A., Schmidt, B., Navin , F., Stanard, T., . . . Oren, M.

(2002). Evaluating the Uncertainty in Varios Measurement Task Common to Accident Reconstruction. SAE paper 2002-01-0546.

Bartlett, W., Schmidt, B., Navi , F., Wright, W., Masory, O., Brach, R., . . . Baxter , A. (2002). Evaluating the Uncertainty in various Measurement Task Common to Accident Reconstruction. SAE 2002-01-0546.

Burbano de Ercilla, S, Burbano García, Gracia Muñoz, y C. (2003). Física General. Madrid: Tebar.

Campbell, y K. (1974). Energy Basis for Collision Severy . SAE Technical Paper 740565.

Campon, J. A., Cocaña, J. F., Fuentes Ortega, P., y Vidal Barrientos , J. L. (2019). Introducción a la Reconstrucción de Siniestros Viales. Merida - España: Escuela de trafico Guradia Civil.

Congreso de la República de Colombia. (2000, 24 de julio). Ley 599 de 2000. Obtenido de <http://www.secretariasenado.gov.co>

Congreso de la Republica de Colombia. (2002, 13 septiembre). Ley 769 del 2002. Obtenido de <http://www.secretariasenado.gov.co>

Damask, A. (1995). An introduction to the physics of motor vehicle accidents, applications of the laws of motion to accidente reconstruction. Charlottesville: michie Butterworth.

Emori, y R. (1968). Analytical Approach to Automovile Collisions. SAE Technical paper 680016.

Fries, T., Cronrath, K., y Smith , J. (1989). Motorcycle and Semi Truck Accident Reconstruction - A Case Study of Human Factors and Avoidability Analysis. SAE-890733.

García Ruíz , A., y Diaz Noguera, J. J. (2011). Reconstrucción de accidente de trafico fundamentos físicos aplicables a la investigación.

González, A. (2021). Peritazgo Físico de Accidente de Transito en el Departamento del Huila. Universidad Surcolombiana.

James, F. (1980). MontecCarlo theory and practic. CERN: Informe Tecnico DD/80/6.

Kimbrough, y Scott. (2004). Determining the relative likelihoods of competing scenarios of events leading to an accident. 2004-01-1222.

Kost , G., y Werner, S. (1994). Use of Montecarlo Simulation Techniques in Accident Reconstruction. SAE 940719.

Locati, y L. (1964). Comportement d'une voiture dans les collisions. Bulletin d'information CIDITVA.

López, H., y F. (2005). Accidente de Tráfico Reconstrucción”. Sevilla: Universidad de Sevilla: Proyecto Final de carrera (PFC).

Martinez , E. (2003). Calculo de Cotas de error en Accidentologia usando la Técnica de Montecarlo. Instituto Balseiro Centro Atomico Bariloche, Bariloche, Argentina.

McHenry, R., y McHenry, B. (2014). Crash Damage Analysis. NAPARS. Conference.

Moser, A., H, S., A. Spek, y W, M. (2003). Application of the Montecarlo methods for Stability analysis within the accident reconstruction software PC-CRASH. SAE paper 2003-01-0488.

Prasad, y A. (1990). CRASH 3 damage algoritm refoymulation for front and rear collisions . SAE paper 900098.

Raymond , M. B., Donald , F. R., y Sallmann, D. W. (1998). Comparison of tire friction test methodologies used in accident reconstrucion. Technical paper, (980367).

Rico , A. (s.f.). Cuantificación de la Probabilidad o Chance de Evitabilidad en un Accidente de Tránsito Cuando se Supera la Velocidad Limite en un Tramo Vial. IRSVIAL, Bogotá, Colombia.

Tomasch, y E. (2004). AccidentReconstruction Guidelines. Part of Deliverable D4. Brussels: PENDANT project.