

Portada Externa de Tesis

Liliana
Guzmán
Burelos

Resistencia a la rodadura y fuerzas G en un
modelo matemático para evaluar la longitud de
las rampas de emergencia

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Resistencia a la rodadura y fuerzas G en un modelo matemático
para evaluar la longitud de las rampas de emergencia

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el grado de

Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Liliana Guzmán Burelos

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Co-Director:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Querétaro. Qro. a 26 de febrero de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Vías Terrestres y Movilidad

Resistencia a la rodadura y fuerzas G en un modelo matemático para evaluar la longitud de las rampas de emergencia

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Liliana Guzmán Burelos

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Co-dirigido por:

Dr. José Antonio Romero Navarrete

SINODALES

Dr. Omar Chávez Alegría
Presidente

Firma

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Secretario

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Vocal

Firma

M.I. Emilio Abarca Pérez
Suplente

Firma

M.I. Gerardo Medellín Aguilar
Suplente

Firma

Nombre y Firma
Director de la Facultad

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro. Qro.
Febrero. 2025
México

RESUMEN

La falla en frenos es uno de los principales factores que propician la pérdida de control del vehículo. Siendo el transporte de carga el sector que muestra una tasa de accidentalidad en incremento, ante esta problemática se han buscado soluciones parciales, como lo son las rampas de frenado en carreteras. Sin embargo, las desventajas que existen al utilizarlas son que, en el proceso de deceleración, puede generar daños al conductor y al vehículo. Es por ello, que el presente trabajo implementó parámetros previamente obtenidos en experimentación alrededor del mundo, integrando estos parámetros a una propuesta novedosa de un modelo analítico propio inédito. De acuerdo a los resultados obtenidos en el inicio de la investigación, se pudo obtener que las Ecuaciones usadas en la norma PROY-NOM-036-SCT2-2023, subestima las velocidades de entrada, lo cual afecta directamente la longitud de las rampas de emergencia, así como los vehículos que presentan mayor exceso de carga son los camiones articulados (T3-S3) y los camiones doblemente articulados (T3-S2-R4). Es por ello que con el modelo propuesto se busca tener un diseño de las rampas de emergencia óptimo, contemplando diversos parámetros.

(Palabras clave: rampas de frenado, modelo analítico, resistencia a la rodadura)

SUMMARY

The brake failure is one of the main factors that contribute to the loss of vehicle control. The cargo transport sector, showing an increasing accident rate, has sought partial solutions to this issue, such as the installation of braking ramps on highways. However, the disadvantages of using them include potential damage to the driver and the vehicle during the deceleration process. Therefore, this study implemented parameters previously obtained from experiments worldwide, integrating these parameters into a novel, original analytical model. According to the results obtained at the beginning of the research, it was found that the equations used in the PROY-NOM-036-SCT2-2023 standard underestimate the entry speeds, which directly affects the length of emergency ramps. Additionally, vehicles with higher excess loads, such as articulated trucks (T3-S3) and doubly articulated trucks (T3-S2-R4), are the most affected. The proposed model aims to design optimal emergency ramps, considering various parameters.

(Keywords: braking ramps, analytical model, rolling resistance)

DEDICATORIAS

Con amor para mi padre. Aunque ya no estés físicamente conmigo, tu amor, tu sabiduría y tu ejemplo siguen vivos en mi corazón. Cada día siento tu presencia en los momentos de silencio, en mis pensamientos y en las lecciones que me dejaste. Gracias por todo lo que me diste, por tu paciencia, por tus sacrificios y por enseñarme a ser fuerte, incluso cuando ya no estás a mi lado. Te extraño más de lo que las palabras pueden expresar, pero sé que siempre estarás conmigo, guiándome desde donde estés. Te amo, papá y este logro es el reflejo de tus consejos.

AGRADECIMIENTOS

Gracias, Señor, por darme la vida y por cada bendición que me has otorgado. En tu amor encuentro fuerza, guía y paz. A ti, papá, gracias por ser mi ejemplo, mi protector y mi fuente de amor incondicional.

Querida mamá, gracias por ser el pilar de mi vida, por tu amor incondicional, por cada sacrificio y por todas las veces que me has levantado cuando más lo necesitaba.

A ti, mi querida hermana, gracias por tu amor y apoyo, que siempre han sido mi refugio. Juntas, hemos compartido risas, recuerdos y desafíos, y siempre estaré agradecida por tenerte a mi lado, así como a mi cuñado.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONACYT) por su invaluable apoyo y por promover el desarrollo y la investigación en nuestras disciplinas.

A mi director de tesis, el Dr. Omar Chávez Alegría, por su paciencia, su tiempo y sus sabios consejos que me han permitido completar este tema de investigación. A mi codirector, el Dr. José Antonio Romero Navarrete, por compartir conmigo sus vastos conocimientos en el área. Al Dr. Ricardo Montoya Zamora, por ser una parte fundamental en el desarrollo de la maestría. Al M.I. Emilio Abarca Pérez, por desafiarlos a esforzarnos cada día en el diseño de las vías terrestres, y al M.I. Gerardo Medellín por su valioso apoyo en esta investigación.

Gracias a mi amiga Ana Cristel Muñoz Gómez, cuya amistad ha sido una fuente constante de motivación y energía. Gracias a ti, Javier, por ser mi apoyo incondicional en los momentos de dificultad y por celebrar conmigo los logros, grandes o pequeños.

Mi eterna gratitud a mis amigas Gennys, Orlinka, Anahí, Susana, y por supuesto, a Danilo, gracias por ser siempre un apoyo fundamental en mi vida. Los aprecio más de lo que las palabras pueden expresar, y espero que pronto podamos reunirnos nuevamente.

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
1. INTRODUCCION	1
1.1. Justificación	1
1.2. Descripción del problema.....	4
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivo general.....	6
1.4.1. Objetivos específicos	6
2. REVISION DE LITERATURA	7
2.1. Factores que propician los accidentes del transporte de carga	7
2.1.1. Humano.....	7
2.1.2. Vehículo	8
2.1.3. Ambiente	8
2.2. Rampas de frenado.....	9
2.2.1. Consideraciones donde se coloca una rampa de frenado.....	11
2.2.2. Diseño de las rampas de frenado.....	12
2.3. Material utilizado en las rampas de frenado.....	17
2.3.1. Resistencia a la rodadura.....	18
2.3.2. Modelos de la interacción del vehículo-superficie	20
2.4. Fuerzas que intervienen en la detención de un vehículo	23
2.5. Variables para la simulación de distancia de frenado	24
2.6. Transporte de carga.....	26
2.7. Efectos de las fuerzas G en la distancia de frenado	27
3. METODOLOGIA	29
1. RESULTADOS Y DISCUSION	42
2. LITERATURA CITADA	93

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1-Análisis de los tipos de rampas de frenado	10
Tabla 2-Constantes A,B,C y D para velocidades de 50 a 100 km/h	16
Tabla 3 -Constantes A, B, C y D para velocidades de 101 a 140 km/h	17
Tabla 4-Resistencia a la rodadura de diferentes materiales	20
Tabla 5- Vehículo y nomenclatura	26
Tabla 6- Peso Bruto Vehicular permitido	26
Tabla 7-Información de las rampas seleccionadas.	31
Tabla 8-Segmentos obtenidos	34
Tabla 9-Velocidades de punto	35
Tabla 10- Parámetros utilizados	37
Tabla 11-Rampas seleccionadas, para análisis	42
Tabla 12-Pendientes obtenidas de la rampa 1	43
Tabla 13-Pendientes obtenidas de la rampa 2	44
Tabla 14-Pendientes obtenidas de la rampa 3	44
Tabla 15-Pendientes obtenidas de la rampa 4	45
Tabla 16-Pendientes obtenidas de la rampa 5	47
Tabla 17-Pendientes obtenidas de la rampa 6	51
Tabla 18- Peso Bruto Vehicular del año 2020	56
Tabla 19- Peso Bruto Vehicular del año 2021	57
Tabla 20- Peso Bruto Vehicular del año 2022	57
Tabla 21- Peso Bruto Vehicular del año 2023	58
Tabla 22-Valores obtenidos en los modelos existentes	65
Tabla 23-Parámetros utilizados en el modelo	66
Tabla 24-Tiempos tomados en los puntos de control	69
Tabla 25-Datos del modelo propio	71
Tabla 26-Error absoluto y relativo del recorrido del vehículo sin frenos.	72
Tabla 27- Longitudes del modelo propio en función del material	74
Tabla 28- Porcentajes de reducción en comparación de los modelos existentes .	84
Tabla 29- Fuerzas G obtenidas en el proceso de desaceleración.....	84
Tabla 30-Análisis estadístico	86

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1-Rampas de emergencia para frenado en la Red de Carreteras Federal...	9
Figura 2-Tipos de rampas de frenado.	10
Figura 3-Fenómenos que provocan la adherencia.	18
Figura 4-Geometría de la rueda sobre una superficie de concreto celular.	20
Figura 5-Geometría de la rueda sobre una superficie de grava.	22
Figura 6-Fuerzas actuantes en una rampa.....	24
Figura 7-Eschema de metodología.	29
Figura 8-Rampas Seleccionadas	31
Figura 9-Rampa 1, México -Querétaro (157+420)	32
Figura 10-Rampa 2, México -Querétaro (158+580)	32
Figura 11-Rampa 3, Libramiento poniente de morelia (1+680)	33
Figura 12-Rampa 4, Libramiento poniente de morelia (6+800)	33
Figura 13-Rampa 5, Pátzcuaro-Uruapan (84+400)	33
Figura 14-Rampa 6, México-Puebla (39+220)	34
Figura 15-Localización del centro de control de peso.	36
Figura 16-Ruta del accidente documentado.....	39
Figura 17-Puntos de control.	40
Figura 18-Verificación de peso y dimensiones en la báscula calamanda	53
Figura 19-Comportamiento anual de los camiones C2	54
Figura 20-Comportamiento anual de los camiones C3	54
Figura 21-Comportamiento anual del T3-S2	55
Figura 22-Comportamiento anual del T3-S3	55
Figura 23-Comportamiento anual del T3-S2-R4.....	56
Figura 24-Modelos existentes, México-Querétaro (157+420)	59
Figura 25-Modelos existentes, México-Querétaro (158+580)	60
Figura 26-Modelos existentes, Libramiento Poniente de Morelia (1+680).....	60
Figura 27-Modelos existentes, Libramiento Poniente de Morelia (6+800).....	61
Figura 28-Modelos existentes, Pátzcuaro-Uruapan (84+400)	61
Figura 29-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 1).....	62
Figura 30-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 2).....	63
Figura 31-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 3).....	63
Figura 32-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 4).....	64
Figura 33-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 5).....	64
Figura 34- Componentes de la resistencia aerodinámica	67
Figura 35- Componentes de la resistencia a la rodadura	67
Figura 36- Componentes de la resistencia por pendiente	68
Figura 37-Ruta recorrida por el vehículo sin frenos.....	69
Figura 38-Velocidades reales y del modelo.	72
Figura 39-Recorrido previo al ingreso de la rampa 1, con superficie de concreto. 75	
Figura 40-Recorrido previo al ingreso de la rampa 1, con superficie de asfalto. ...	76
Figura 41-Recorrido previo al ingreso de la rampa 2, con superficie de concreto. 76	
Figura 42-Recorrido previo al ingreso de la rampa 2, con superficie de asfalto. ...	77

Figura 43-Recorrido previo al ingreso de la rampa 3, con superficie de concreto.	78
Figura 44-Recorrido previo al ingreso de la rampa 3, con superficie de asfalto. ...	78
Figura 45-Recorrido previo al ingreso de la rampa 4, con superficie de concreto.	79
Figura 46-Recorrido previo al ingreso de la rampa 4, con superficie de asfalto. ...	80
Figura 47-Recorrido previo al ingreso de la rampa 5, con superficie de concreto.	80
Figura 48-Recorrido previo al ingreso de la rampa 5, con superficie de asfalto. ...	81
Figura 49-Recorrido previo al ingreso de la rampa 6, con superficie de concreto.	82
Figura 50-Recorrido previo al ingreso de la rampa 6, con superficie de asfalto. ...	82
Figura 51-Comparación de longitudes estimadas y longitudes reales.	83
Figura 52-Correlación de la fuerza total y la resistencia por pendiente.	86
Figura 53-Correlación de la fuerza total y la resistencia a la rodadura.	87
Figura 53-Correlación de la fuerza total y la resistencia aerodinámica.	87

1. INTRODUCCION

En el presente capítulo se realiza una introducción a la razón por la que se inicia este trabajo de investigación, se hace una descripción de la problemática actual que se viven de los accidentes donde se involucra el transporte de carga, los autores que han realizado investigaciones para dar solución parcial a la problemática al proponer rampas de frenado. así como los autores que justifican esta investigación. Posteriormente se hace una descripción de la hipótesis a comprobar. se establece el objetivo general de la investigación. así como los objetivos específicos.

1.1. Justificación

En Cuevas *et al.* (2021) reportan que el transporte de carga involucrado en los accidentes de carretera federal tiene una media del 27% a nivel nacional. Sin embargo, algunos estados como Coahuila y Sonora tienen un porcentaje de participación del 40.6% y 51.9% respectivamente. Algunas carreteras, regidas por la topografía, la carga con la que transita el transporte, genera una gran cantidad de energía cinética e inercia, provocando que se necesite mayor disipación de energía en el proceso de frenado (Yan *et al.*,2018).

El material con las que se construyen las rampas juega un papel importante para la disipación de energía entre el vehículo y la superficie de rodamiento. Sin embargo. estas provocan daños a la carrocería del vehículo y lesiones al conductor por el proceso de deceleración severo (Capuano *et al.*,2017). En busca de perfeccionar las rampas de emergencia. se han realizado investigaciones acerca de los elementos que existen alrededor de su diseño, los cuales consta de estudios sobre la ubicación, el material y la longitud que deben tener (Qin *et al.*,2022).

En las últimas décadas se han creado diversas investigaciones en base al material con la que se construyen, analizan las fuerzas que interactúan en el proceso de deceleración, como es el caso particular de la resistencia a la rodadura. Son Hall & Moreland (2001) quienes utilizan las variables de combustible del motor, masa del

vehículo. coeficiente de resistencia aerodinámica donde analizan diferentes combinaciones de carga/presión a velocidades constantes obteniendo deceleraciones en periodos de 3 minutos, comprobando que su modelo optimiza el diseño de los neumáticos con diferentes materiales. sugiriendo analizar la resistencia a la rodadura con diferentes materiales en diversas condiciones climáticas. Posteriormente Delaigue & Eskandarian, (2004) analizan un modelo para calcular la resistencia a la rodadura tomando en cuenta la presión de inflado de los neumáticos, el radio efectivo, la carga y la fricción de los neumáticos. Con esta modelación evaluaron la longitud de frenado en línea recta bajo diversas condiciones del conductor, dejando como línea de investigación, crear algoritmos de frenado que se utilicen en el diseño de infraestructura para el transporte.

Fueron Di Rado *et al.* (2011) quienes aplicaron un modelo de simulación longitudinal dinámica donde utilizaron las resistencias que se oponen al movimiento, analizados en superficies planas u ondulados. utilizando en su ecuación el radio del neumático, la carga, la presión de inflado. la velocidad, la fricción del neumático y la superficie de contacto.

Así mismo, Acosta *et al.* (2011) analizan los métodos de estimación de resistencia a la rodadura mediante las variables de deslizamiento, vibración y ruido de los neumáticos obteniendo las limitaciones para elegir el modelo de deslizamiento que tenga la máxima fricción entre el neumático y la carretera, resaltando que aún faltan investigaciones adicionales en cuestión del material para robustecer los escenarios de frenado. Al siguiente año Alaei *et al.* (2012) validan un modelo numérico donde simulan el material enrocado obteniendo valores de resistencia y deformación del material. así como su comportamiento al recibir una carga. En sus investigaciones futuras, considerar los parámetros encontrados, aplicándolo a un modelo donde se incorporen el tamaño real de las partículas. Por un lado, Zhang *et al.* (2013) crea un modelo neumático-superficie enfocándose a evaluar el efecto de la velocidad y la absorción de la energía específica, con parámetros de diámetro efectivo del neumático, resistencia del material con la que se crea la superficie, deformación,

ángulo del segmento de arco en la interfaz entre llanta y la superficie, obteniendo longitudes de frenado menores.

Fueron Edelman *et al.* (2015) quienes crean un modelo donde con un sistema inteligente obtienen las características del neumático analizando el coeficiente de fricción lateral, longitudinal, obteniendo las fuerzas en el plano X,Y, Z y los momentos generados en sus respectivos planos cartesianos, teniendo como resultado una estimación sólida del deslizamiento longitudinal mediante la fricción del vehículo y las condiciones de la superficie, dejando como línea futura el investigar la dinámica vehicular de los vehículos. Posteriormente Capuano *et al.* (2017) crean un modelo de análisis del neumático-superficie de rodamiento donde integra la resistencia del material. el peso que se transfiere a la superficie, el ángulo de la interfaz, obteniendo la resistencia a la rodadura, obteniendo la mitad de las longitudes de frenado. Siguiendo la línea de investigación del material son Qin *et al.* (2019) quienes crean un modelo donde analizan el radio de grava, el peso del vehículo de diseño, la velocidad con la que entran a la rampa y la pendiente, donde obtuvieron que, con una velocidad dada, la longitud de frenado disminuye al aumentar la pendiente y disminuir el radio, dejando como línea de investigación analizar el diseño longitudinal de las rampas de emergencia, tomando estos parámetros. Fueron Ambrož *et al.* (2023) quienes analizaron el comportamiento de las longitudes de frenado con un material granular con las deceleraciones alcanzables, donde encontraron un rango de 0.3 a 0.9 G en sus pruebas, dejando como investigación futura, un modelo matemático donde relacione el material con el efecto de fuerzas G que se genera al decelerar.

Es por lo anterior, que esta investigación pretende crear un modelo matemático, considerando un escenario con pérdida total de frenos, al ingresar a la rampa de emergencia y el parámetro de la resistencia a la rodadura sea mayor al citada por la normativa mexicana de rampas de emergencia PROY-NOM-036-SCT2-2023 usando el peso de un camión unitario de tres ejes (C3), esto debido a que el 73% de accidentes en carreteras corresponden a vehículos pesados, del cual el 55.2%

corresponden a camiones unitarios (Gutiérrez *et al.*,2009). Generando una longitud de frenado menor en comparación con una superficie de rodamiento tradicional.

1.2. Descripción del problema

De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021) de 340,415 accidentes que ocurrieron en ese año en carreteras federales, 3,514 fueron provocados por falla en el sistema de frenos, de los cuales 4,401 personas murieron y 82,466 resultaron lastimadas.

Los accidentes en carretas no solo dejan pérdidas humanas al verse involucrados los camiones de carga con vehículos más pequeños, estos se traducen a pérdidas económicas al suscitarse actos de delincuencia a las unidades accidentadas (Gutiérrez *et al.*,2009).

El problema de la pérdida de frenos en pendientes descendientes, provoca que las fuerzas que intervengan al detener el vehículo, se centren en la resistencia a la rodadura y la resistencia del aire, lo que provoca que la energía cinética que se genera no se pueda disipar utilizando las fórmulas convencionales, ya que los cálculos son subjetivos comprados con la realidad, Liu *et al.* (2010).

Se sabe que la sobrecarga, la velocidad de los camiones con la que circulan en carreteras es mayor a las que se consideran en los cálculos, indicando que se necesita disipar mayores energías. En la realidad tenemos escenarios donde involucran la resistencia en los neumáticos con la superficie construida de grava, generando energías desiguales. lo que provoca una colisión o un vuelco (Jianjun *et al.*,2013).

Ramírez (2015) nos dice las desventajas de las rampas de emergencia con una superficie de rodamiento de grava, es que necesitan longitudes extensas y mantenimiento constante. En escenarios reales. donde no tenga mantenimiento la rampa de emergencia, con un vehículo sin frenos puede provocar que la resistencia a la rodadura disminuya y el neumático no se podrá hundir con facilidad.

Añadiendo a esta problemática Greto & Easa (2020) nos dicen que el diseño que actualmente se emplean en las rampas de emergencia se deben a tres factores los cuales son velocidad del vehículo cuando ingresa a la rampa, la pendiente y la resistencia a la rodadura, revelando que estos valores se suponen fijos en los diseños, lo cual pueden dar valores más grandes y con ello no obtener un diseño óptimo, rentable y sobre todo seguro.

A pesar que se han realizado investigaciones de la ubicación, la longitud, velocidad de entrada a la rampa, la pendiente. Falta investigación en base al material con el que se construyen las rampas de emergencia y efecto que tienen las deceleraciones en el conductor (Qin *et al.*,2022).

A partir de la problemática expuesta, se busca dar solución parcial mediante el desarrollo de un modelo donde se evalúen diferentes materiales en la superficie de rodamiento que servirá como disipador de energía entre la superficie y el neumático. con el fin de optimizar la longitud de la rampa de emergencia, evaluando efecto de las deceleraciones y así poder generar una alternativa que salvaguarde la vida del conductor. Se busca promover el mejoramiento de la estructura vial (rampas de emergencia) y de movilidad (seguridad vial) que integre al transporte de carga tanto del sector público como del privado, siguiendo la línea de investigación Pronaces de seguridad humana.

1.3. Hipótesis

Con resistencia a la rodadura asociados al material, aplicados en una modelación discreta se disminuirá un 10% la longitud de frenado en comparación con las longitudes existentes, considerando fuerzas G inferiores a 2 veces la gravedad terrestre durante el proceso.

1.4. Objetivo general

Determinar la longitud de frenado de un vehículo C3 mediante un modelo analítico que considere la resistencia a la rodadura en la que se incorpore la resistencia gravitatoria y aerodinámica para evaluar la longitud de la rampa de emergencia, considerando fuerzas G en el proceso de deceleración.

1.4.1. Objetivos específicos

- Revisar la información existente del tema, para obtener los datos de los parámetros del camión unitario (C3) y los materiales, que se introducirán en el *software*.
- Determinar la ecuación que permita evaluar la longitud de frenado, en base a las ecuaciones desarrolladas por diversos autores, las cuales alimentarán la simulación para introducir los parámetros del vehículo y el material de la superficie de rodamiento.
- Deducir en el *software* MATLAB las ecuaciones y los parámetros del vehículo y el material deformable para obtener la distancia de frenado y así poder compararlas con el material tradicional (grava-arena).
- Calcular el efecto de las fuerzas G en la distancia de frenado obtenida por el material deformable, para conocer si se encuentra en un rango aceptable para salvaguardar la vida del conductor.

2. REVISION DE LITERATURA

En el presente apartado se realiza una descripción de los componentes que propician los accidentes viales. a través de la biografía consultada se describen soluciones parciales para disminuir esta problemática la cual se centra en el diseño de las rampas de frenado, donde influye la fuerza de inercia (F_i), presión del aire (F_a) y resistencia al rodado de las llantas (F_r), partiendo de esta última fuerza se profundiza en la implementación del concreto celular como material alternativo. El tema es desarrollado desde la problemática, las posibles soluciones y la comprobación mediante la simulación de las alternativas.

2.1. Factores que propician los accidentes del transporte de carga

De acuerdo a la topografía extensa de nuestro país, es muy común que los vehículos, circulen por pendientes pronunciadas con longitudes considerables. provocando que los conductores estén expuestos a constantes cambios de velocidad y con ello, la aplicación de frenos. Ocasionado que los motores vayan embragados o enganchados constantemente a las velocidades bajas, dejando como consecuencia, accidentes en carreteras que se traducen a costos elevados para el país (Mayoral *et al.*, 2008).

Los accidentes de carretera se derivan de tres agentes que interactúan entre sí, los cuales son humanos, vehículo y ambiente (Ayala, 2019) si alguno de los antes mencionado falla, se origina un accidente.

2.1.1. Humano

Desde la perspectiva del cansancio, Cubillos y López (2009) describe el problema de los accidentes como una consecuencia del déficit de sueño, provocado por horarios irregulares donde interviene trabajo-descanso y deja como resultado cansancio que se traduce a somnolencia en horarios de trabajo, Planzer (2005) atribuye a este factor que el conductor esté bajo los efectos de drogas que provocan exceso de velocidad propiciando circunstancias desfavorables, Puente y Pillon (2011) adjudican que los largos periodos conduciendo provocan que los

conductores creen conductas de riesgo entre las que resaltan mala alimentación. Sedentarismo, tabaquismo y pocas horas de sueño. Según datos de la Cuevas *et al.* (2019) el factor humano es el causante principal con la accidentalidad humana con 11,360 causas provenientes de este apartado.

2.1.2. Vehículo

Un factor a considerarse es el vehículo, en Van *et al.* (2001) exponen que las fallas mecánicas en los vehículos se deben a cinco factores los cuales son sobrecarga, alta velocidad, uso de piezas de repuesto no aprobadas por el fabricante, uso de llantas defectuosas e inflado incorrecto de las llantas. Estas fallas se producen por el desgaste del vehículo, sobrecarga, falta de mantenimiento que comienza a presentar anomalías paulatinamente. sin embargo. no siempre se perciben a primera estancia (Maldonado & Neira.2019).

Uno de los elementos que toma relevancia en un vehículo son los frenos, Viñas (2014) lo define como el elemento que permite detener el vehículo permitiendo que se redireccione para evitar un obstáculo, García *et al.* (2015) nos dicen que el sistema de frenado debe brindar seguridad y para ello se deben cuidar de agentes ambientales que disminuyan la resistencia de los discos y provoque una falla en el sistema y Maldonado & Neira (2019) profundizan en este tema donde menciona que la falta de frenos ocasiona accidentes, debido a que se pierde el control del vehículo.

2.1.3. Ambiente

Los factores del medio ambiente resultan ser un factor que propician la accidentalidad. es Híjar-Medina *et al.* (1999) quienes exponen que las condiciones climatológicas (lluvia, neblina, día, noche) influye en el comportamiento del conductor. Aportando más conocimiento de este tema Vanlaar & Yannis (2006) revelaron que los conductores reconocen un riesgo mayor al conducir bajo la lluvia y Planzer (2005) engloba más variables a este factor, las cuales son climáticas, mal estado de la vía, mala iluminación y falta de señalización.

2.2. Rampas de frenado

En la interacción de los elementos que provocan un accidente, se han empleado medidas de seguridad vial, las cuales son medidas activas que se centran en evitar en lo posible los accidentes y las medidas pasivas las cuales ayudan a minimizar las consecuencias de un fallo en el sistema (Cadengo *et al.*,2022). Las rampas de emergencia son parte de las medidas pasivas.

De acuerdo a Cárcamo- Velázquez (2014) las rampas de emergencia se originaron a partir de la experiencia obtenida en los accidentes donde observaron que los vehículos que iban en pendientes de descenso, fuera de control impactaban contra montículos de arena o grava y estos disminuían la velocidad.

En México, se tiene un total de 57 rampas en la red de cuota y 18 en la red libre de peaje, como se muestra en la Figura 1. De todas las rampas de emergencia existentes en el país, no todas se encuentran en funcionamiento (Cadengo *et al.*,2022).

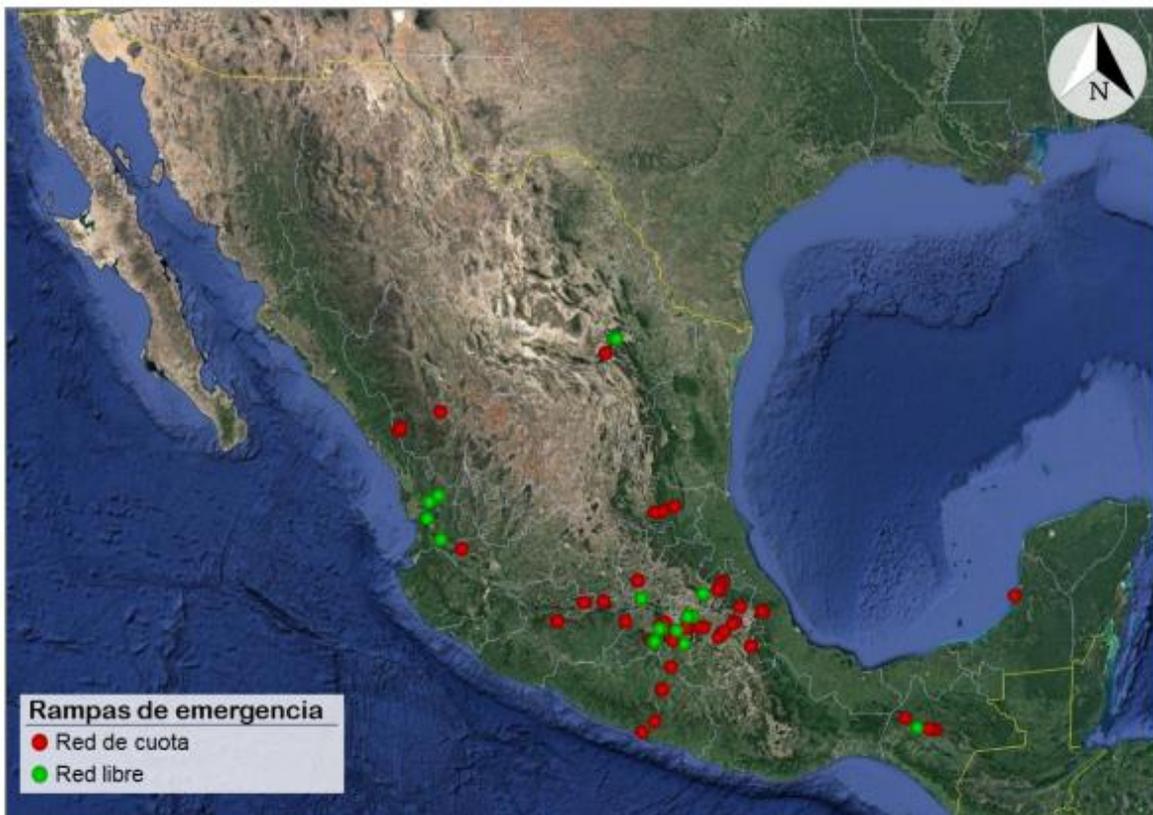


Figura 1-Rampas de emergencia para frenado en la Red de Carreteras Federal.

Fuente: Cadengo *et al.* (2022)

Witherford(1992) publica un libro donde incluye la clasificación de las rampas de frenado, las cuales las divide en rampas de gravedad, rampas de pila de arena y cama de pararrayos.

En Ramírez (2015) expone que existen tres tipos de rampas de frenado las cuales se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

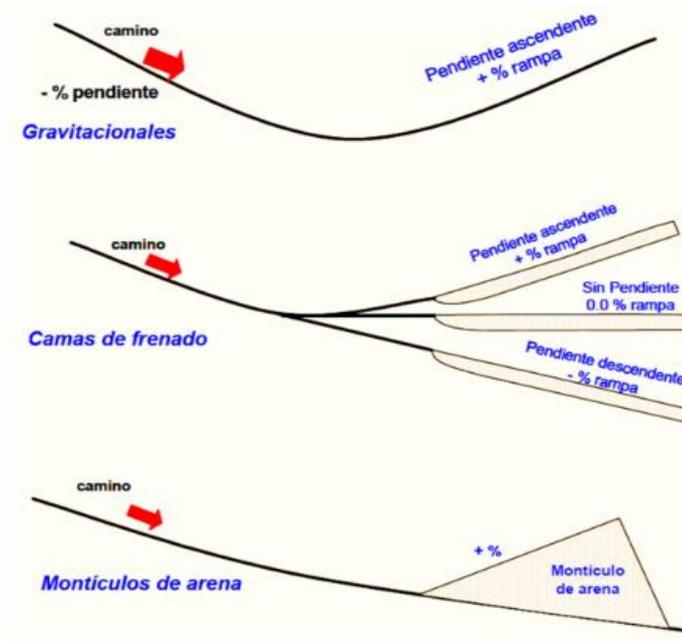


Figura 2-Tipos de rampas de frenado.

Fuente: Recuperado de Ramírez. J.E. (2015)

De acuerdo a la literatura en la Tabla 1, se muestra el los tipos de rampas de frenado, así como los materiales con los que se construyen y las desventajas que cada una tiene.

Tabla 1-Análisis de los tipos de rampas de frenado

Tipos de rampas de frenado	Diseño	Desventajas
Gravitacionales	Utilización de la fuerza de gravedad para disminuir la velocidad.	El vehículo puede descender por la pérdida de frenos y es inseguro para el conductor.

Cama de frenado	Se diseñan con diferentes pendientes (descendentes, horizontales y ascendentes).	Donde no se tenga el espacio para diseñar las tres pendientes se requieren longitudes mayores.
Montículos de arena	Utilizan montículos de arena suelta y seca en longitudes menores de 120 m.	El proceso de deceleración que provoca es severo para el conductor y el vehículo del accidente.

Fuente: Elaboración propia

2.2.1. Consideraciones donde se coloca una rampa de frenado

Echaveguren *et al.* (2007) señala que la colocación de las rampas de emergencia debe de construirse en sitios que, tengan características geométricas difíciles, que propicien a que los conductores de la carretera puedan perder el control, AASHTO (2011) recomiendan que la rampas se construyan donde se tenga un historial de accidentes relacionados con el sobrecalentamiento del sistema de frenos que puedan hacer que estos fallen. Añadiendo a esto Ramírez-Sánchez (2015) propone que en lugares es donde las curvas horizontales tienen radios reducidos. sitios donde exista un historial de accidentes en salidas de carreteras, impactos contra taludes esté relacionado con la falla en el sistema de frenos y números de carriles que se encuentren en pendientes peligrosas. Por otra parte, La Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2023), señala que la colocación de las rampas de emergencia debe de construirse en sitios que tengan características geométricas difíciles, que propicien a que los conductores de la carretera puedan perder el control. En Cadengo *et al.*(2022) nos dicen que se construyen a un costado de la carretera por donde transitan continuamente vehículos pesados, lugares donde existe antecedentes de accidentes derivados de la falla en el sistema de frenado, condiciones de topográficas desfavorables con pendientes donde se necesita una

disminución considerable de velocidad o detención total, así como combinaciones de longitud y pendientes del alineamiento vertical en descenso. En este mismo año García-Ramírez (2022) presenta un procedimiento analítico para justificar la ubicación de las rampas de frenado donde incluye las actualizaciones recientes del sistema de Calificación de Peligrosidad de la Pendiente (GSRS) para estimar la velocidad máxima segura en pendientes en descenso. donde influye principalmente el peso de vehículo.

2.2.2. Diseño de las rampas de frenado

Para realizar un diseño óptimo de las rampas de frenado, se tienen que analizar diferentes variables que corresponden a la velocidad, la pendiente, el peso del vehículo de carga, así como el material con la que se construyen. Fueron Besiktepe *et al.* (2020) quienes remarcaron la importancia del diseño de estas variables, con datos actualizados en una revisión de la literatura. Así mismo Qin *et al.* (2020) utilizan elementos discretos tridimensionales, para modelar el espesor, longitud y ancho que deben tener las rampas de emergencia, siendo el material (el diámetro de la grava), la velocidad de entrada y el hundimiento del neumático las variables protagonistas.

2.2.2.1. Velocidad

En AASHTO (2011) se sugiere que la velocidad mínima de diseño de entrada a la rampa de frenado sea de 130 km/h, con una velocidad de diseño de 140 km/h, Esto con el fin de disipar la energía cinética de un vehículo fuera de control pueda ser disipada en la rampa. Liu *et al.* (2010) estudiaron la velocidad de diseño, encontrando que el 99% la velocidad percentil es de 102.2 km/h, donde expusieron que las velocidades de publicadas en el libro de AASHTO eran excesivas.

Para obtener la velocidad de entrada, la normativa mexicana PROY-NOM-036-SCT2-2023 nos propone la Ecuación 1:

$$V_e = \left(V_p^2 - 254 \sum_{i=1}^n L p_i (R + P_i) \right)^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

V_e =Velocidad de entrada a la rampa (km/h).

V_p =Velocidad de operación media o estimada de la carretera (km/h).

n =Números de subtramos con pendiente descendentes diferentes. que integren el tramo de la proyección de la rampa, (Adimensional).

$L p_i$ =Longitud del subtramo i con pendientes descendente P_i , (m)

R =Resistencia a la rodadura de la superficie del pavimento. se considera de 0.01 para pavimentos asfálticos y de 0.012 para pavimentos hidráulicos, (Adimensional).

P_i =Pendiente descendente negativa del subtramo i de longitud

$L p_i$, (Adimensional).

De acuerdo a López *et al.* (2007) calculan la velocidad de entrada con la Ecuación 2, que estudia el fenómeno que ocurre cuando un objeto es atraído por la fuerza de la aceleración de la gravedad, la cual supone que el vehículo adquiere velocidad al final de la pendiente.

$$V_e = (V_o^2 - 2gh)^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

V_e =Velocidad de entrada a la rampa (m/s).

V_o =Velocidad inicial, en (m/s).

g =Fuerza de gravedad (9.81 m/s²).

h = Cambio de altura (m)

De los métodos exactos para el cálculo de la velocidad de entrada tenemos la que propone Rakha *et al.* (2001) la cual se basa en el equilibrio de fuerzas y con esto obtener un perfil de velocidades en función de la distancia como se muestra en la Ecuación 4.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_T - R_A - R_R - R_R - R_G}{m} \quad (5)$$

$$= \frac{\max \left\{ a_1 \frac{P}{V}, F_{MAX} \right\} - a_2 V^2 - a_3 (a_4 + a_5 V) m - m g i}{m}$$

F_T = Fuerza tractiva (N)

R_A = Resistencia aerodinámica (N)

R_R = Resistencia a la rodadura (N)

R_G = Resistencia por pendiente (N)

m = Masa (kg)

a = Aceleración (m/s)

V = Velocidad (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

P = Potencia (N)

i = Pendiente

2.2.2.2. Ancho

De acuerdo a la normativa mexicana la rampa debe de satisfacer la necesidad de facilitar las maniobras de ingreso a la rampa. Esta debe ser de 10 a 12 metros, así como el camino de servicio será de 5 metros.

2.2.2.3. Longitud

Calvi *et al.* (2015) reportan el flujo de tráfico y las características geométricas de las rampas son factores importantes a considerar en los accidentes.

Por ello Ramírez-Sánchez (2015) nos dice que el ancho óptimo de la cama de frenado se entra en el rango de 10 y 12 metros, tamaño en donde se toma en cuenta los vehículos que se retiran de la cama de frenado.

Qin *et al.* (2022) publica los resultados de una investigación donde evaluaba la longitud de frenado con respecto al material contaminado en una rampa de emergencia, agregando suelo limo cohesivo en diferentes proporciones para compararlo con la longitud de frenado original (material limpio), ya que la longitud

es directamente influenciada por el material. La longitud de la rampa debe considerar la detención de vehículos a la rampa y la distancia que se necesitará para lograr retirar el vehículo y se expresa en la Ecuación 6:

$$Le = \frac{Ve^2}{254(R + SI)} \quad (7)$$

Donde:

Le = Longitud efectiva de la cama de frenado (m).

Ve = Velocidad de entrada de la rampa (Km/h).

R = Resistencia a la rodadura del material con que se conformara la cama de frenado (Adimensional).

SI = Pendiente de la cama de frenado. Positiva si es ascendente y negativa si es descendente, (Adimensional).

De acuerdo a la PROY-NOM-036-SCT2-2023 para zonas donde se tenga pendientes variables, se determina la velocidad del vehículo de diseño en cada pendiente. hasta obtener la longitud suficiente para detenerlo. Se calcula con la Ecuación 8, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$VF_j^2 = VI_j^2 - 254L_j(R_m \pm S_j) \quad (9)$$

$$Le = \sum_{j=1}^k L_j$$

Donde:

VF_j = Velocidad final del tramo j (Km/h).

VI_j = Velocidad inicial del tramo j que se analiza de la cama de frenado (Km/h).

L_j = Longitud efectiva del subtramo j que se analiza de la cama de frenado (m).

R_m = Resistencia a la rodadura del material con que se conformara la cama de frenado (Adimensional).

S_j =Pendiente de la cama de frenado. Positiva si es ascendente y negativa si es descendente (Adimensional).

L_e = Longitud efectiva de la cama de frenado (m).

k = Número de subtramos de la cama de frenado, con pendientes diferentes (Adimensional).

También existe otra ecuación para calcular la longitud de frenado. Esta fue creada incluyendo la velocidad de entrada y constantes que están regidas por la pendiente del sitio (Pennsylvania Department of Transportation [PENNDOT], 2018). Esta fórmula está expresada en la Ecuación 10 y en las Tabla 2 y Tabla 3

$$L_e = A + B * V + C * V^2 + D * V^3 \quad (2)$$

L_e =Longitud efectiva de la cama de frenado (m).

V = Velocidad de entrada de la rampa (Km/h).

A, B, C y D = Constante (Tabla 2 y Tabla 3)

Tabla 2-Constantes A,B,C y D para velocidades de 50 a 100 km/h

Constante	50 a 100 km/h						
	Pendiente de la cama (%)						
	-5	0	5	10	15	20	25
A	-15.17294400	0.99220249	-4.92126779	-1.80456684	0.49279503	1.45746415	7.10296524
B	0.78219697	0.03209192	0.26432213	0.11824057	-0.01060662	-0.03998248	-0.30325464
C	-0.00600188	0.00509526	0.00187460	0.00372385	0.00565815	0.00561271	0.00927871
D	0.00012066	0.00004768	0.00004902	0.00003198	0.00001532	0.00001206	-0.00000881

Fuente: Pennsylvania Department of Transportation (PENNDOT). 2018

Para ingresar a la Tabla 2 y Tabla 3, se tiene que conocer la pendiente, se tiene que saber la velocidad de entrada, obteniendo los parámetros se realiza la operación de la Ecuación 6.

Tabla 3 -Constantes A, B, C y D para velocidades de 101 a 140 km/h

Constante	101 a 140 km/h						
	Pendiente de la cama (%)						
	-5	0	5	10	15	20	25
A	-282.52545984	-86.92116605	-22.41526366	-23.58126996	-30.22693156	-4.25493942	-3.02928162
B	8.62497966	2.74448334	0.79435949	0.73691189	0.83689803	0.17754232	0.09392263
C	-0.08308336	-0.02310790	-0.00341229	-0.00205750	-0.00241934	0.00297324	0.00392611
D	0.00037469	0.00014679	0.00006636	0.00004974	0.00004233	0.00002258	0.00001536

Fuente: Pennsylvania Department of Transportation (PENNDOT). 2018

2.3. Material utilizado en las rampas de frenado

El material utilizado para conformar la cama de frenado debe cumplir con el tamaño y la forma de sus partículas y su resistencia al desgaste (Cadengo *et al.*,2022).

En Ambrož *et al.* (2020) nos reportan en su investigación que una rampa de frenado, rellena de grava con granularidad de grava de 16 a 32 mm puede desacelerar un automóvil hasta 0.294 g (con una velocidad de autopista de 130 km/h se necesitarían 226 m de largo). Se obtiene que las desaceleraciones son mayores cuando las formas de las gravas son redondas y tienen un diámetro pequeño.

En Qin *et al.* (2019) se estudian las propiedades de los agregados que influyen en las distancias de frenado de los camiones fuera de control, donde se obtuvo que la distancia de frenado aumenta con el aumento de la velocidad y el radio. La superficie de rodamiento en contacto con el neumático se vuelve mayor y con más hundimiento. Strong (2019) estudia el comportamiento en campo de las rampas de emergencia donde encuentra que la resistencia a la rodadura del material, es la que permite que el vehículo sin frenos, se pueda detener al ingresar a la rampa, así como los materiales sueltos son los que logran este efecto.

Al siguiente año Besiktepe *et al.*, (2020) hace un enfoque en el mantenimiento de las rampas, ya que el material influye directamente en la longitud de la rampa, el material que hace énfasis en su artículo es una rampa de lecho conformado por gravas.

Actualmente independiente de los materiales tradicionales (arena-grava) se utilizan rampas de concreto celular como material alternativo para carreteras y pistas de aterrizaje (Ambrož *et al.*,2020). En San Filippo y DeLong (2002) exponen que el concreto celular es tiene resistencias bajas (100 psi o 0.690 Mpa) y muy liviano (480 kg/m³) por lo que en un inicio se descartó como material utilizado para pavimento. sin embargo, este material se puede utilizar en zonas donde no se tenga amplitud para el frenado, este material sirve como disipador de energía, en la interacción de neumático y superficie.

2.3.1. Resistencia a la rodadura

Mantaras *et al.* (2004) en su libro nos mencionan que el contacto entre la llanta y la superficie de rodadura son provocadas por la adhesión e histéresis, donde la fuerza de adhesión se genera por la atracción entre ambas superficies en contacto y el fenómeno de histéresis, son debidas a la constante deformación que sufre la banda de la rodadura por las irregularidades de la superficie, como se puede ver en la Figura 3:

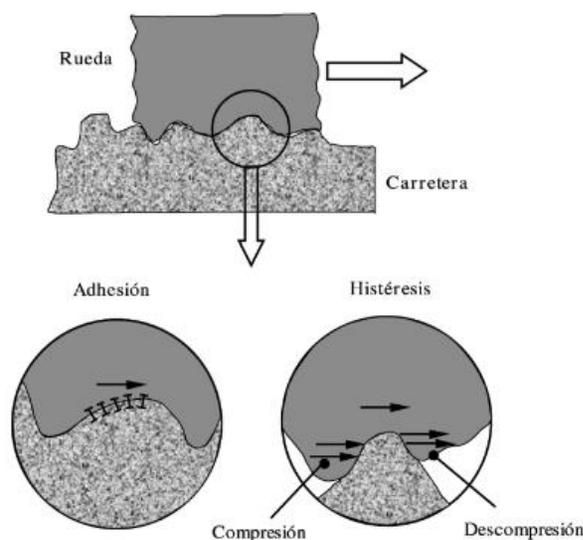


Figura 3-Fenómenos que provocan la adherencia.

Fuente: Mantaras *et al.* (2004)

Jazar *et al.* (2010) publica un libro donde estudia la resistencia a la rodadura y la adherencia, desde la perspectiva mecánicas brindando parámetros establecidos del material con el que se construía la superficie a diferentes velocidades. Posteriormente Piro (2012) nos presenta varios escenarios donde se analiza la resistencia a la rodadura, considerando que un cuerpo (neumático) rueda sobre una superficie, donde por la carga que transmite el peso del vehículo a las llantas ocurren tres escenarios, la superficie es lo suficientemente dura para no sufrir una deformación, el segundo escenario es cuando la superficie se deforma y el neumático se mantiene sólido y por en su último escenario, ambos se deforman. A eso Di Rado & García (2013) nos dicen que el material con el que se construyen los neumáticos, las condiciones del caucho, así como la condición del camino, influyen en la resistencia a la rodadura y este fenómeno se produce cuando la presión normal en la mitad delantera de la huella es mayor que en la mitad trasera y esto provoca fuerzas que llegan a la rueda que se aplican al centro de giro y esta se desplazamiento en la dirección del rodamiento, generando una resistencia al giro. Añadiendo información a esto, García (2019) nos dice que la resistencia a la rodadura se conforma por las características del material con la se construye la superficie de rodamiento y este valor tiene que ser mayor cuando no sirvan los frenos.

Este valor toma relevancia en el diseño de las rampas de emergencia ya que es el valor que se ingresa para calcular la longitud efectiva de frenado, mayormente se considera una superficie de rodamiento a base de grava que debe cumplir con el tamaño y la forma de sus partículas y su resistencia al desgaste (Cadengo *et al.*,2022). Los valores de resistencia a la rodadura se muestran en la Tabla 1.

Normalmente se emplean arenas hasta gravas y que cumplen con los valores de resistencia a la rodadura de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4-Resistencia a la rodadura de diferentes materiales

Material de la cama de frenado	Resistencia a la rodadura (kg/1.000kg del peso bruto del vehículo)	Pendiente equivalente	Rm
Tierra, arenosa, suelta	37	3.7	0.037
Grava triturada, suelta	50	5.0	0.05
Grava de río, suelta	100	10.0	0.10
Arena	150	15.0	0.15
Gravilla suelta	250	25.0	0.25

Fuente: Cadengo *et al.* (2022)

2.3.2. Modelos de la interacción del vehículo-superficie

Zhang *et al.* (2013) crea un modelo interactivo del neumático con superficie de rodamiento, utilizando un escenario donde la rueda al entrar en contacto con el material ejercerá una presión mayor a la que puede resistir a la compresión el material. El modelo se representa en la Figura 4.

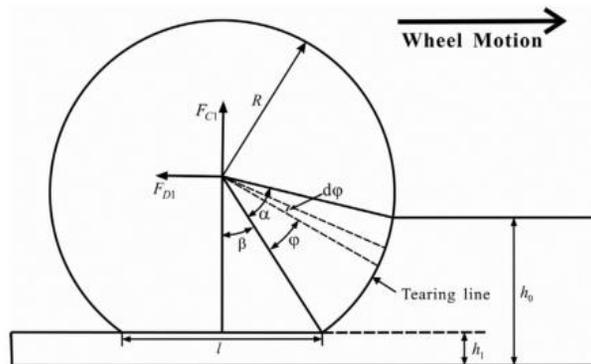


Figura 4-Geometría de la rueda sobre una superficie de concreto celular.

Fuente: Recuperado de Zhang *et al.* (2013)

En base a ese modelo se propuso la Ecuación 7 y 8:

$$F_{D1} = BR\sigma_0[\cos\beta - \cos(\beta + \alpha)] + \frac{BkR^{n+1}}{(n+1)h_0^n} [\cos\beta - \cos(\beta + \alpha)]^{n+1} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_{C1} = & BR\sigma_0[\sin(\beta + \alpha) - \sin\beta] + 2BR\sin\beta\sigma_0 \\ & + 2 \frac{BkR^{n+1}}{h_0^n} \sin\beta[\cos\beta - \cos(\beta + \alpha)]^n \\ & + \frac{BkR^{n+1}}{h_0^n} \int_0^\alpha [\cos(\beta + \varphi) - \cos(\beta + \alpha)]^n \cos(\beta \\ & + \varphi) d\varphi \end{aligned} \quad (12)$$

Donde:

F_{D1} = Resistencia a la rodadura (kN)

σ_c = Resistencia a la compresión (MPa)

B = Ancho de la llanta del vehículo (m)

R = Radio de la llanta del vehículo (m)

α = Ángulo del segmento de arco en la interfaz entre llanta y superficie

h_0 = Profundidad inicial del lecho de detención del concreto celular (m)

h_1 = Profundidad final del lecho de detención del concreto celular después de la compresión (m)

k = coeficiente del modelo constitutivo de la ley de potencia (MPa)

n = Índice de potencia del modelo constitutivo de la ley de potencia.

F_{C1} = Fuerza de soporte vertical (kN)

Posteriormente Qin *et al.* (2022) propone un modelo donde el tamaño de la grava la es característica principal para obtener la resistencia a la rodadura, como se muestra en la Figura 5.

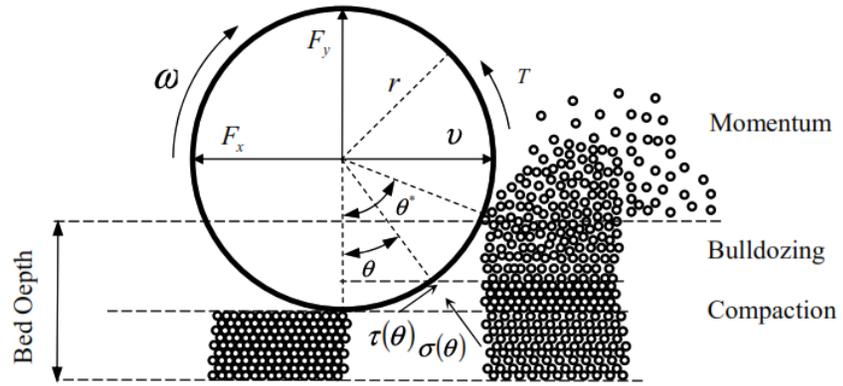


Figura 5-Geometría de la rueda sobre una superficie de grava.

Fuente: Recuperado de Qin et al. (2022)

En este modelo se analizan los parámetros que provienen del vehículo como son la carga y el tamaño de las llantas y las otras variables las aporta la superficie de contacto como son ángulo de contacto, resistencia a la compresión, buscando obtener resistencias mayores (F_x), para obtener longitudes de frenado menores. Obteniendo las Ecuaciones 8, 9 y 10, para las fuerzas en el plano cartesiano x, y, así como el torque de la llanta.

$$F_x = rb \left\{ \int_{\theta}^{\theta^*} \tau(\theta) \cos \theta d\theta \right. \quad (8)$$

$$\left. - \int_{\theta}^{\theta^*} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \quad (9)$$

$$F_y = rb \left\{ \int_{\theta}^{\theta^*} \tau(\theta) \sin \theta d\theta \right. \\ \left. + \int_{\theta}^{\theta^*} \sigma(\theta) \cos \theta d\theta \right\}$$

$$T = r^2 b \left\{ \int_{\theta}^{\theta^*} \tau(\theta) d(\theta) \right\} \quad (10)$$

Donde :

r =Radio de la llanta del vehículo (m)

b =profundidad de huella (m)

θ = Ángulo del segmento de arco en la interfaz entre llanta y superficie

$\sigma(\theta)$ =Resistencia a la compresión (MPa)

$\tau(\theta)$ =Resistencia al esfuerzo cortante (MPa)

T =torque externo de la llanta

2.4. Fuerzas que intervienen en la detención de un vehículo

Actualmente hacer simulaciones en escala real, es muy costoso por ello se han implementado modelos numéricos, para predecir el comportamiento de tubos de aluminio en un choque bajo carga estáticas y dinámicas (Mirfendereski *et al.*, 2008). El análisis de la dinámica vehicular es un tema complejo, ya que para poder ejecutar las ecuaciones de forma correcta es necesario integrar diferentes parámetros, es por ello que la modelación matemática sirve para recrear escenarios, evitando riesgos de pérdidas humanas. ahorro en colocar materiales para ensayos en el sitio y contribuye de gran manera en mejorar diversos campos de la seguridad vial (Di Rado & García, 2013).

En cuestiones de diseño de carreteras, existe un manual de la Dirección General de Servicios Técnicos (2018), el cual nos dice que en las rampas descendientes interactúan cuatro fuerzas que se oponen al movimiento. las cuales son; fuerza de inercia (F_i), presión del aire (F_a), resistencia al rodado de las llantas (F_r), la pendiente del camino y la fuerza de gravedad del vehículo, estas se visualizan en la Figura 6.

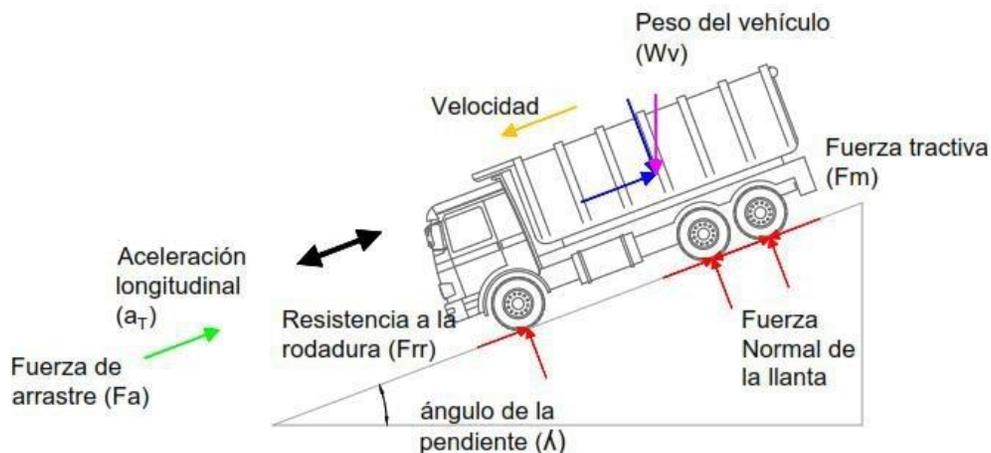


Figura 6-Fuerzas actuantes en una rampa.

Fuente: Recuperado de Ramírez. J.E. (2015)

Velasteguí (2015), nos dice que la resistencia a la rodadura junto con la resistencia aerodinámica del vehículo de proyecto son las fuerzas que intervienen en el proceso de frenado, este proceso se debe a la fricción que existe entre el neumático-superficie y las pérdidas mecánicas en el sistema de transmisiones. Para el diseño de las rampas se considera el caso más desfavorable, en el cual el vehículo no tiene freno.

Con la implementación de tecnologías en el desarrollo de los modelos y las simulaciones, en escenarios que no se puedan llevar a la práctica se utiliza un *software* como MATLAB para desarrollar escenarios ideales para evaluar la propuesta de cada autor.

En Pérez *et al.* (2010) implementaron la simulación utilizando MATLAB para conocer el comportamiento dinámico de regeneración Hidráulico- mecánico de un camión. Zhang *et al.* (2013) modelaron y simularon las fórmulas para evaluar las distancias de parada de un avión tipo B727. También Hu *et al.* (2022) desarrollaron un método para el control de frenado seguro de un vehículo fuera de control a varias velocidades y diferentes pesos.

2.5. Variables para la simulación de distancia de frenado

En las distancias de frenado, se centran en tres variables principales; velocidad, peso del vehículo y material de la superficie (Qin *et al.*,2022).

Fueron García & Rivera (2009) quienes realizaron un modelo donde propone que la velocidad con la que entra el vehículo antes de ingresar a una rampa de frenado. mostrada en la Ecuación 9.

$$v_0 = 3.6\sqrt{2\mu g d_f} \quad (13)$$

Donde:

μ = Resistencia a la rodadura del material con que se conformara la cama de frenado (Adimensional).

g = Fuerza de la gravedad (m/s²)

d_f = Distancia de frenado (m)

En Chen *et al.* (2008) reportan un modelo para la transferencia del peso del vehículo de carga a los neumáticos, para poder ser ingresado al modelo de distancia de parada, como se muestra en la Ecuación 10:

$$M \cdot a_x = - \sum Fx - M \cdot g \cdot \mu \quad (14)$$

Donde:

μ = Resistencia a la rodadura del material con que se conformara la cama de frenado (Adimensional).

g = Fuerza de la gravedad (m/s²)

M = Peso bruto del vehículo de diseño (kg)

Fx = Fuerzas en el eje x

a_x = Aceleración longitudinal del vehículo

En cuestiones del material Qadi & Ortiz (1991) proponen una velocidad en función del material (grava) como se muestra en la Ecuación 11:

$$V_j = V_{j-1} \left(1 - \frac{d N_{wc} R_c}{12 V_{j-1}^2 M_T} \right) \quad (15)$$

Donde:

V_{j-1} = Velocidad de impacto con j th partícula (ft/seg)

V_j = Velocidad después del impacto (ft/seg)

d = Diámetro de la partícula (in)

M_T = Masa del neumático (lb-seg²/ft)

N_{wc} = Numero de ruedas involucradas en la resistencia a la compactación (adimensional)

R_c = Resistencia a la compactación (lb/in²)

2.6. Transporte de carga

Se le denomina Transporte de carga a los vehículos de gran magnitud que de forma directa o indirectamente están relacionados con el transporte de productos de un punto de origen a un punto de destino (Moral, 2014).

De acuerdo a la normativa PROY-NOM-012-SCT2-2017 en México se tiene 7 clases de vehículos de diseño, como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5- Vehículo y nomenclatura

<i>Configuración vehicular</i>	<i>Nomenclatura</i>
Autobús	B
Camión Unitario	C
Tractocamión	T
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R y T-S-S

Fuente: Normativa mexicana PROY-NOM-012-SCT2-2017

En esta norma igual, se determina el peso bruto vehicular permitido por ejes, en toneladas y por tipo de carretera, de acuerdo a la Tabla 6.

Tabla 6- Peso Bruto Vehicular permitido

VEHÍCULO	NÚMERO DE EJES	N. DE LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	19.0	16.5	14.	13.0
B3	3	8	24.0	19.0	17.	16.0
B3	3	10	27.5	23.0	20.	18.5
B4	4	10	30.5	25.0	22.	21.0
C2	2	6	19.0	16.5	14	13.0
C3	3	8	24.0	19.0	17	16.0
C3	3	10	27.5	23.0	20	18.5
C2-R2	4	14	37.5	35.5	N	NA
C3-R2	5	18	44.5	42.0	N	NA
C3-R3	6	22	51.5	47.5	N	NA
C2-R3	5	18	44.5	41.0	N	NA
T2-S1	3	10	30.0	26.0	22	NA

T2-S2	4	14	38.0	31.5	28	NA
T3-S2	5	18	46.5	38.0	33	NA
T3-S3	6	22	54.0	45.5	40	NA
T2-S3	5	18	45.5	39.0	34	NA
T3-S1	4	14	38.5	32.5	28	NA
T2-S1-R2	5	18	47.5	NA	N	NA
T2-S1-R3	6	22	54.5	NA	N	NA
T2-S2-R2	6	22	54.5	NA	N	NA
T3-S1-R2	6	22	54.5	NA	N	NA
T3-S1-R3	7	26	60.5	NA	N	NA
T3-S2-R2	7	26	60.5	NA	N	NA
T3-S2-R4	9	34	66.5	NA	N	NA
T3-S2-R3	8	30	63.0	NA	N	NA
T3-S3-S2	8	30	60.0	NA	N	NA
T2-S2-S2	6	22	51.5	NA	N	NA
T3-S2-S2	7	26	58.5	NA	N	NA

Fuente: Normativa mexicana PROY-NOM-012-SCT2-2017

Mondragón *et al.* (2021) nos dicen que la clasificación vehicular y los pesos por eje de carga, se han usado en la actualidad para obtener espectros de carga de los vehículos que circulan en la red carretera mexicana.

Mendoza *et al.* (1992) exponen que los pesos normados en las carreteras mexicanas son mayores a los permitidos y esto es para el eje doble (tándem), lo cual conlleva que las fórmulas norteamericanas que se usan en nuestro país donde se considere el peso, se subestimen en el diseño.

2.7. Efectos de las fuerzas G en la distancia de frenado

Evans & Wasielewski (1983) encontró que en distancias más cortas los vehículos tienen mayor probabilidad de sufrir accidentes. En Peterson *et al.* (1999) nos dicen que la tolerancia humana al cambio de velocidad dividido entre la constante de gravitacional es igual al cambio de velocidad dividido por la constante gravitacional. Como se puede ver en la siguiente Ecuación 13:

$$G = \frac{a}{-g} = \frac{V_0^2}{\Delta X 32.2 \text{ ft/seg}^2} \quad (16)$$

Donde V_0 es el cambio de velocidad en pies por segundo y Δd está en pies. Obteniendo que el valor máximo al cambio de velocidad es de 30 fuerzas G para un adulto sano. A esto af Wåhlberg (2000) agrega que existe una relación física entre la fuerza de frenado y el tiempo. con esto se deduce que un conductor siempre tendrá mayor fuerza de frenado en una distancia más corta. en comparación de una distancia mayor. También autores como Weaver *et al.* (2006) en su investigación nos reportan que en accidentes donde se obtengan impactos mayores a 50 G es más probable de sufrir daños mortales en la cabeza y con valores mayores a 150 G puede provocar la muerte. Abundando en este tema en Magiera *et al.* (2017) se evalúa las aceleraciones que actúan sobre un maniquí Hybrid III durante un proceso de emergencia, en donde se utiliza la fuerza de gravedad en caída libre, con los resultados obtenidos se determinó la influencia que tenía en la salud. Aplicando las investigaciones anteriores, Bello *et al.* (2018) utilizaron las vibraciones vehiculares en función de la aceleración del vehículo producto de la gravedad (fuerza g) para diseñar acelerómetro programado para detectar el mantenimiento de la carretera. Fue Bhatnagar y Ram (2021) quienes nos brindan un concepto de las fuerzas G. como el equivalente de la fuerza gravitacional, utilizada como medida de fuerza por unidad de masa. Las fuerzas G se dividen en tres componentes vectoriales: G_x , G_y , G_z .

Fonseca *et al.* (2022) en su artículo nos exponen que los efectos de las aceleraciones de duraciones cortas se dividen en dos. Tolerables, la cuales pueden dejar como consecuencia hematomas y raspones y las aceleraciones fatales, las cuales dejan fracturas, lesiones internas que pueden incapacitar al conductor. Obteniendo que para ser un valor tolerable se tenga un valor de 11G -12G en 0.1 seg. y para lesiones fatales 45G durante un 0.1 seg.

3. METODOLOGIA

La metodología está guiada por cuatro pasos fundamentales. En el primer paso se hizo una exhaustiva recopilación de la información existente, para posteriormente analizar dicha información para el desarrollo de un modelo analítico, el cual se validó en un escenario real. Por último, en el paso cuatro se analizaron los resultados obtenidos en la simulación del modelo planteado en esta tesis.

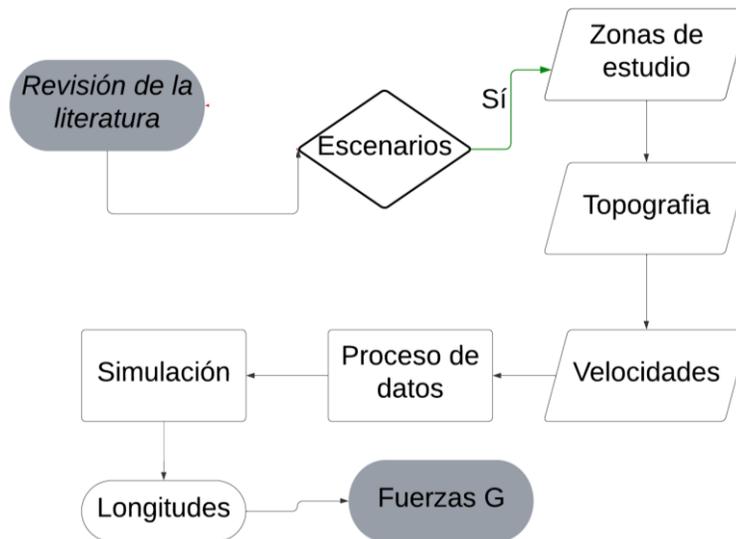


Figura 7-Esquema de metodología.

Fuente-Elaboración propia.

Detalles del desarrollo de la metodología propuesta.

- 1) Se partirá revisando la literatura, acerca de la información existente del tema considerando los escenarios donde se analizaron las rampas de frenado de acuerdo a lo propuesto por Hu *et al.* (2022) en donde se buscaron las tres variables que influyen la longitud de frenado, las cuales son; velocidad y material con la que se construye la rampa de frenado.
- 2) Para la recopilación de datos del material se obtuvieron los parámetros del vehículo y de la vía.

- 3) Para construir el modelo analítico se creó un nuevo directorio con las ecuaciones de Vera *et al.* (1995) donde se recreó un escenario donde el vehículo de diseño está fuera de control y sin frenos. Para la simulación se calibrará el modelo ingresando los valores obtenidos con un caso real (rampa México-Puebla).
- 4) Considerando los resultados obtenidos, se estimó la longitud de frenado, se someterá a un análisis estadístico. Se obtuvieron velocidades de entrada, longitudes y fuerzas G, con esto se realizó una comparativa con los valores aceptados por la literatura.

1. Adquisición de la información

El diagrama presentado en la Figura 7 inicia con la adquisición de la información, en esta etapa se realizó una revisión bibliográfica de los autores que reportan información relevante vinculada con las rampas de emergencia y asociada con la presente investigación. Esta información se utilizó para revisar el estado del arte de las bases del funcionamiento de las rampas de emergencia, encontrando variables que se necesitaban para el cálculo de la longitud de las mismas. Para esto, se consideraron los parámetros de operación del vehículo, de la vía y ambientales entre las que se obtuvieron velocidades, pendiente y masa.

1.1. Elección de las zonas de estudio.

Como primer paso, se buscó conocer el tamaño de la muestra de rampas a seleccionar, esto se obtuvo con la Ecuación 14 (Boza *et al.*, 2016), en la cual conocemos el tamaño de la población que es de 75 rampas totales.

$$n = \frac{NZ_{\alpha/2}^2 pq}{e^2(N-1) + pqZ_{\alpha/2}^2} \quad (14)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

$Z_{\alpha/2}^2$ = Valor de la distribución normal estándar para un determinado nivel de confianza.

N =Tamaño de la población.

e =Error de estimación máximo tolerable.

p =Probabilidad de éxitos.

q = Probabilidad de fracasos ($1- p$)

Para el cálculo del tamaño de la muestra se toma un valor de distribución normal de 2.58, un tamaño de población de 75, un error del 10% un nivel de confianza del 99%.

$$n = \frac{(75)(2.58)^2(0.01)(0.99)}{(0.10)^2(75 - 1) + (0.01)(0.99)(2.58)^2} = 6.13 \approx 6.00$$

A partir del tamaño de la muestra calculado se tomó una muestra de 5 rampas de frenado en el estado de Querétaro, Michoacán, y 1 rampa en el estado de Puebla de las 75 existentes en México, las cuales se encuentran distribuidas como se muestra en la Figura 8.

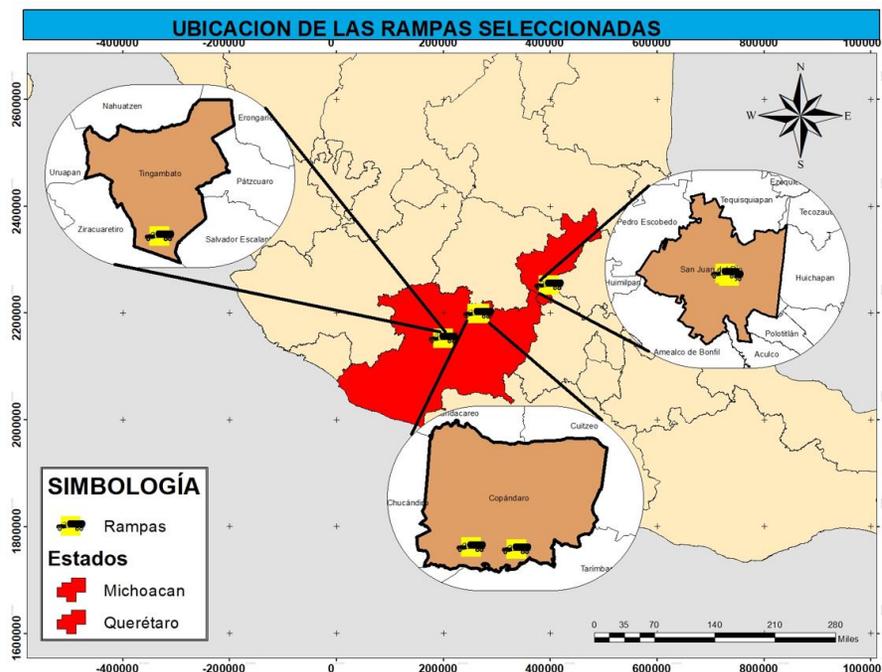


Figura 8-Rampas Seleccionadas

Fuente-Elaboración propia.

Una vez obtenida la muestra de las rampas se identificaron los nombres, las coordenadas geográficas y el kilometraje en el que se encuentran, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7-Información de las rampas seleccionadas.

Nombre	Kilometraje	Latitud	Longitud
México-Querétaro	157+420	20.362	-99.972
México-Querétaro	158+580	20.368	-99.981
Libramiento Poniente de Morelia	001+680	19.875	-101.212
Libramiento Poniente de Morelia	006+800	19.876	-101.251
Pátzcuaro-Uruapan	084+400	19.446	-101.853
México-Puebla	39+220	19.315	-8.820

Fuente-Elaboración propia.

1.2. Topografía.

Con la selección de las rampas de emergencia, se obtuvieron los perfiles topográficos de cada una de ellas, los cuales se definieron el inicio y el final de las pendientes en descenso, como se muestra en la Figura 9, 10, 11, 12, 13 y 14, donde se muestran longitudes variables, las cuales corresponden a la morfología y la longitud previa al ingreso de las rampas de emergencia seleccionadas.

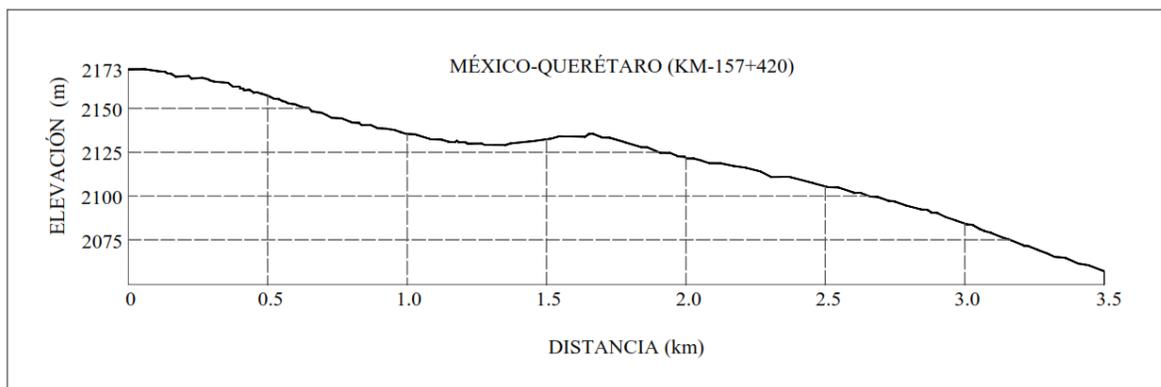


Figura 9-Rampa 1, México -Querétaro (157+420)

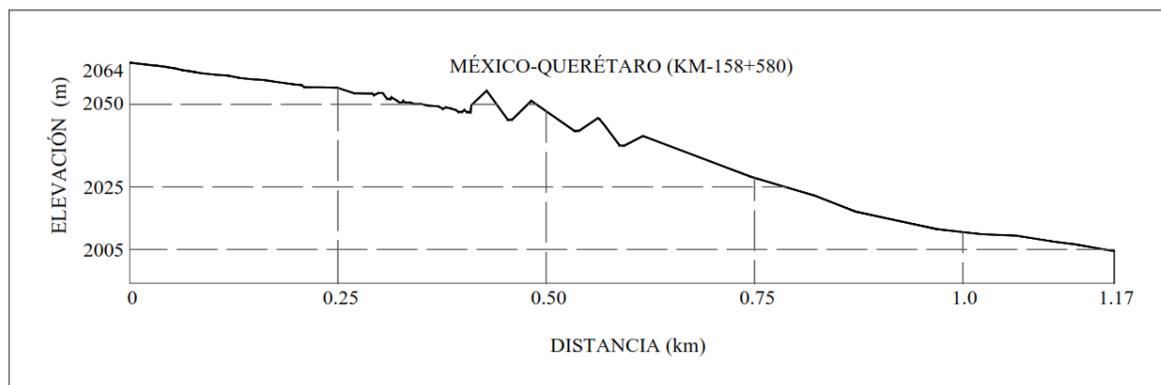


Figura 10-Rampa 2, México -Querétaro (158+580)

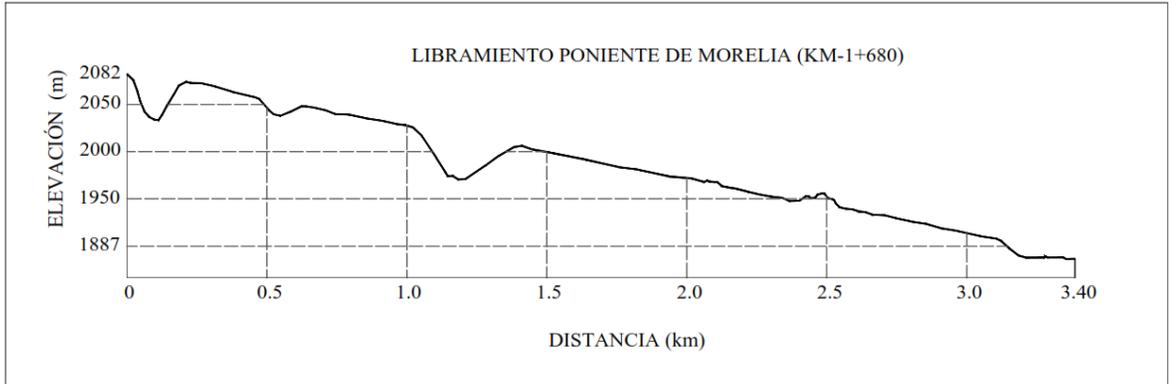


Figura 11-Rampa 3, Libramiento poniente de morelia (1+680)

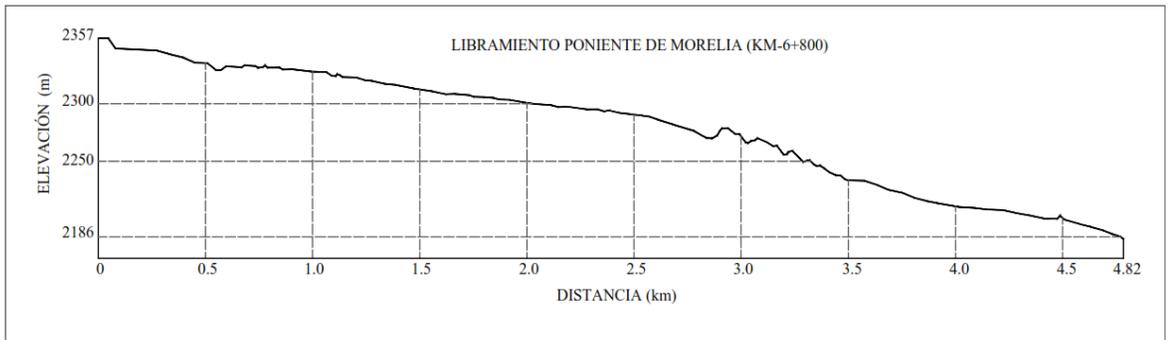


Figura 12-Rampa 4, Libramiento poniente de morelia (6+800)

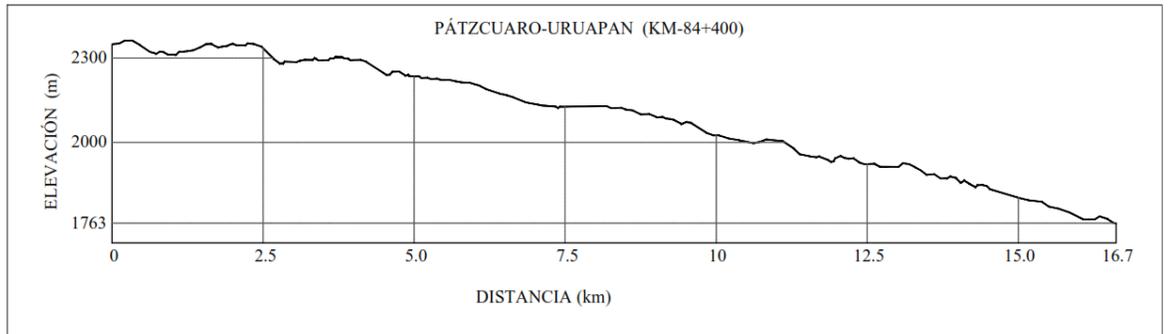


Figura 13-Rampa 5, Pátzcuaro-Uruapan (84+400)

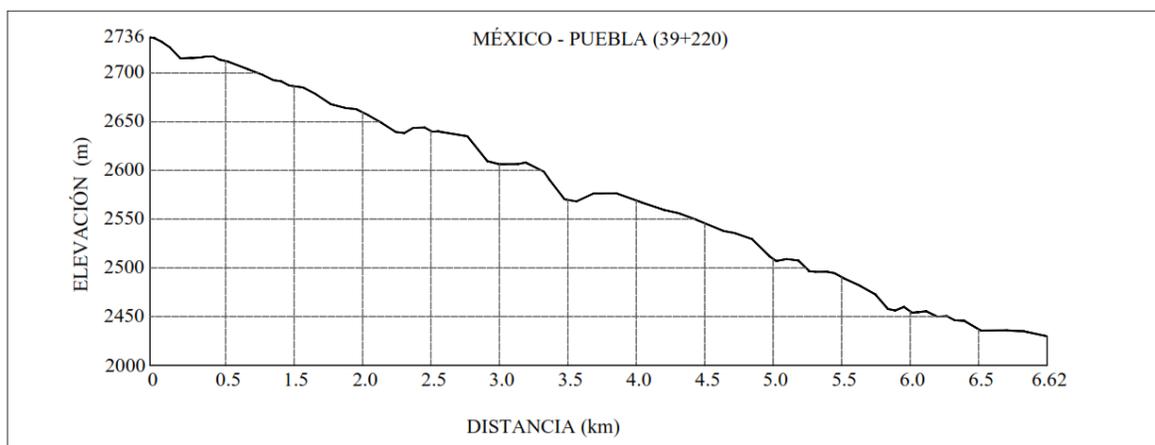


Figura 14-Rampa 6, México-Puebla (39+220)

Con los perfiles topográficos obtenidos, en el *software* AutoCAD 2022, versión estudiantil, se procesaron los perfiles topográficos en escala 1:1, donde se trazó una rasante lo más cercano al terreno natural, estableciendo segmentos a cada 50 metros como se muestra en la Tabla 8; uniendo con una tangente, el segmento 1 con el 2, 2 con el 3 y así sucesivamente hasta el final de cada perfil, obteniéndose las pendientes y las distancias, previos al ingreso de las rampas.

Tabla 8-Segmentos obtenidos.

Nombre de la rampa	Longitud de análisis (m)	Número de segmentos
<i>México-Querétaro (157+420)</i>	3,500.00	70
<i>México-Querétaro (158+580)</i>	1,181.79	24
<i>Libramiento Poniente de Morelia (001+680)</i>	3,386.44	68
<i>Libramiento Poniente de Morelia (006+800)</i>	4,783.62	96
<i>Pátzcuaro-Uruapan (084+400)</i>	16,420.4	329
<i>México-Puebla (39+220)</i>	6,620	133

Fuente-Elaboración propia.

1.3. Velocidades

Posteriormente a la segmentación de los perfiles topográficos, se obtuvieron las velocidades de las carreteras donde se alojan las rampas seleccionadas, esto se hizo mediante el estudio de velocidades de punto (SICT, 2023) el cual consta de la velocidad de los automóviles, autobuses y camiones en diferentes sitios de

la red carretera, en un instante donde pasan los vehículos, posteriormente se hace un análisis estadístico del *percentil* 98 y 85, agrupados por entidades federativas. Para nuestro modelo se tomaron las velocidades de operación solo del transporte de carga (camiones). Como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9-Velocidades de punto.

Nombre de la carretera	Kilometraje	Velocidad 1 (km/h)	Velocidad 2 (km/h)	Velocidad 3 (km/h)
México-Querétaro	157+420	78.00	88.00	105.00
México-Querétaro	158+580	80.00	90.00	105.00
Libramiento Poniente de Morelia	001+680	62.00	71.00	85.00
Libramiento Poniente de Morelia	006+800	62.00	71.00	85.00
Pátzcuaro-Uruapan	084+400	80.00	88.00	94.00

Fuente-Elaboración propia.

1.4. Masa

Se tomaron en cuenta los valores medidos en campo de la carga que viaja en el sistema de transporte carretero, para esto se solicitó el Peso Bruto vehicular de las diferentes configuraciones vehiculares medidas en el centro de control de peso llamado “Calamanda”, de los años 2020 al 2023. El centro de control se ubica en las coordenadas; Latitud: 20°32'36.79"N, Longitud: 100°12'5.44"O. En el municipio del Marqués, Querétaro. Como se muestra en la Figura 15.

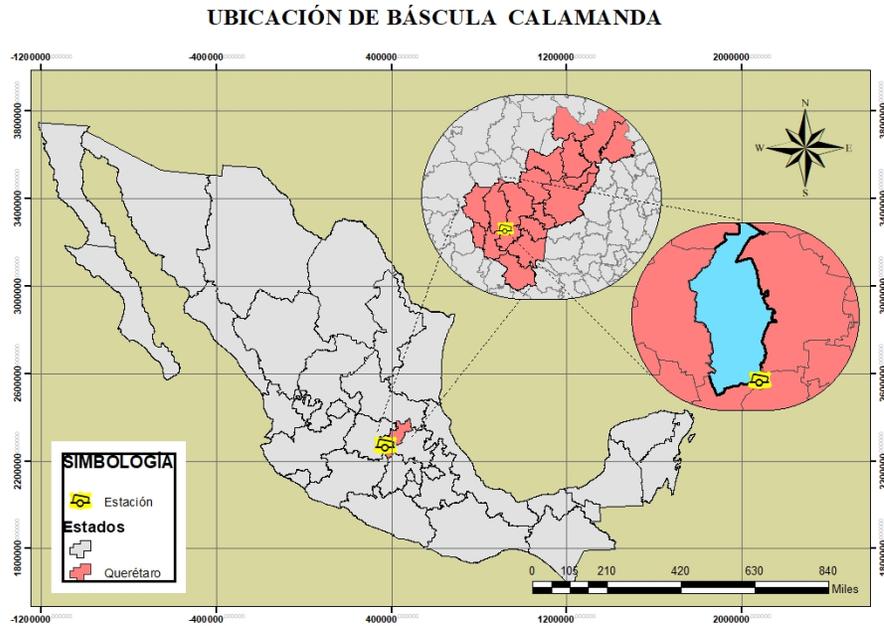


Figura 15-Localización del centro de control de peso.

Con los datos proporcionados, se organizó y depuró la información; esto consta de ordenarlo por las 5 configuraciones vehiculares representativas, las cuales son camiones unitarios, tracto camión y camión doblemente articulado (C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4), de menor a mayor, eliminando los pesos de las configuraciones que no se encontraban dentro de las 5 anteriores. Con lo anterior, se calcularon; los pesos promedios, el valor máximo, mínimo de cada año proporcionado y con esta información se realizaron las gráficas de cada una de las configuraciones vehiculares antes descritas, donde se elaboró una tabla de frecuencias agrupadas en marcas de clase en rangos de 0.5, luego se graficaron los valores obtenidos donde en el eje de las "x" se muestra el peso con el que transitan y en el eje de las "y" la frecuencia de dichos pesos; se tomaron como valores permitidos los pesos establecidos en la norma NOM-012-SCT-2-2017.

2. Procesamiento de datos

Con los datos obtenidos en el paso anterior, se procedió a calcular las velocidades de entrada de las rampas de emergencia seleccionadas con los modelos existentes que comprenden las Ecuaciones 1, 2 y 3 descritas en el marco teórico. Donde la Ecuación 1, que corresponde a la norma PROY-NOM-036-SCT2-2023; donde se

considera el cambio de energía potencial en energía cinética, desarrollando la Ecuación 2 y el modelo 3 que propone Rhaka et al. (2001), el cual considera la integración de las fuerzas que se oponen al movimiento, incluyendo los parámetros del vehículo y la superficie de rodamiento.

Para lo anterior, se analizaron 70 pendientes para la rampa 1, 24 para la rampa 2, 68 para la rampa 3, 96 para la rampa 4, 329 para la rampa 5 y 133 para la rampa 6. Con los datos obtenidos se realizó una tabla con las velocidades mínimas, máximas, promedio y desviación estándar de las primeras 5 rampas, la rampa 6 fue utilizada para validar el modelo propuesto.

3. Diseño del modelo

Para el desarrollo del modelo, se identificaron los parámetros que interactúan para que un vehículo aumente o disminuya su velocidad, para esto se clasificaron en categorías las cuales fueron: vehículo, ambientales y de operación del vehículo, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10- Parámetros utilizados

Categoría	Parámetro
<i>Vehículo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de arrastre (Cd) • Área frontal del vehículo (Af) • Coeficiente de resistencia a la rodadura (fr) • Masa del vehículo (m)
<i>Ambientales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad del aire (ρ) • Gravedad (g)
<i>Operación del vehículo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad (V) • Pendiente (θ) • Aceleración (a)

Para desarrollar el modelo, se constató que un perfil topográfico estaba conformado por pendientes positivas que ayudaban a disminuir las velocidades y pendientes negativas que aumentaban la velocidad, partiendo de este criterio se reformuló la Ecuación 15 (Aparicio et al., 1995), donde se analizan las fuerzas que se oponen al movimiento (resistencia de rodadura, resistencia al aire y resistencia por pendiente) por separado, al integrarlas al modelo propuesto, estas fuerzas se suman para

obtener las fuerzas que se oponen al movimiento y al aplicar la segunda ley de Newton, donde estas fuerzas se dividen entre la masa se obtiene la aceleración en los puntos analizados, los cuales, posteriormente se obtuvieron las velocidades de entrada de acuerdo con la ecuación de movimiento uniformemente acelerado, donde se contempla la distancia entre segmentos.

La Ecuación 16 muestra el coeficiente de resistencia a la rodadura en función de las velocidades obtenidas, las cuales f_0 representa la presión de inflado (material del neumático) y f_s representa la superficie de la rampa (material de la rampa).

Esta fórmula se vuelve iterativa, ya que la velocidad final obtenida del segmento inicial, es la velocidad inicial que se ingresa al siguiente segmento.

$$V_e = \left(V_o^2 + \left[\frac{Fp}{V_o} - (m \cdot g(f_r + \sin \theta) + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A_r \cdot V^2 + m \cdot g \cdot \cos \theta) \right] \frac{D_s}{m} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2.5} \quad (16)$$

$$(17)$$

$$L_e = \frac{V_f - V_e}{2} t$$

Teniendo la velocidad de ingreso a la rampa se calcularon las nuevas longitudes de las rampas con la Ecuación 17, donde anteriormente se habían calculado el tiempo y teniendo las longitudes se procedió a calcular las desaceleraciones y las fuerzas G en cada rampa. Estas fórmulas se programaron en el *software* Matlab versión R2024a para estudiantes.

3.1. Escenarios analizados

Teniendo la fórmula de velocidades de la rampa se analizaron 5 rampas existentes que pertenecen a la muestra tomada en el paso 1. Estas se analizaron con un peso de 38287.5 kg que pertenecen a un promedio de los pesos máximos de un camión unitario de tres ejes (C3) y se utilizó este vehículo debido a que este vehículo tiene una participación del 55.2% en los accidentes en carreteras (Gutiérrez et al., 2009) y por su geometría simple, permite un estudio más directo de sus características como dinámica de la carga. Donde se tomaron dos escenarios; el primero, antes de entrar a la rampa y el segundo durante el ingreso de la rampa. En estos escenarios lo que influye directamente es el coeficiente de resistencia a la rodadura, ya que el primero es para una superficie de asfalto y el segundo una superficie de grava. En total se analizaron 587 segmentos.

3.2. Validación del modelo

Para comprobar los datos obtenidos por la aplicación del modelo desarrollado, se utilizó la validación audiovisual, mediante un video tomado por el personal de Federal de caminos en la rampa México- Puebla (39+220). La rampa mostrada en el video se buscó en Google Earth Pro, donde se estableció el punto de inicio de la toma y el punto de acceso a la rampa como se muestra en la Figura 16.



Figura 16-Ruta del accidente documentado.

Con el inicio y el final de la ruta del vehículo sin frenos se establecieron puntos de control a cada 50 m, con esto se obtuvo el tiempo que tardaba el vehículo en avanzar del segmento 1 al segmento 2 y así sucesivamente hasta el punto final, como se muestra en la Figura 17.

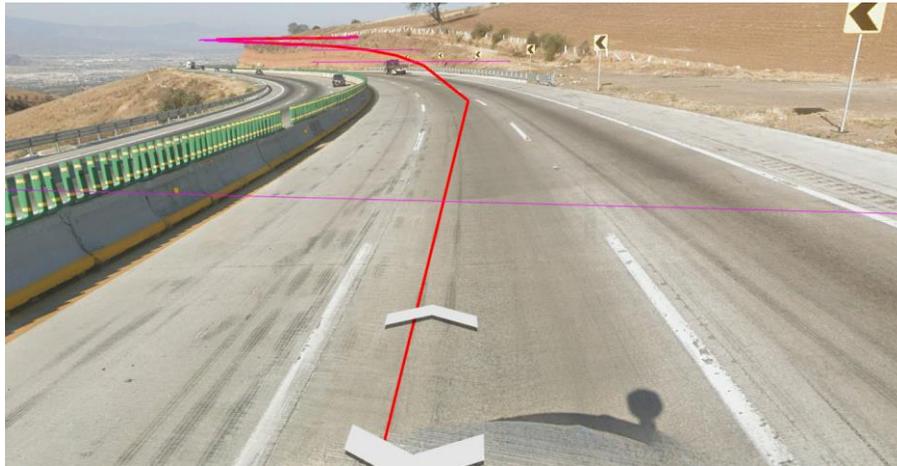


Figura 17-Puntos de control.

Para el desarrollo del modelo se obtuvieron los siguientes datos: velocidad de entrada a la rampa 160 km/h, recorrido de 12 curvas horizontales, tipo de vehículo T3-S2 del grupo Medrano, peso que transportaba de 15 ton, longitud de la rampa existente 340 m.

Con estos datos obtenidos del video se graficaron las velocidades reales contra las velocidades obtenidas en el modelo para saber el error que se obtuvo en cada segmento.

3.3. Análisis estadístico

A través del análisis estadístico de los resultados del modelo propuesto en comparación con los datos reales, se detectan diferencias significativas que permiten evaluar si el nuevo modelo puede predecir con precisión las longitudes de las rampas de frenado en cuestión. Se llevó a cabo un análisis de las longitudes generadas por el modelo propio, en relación con los modelos 1, 2 y 3, utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y correlaciones de las variables que interactúan en este modelo.

4. Resultados y análisis

Se llevó a cabo un análisis comparativo de los datos y resultados obtenidos en esta investigación, centrándose en el análisis estadístico de los modelos existentes, el real y el propuesto. Con este análisis se buscó comprender los resultados y el efecto de la dinámica del vehículo de diseño con el enfoque aplicado a la seguridad vial.

Con los datos obtenidos, se redactó la tesis de grado y se buscó complementar la norma existente con el fin de garantizar la seguridad del usuario.

Para esto se realizó una discusión de autores y se plantearon líneas futuras que surgen a partir de esta investigación.

1. RESULTADOS Y DISCUSION

Para que se origine un accidente debe existir una falla en los elementos que interactúan en una vialidad donde el uso constante de los frenos, provoquen un sobrecalentamiento y estos fallen, pasando a una pérdida del control del vehículo. Existen otras fallas relacionadas al motor y su mantenimiento, condiciones meteorológicas adversas y desgaste en los neumáticos. Es por ello que en este apartado se describen los resultados obtenidos en las cuatro etapas de la metodología para el cálculo de las longitudes de la rampa, lo cual muestra desde los datos que se ingresaron al modelo, los resultados obtenidos y la calibración del modelo.

6.1. Etapa 1-Adquisición de la información

De acuerdo a la base de datos del (Instituto Mexicano del Transporte, 2023), se obtuvieron las coordenadas de la muestra de las rampas de emergencia que se utilizaron para analizar los modelos existentes de velocidades de entrada.

Las 6 rampas seleccionadas están en la Tabla 11, en esta tabla se muestra el código de la carretera al que pertenecen, el nombre, el kilometraje, el sentido y las coordenadas geográficas.

Tabla 11-Rampas seleccionadas, para análisis

CODIGO	NOMBRE	KILOMETRAJE	SENTIDO	LATITUD	LONGITUD
57 D	México- Querétaro	157+420	1	20.362795	- 99.972258
57 D	México- Querétaro	158+580	1	20.368588	- 99.981493
14 D	Libramiento Poniente de Morelia	1+680	2	19.875805	-101.212094
14 D	Libramiento Poniente de Morelia	6+800	2	19.876302	-101.251441

14 D	Pátzcuaro-Uruapan	84+400	1	19.446932	-101.853455
150D	México-Puebla	39+220	1	19.315498	-98.819981

Fuente: Cadengo *et al.* (2022)

6.1.1. Pendientes topográficas

Teniendo las rampas seleccionadas se obtuvieron las pendientes que conforman los perfiles topográficos de cada zona, para esto se trazaron tangentes a cada 50 m, estando lo más cercano al terreno natural, mediante el *software* AutoCAD 2018, los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas, donde se visualiza el número de segmentos, la distancia y la pendiente.

Tabla 12-Pendientes obtenidas de la rampa 1

Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)	Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)
1	50	0.00	36	50	-4.79
2	50	-1.93	37	50	-3.91
3	50	-3.04	38	50	-5.40
4	50	-3.04	39	50	-1.96
5	50	-2.15	40	50	-4.83
6	50	-3.14	41	50	-2.61
7	50	-1.98	42	50	-3.43
8	50	-5.50	43	50	-1.76
9	50	-5.92	44	50	-2.68
10	50	-3.58	45	50	-3.52
11	50	-5.58	46	50	-6.93
12	50	-4.38	47	50	-0.68
13	50	-4.90	48	50	-2.37
14	50	-5.50	49	50	-4.25
15	50	-5.23	50	50	-4.25
16	50	-4.59	51	50	-1.50
17	50	-3.13	52	50	-5.36
18	50	-3.76	53	50	-3.38
19	50	-1.72	54	50	-3.16
20	50	-4.67	55	50	-3.94
21	50	-2.67	56	50	-5.23
22	50	-3.61	57	50	-3.88
23	50	-2.91	58	50	-3.70
24	50	-0.28	59	50	-6.76

25	50	-1.68	60	50	-5.49
26	50	-1.47	61	50	-5.49
27	50	-0.10	62	50	-5.92
28	50	2.80	63	50	-5.82
29	50	1.61	64	50	-6.27
30	50	2.09	65	50	-5.02
31	50	3.42	66	50	-6.04
32	50	-0.27	67	50	-4.26
33	50	2.43	68	50	-5.83
34	50	-3.48	69	50	-3.51
35	50	-2.47	70	50	-6.33

Para rampa México-Querétaro (158+580) tenemos pendientes mínimas de -1.91% y máxima de -10.97%, teniendo una longitud total de 1,181.79 m.

Tabla 13-Pendientes obtenidas de la rampa 2

Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)	Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)
1	50	-5.83	13	50	-2.24
2	50	-3.99	14	50	-9.56
3	50	-3.05	15	50	-9.33
4	50	-3.17	16	50	-7.51
5	50	-1.99	17	50	-8.80
6	50	-3.13	18	50	-7.34
7	50	-6.61	19	50	-5.48
8	50	-4.39	20	50	-3.82
9	50	-2.50	21	50	-1.91
10	50	2.50	22	50	-3.15
11	50	-8.28	23	50	-3.71
12	50	-10.97	24	31.79	-4.42

La Tabla 14 muestras pendientes, que van desde valores negativos indicando descensos hasta pendientes positivas que significan ascenso en algunas partes del perfil topográfico. Como el segmento 1 2 y 10 muestran un descenso pronunciado, representando pendientes peligrosas, el segmento 3 y 4 tienen pendientes positivas significativas.

Tabla 14-Pendientes obtenidas de la rampa 3

Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)	Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)
1	50	-60.72	35	50	-6.82
2	50	-36.43	36	50	-4.12

3	50	36.68	37	50	-5.15
4	50	40.43	38	50	-6.48
5	50	0.77	39	50	-5.47
6	50	-5.03	40	50	-2.69
7	50	-8.46	41	50	-6.58
8	50	-8.32	42	50	-2.00
9	50	-7.39	43	50	-11.65
10	50	-23.13	44	50	-5.99
11	50	-16.44	45	50	-7.28
12	50	12.67	46	50	-5.88
13	50	5.78	47	50	-5.03
14	50	-6.22	48	50	-3.78
15	50	-9.38	49	50	6.00
16	50	-1.79	50	50	2.94
17	50	-6.40	51	50	-23.37
18	50	-4.74	52	50	-5.33
19	50	-6.12	53	50	-7.05
20	50	-4.99	54	50	-3.89
21	50	-19.71	55	50	-6.73
22	50	-43.72	56	50	-6.37
23	50	-43.72	57	50	-4.88
24	50	-6.69	58	50	-8.29
25	50	16.83	59	50	-5.47
26	50	20.60	60	50	-6.14
27	50	19.48	61	50	-6.77
28	50	12.87	62	50	-4.54
29	50	-6.49	63	50	-19.87
30	50	-5.56	64	50	-18.75
31	50	-5.71	65	50	-1.94
32	50	-5.86	66	50	0.28
33	50	-6.05	67	50	-1.76
34	50	-6.82	68	36.44	-1.76

En la Tabla 15 se muestra los segmentos de la rampa 4 del libramiento poniente de Morelia (6+800) donde la mayoría de los segmentos son pendientes negativas, indicando que el recorrido es en descenso, teniendo un segmento (2) de pendiente en descenso pronunciada con -16.38% y el segmento 58 muestra en ascenso pronunciado con 12.27%.

Tabla 15-Pendientes obtenidas de la rampa 4

Segmentos	Distancia	Pendientes	Segmentos	Distancia	Pendientes
------------------	------------------	-------------------	------------------	------------------	-------------------

	(m)	(%)		(m)	(%)
1	50	-2.68	49	50	-3.59
2	50	-16.38	50	50	-2.22
3	50	-0.91	51	50	-2.33
4	50	-0.91	52	50	-4.90
5	50	-0.91	53	50	-6.07
6	50	-3.29	54	50	-5.79
7	50	-5.10	55	50	-5.69
8	50	-4.94	56	50	-7.75
9	50	-8.17	57	50	-8.12
10	50	-0.78	58	50	12.27
11	50	-12.18	59	50	1.42
12	50	6.69	60	50	-10.84
13	50	-1.18	61	50	-7.51
14	50	2.48	62	50	0.72
15	50	-3.57	63	50	-9.94
16	50	-0.04	64	50	-14.48
17	50	-0.08	65	50	2.30
18	50	-2.12	66	50	-13.55
19	50	-1.81	67	50	-7.94
20	50	-2.01	68	50	-8.18
21	50	-0.67	69	50	-8.28
22	50	-7.10	70	50	-8.62
23	50	-1.82	71	50	-0.59
24	50	-0.79	72	50	-3.31
25	50	-4.68	73	50	-6.87
26	50	-3.09	74	50	-6.87
27	50	-3.47	75	50	-4.17
28	50	-2.26	76	50	-7.28
29	50	-3.81	77	50	-5.36
30	50	-3.23	78	50	-4.08
31	50	-2.81	79	50	-3.42
32	50	-3.80	80	50	-3.32
33	50	-1.27	81	50	-1.78
34	50	-1.01	82	50	-1.37
35	50	-3.60	83	50	-2.20
36	50	-0.82	84	50	-0.73
37	50	-1.81	85	50	-2.63
38	50	-2.51	86	50	-3.92
39	50	-2.32	87	50	-3.28
40	50	-3.13	88	50	-3.99
41	50	-2.38	89	50	-1.15
42	50	-1.43	90	50	0.82

43	50	-3.51	91	50	-7.11
44	50	0.00	92	50	-5.04
45	50	-2.51	93	50	-4.88
46	50	-1.58	94	50	-5.74
47	50	-2.34	95	50	-6.89
48	50	-0.88	96	33.62	-9.94

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se tiene un perfil con pendientes positivas y pendientes negativas, donde el segmento 3 muestra una pendiente en ascenso de 13.28%, el segmento 19 muestra una pendiente de 17.72%, siendo las más pronunciadas en el perfil topográfico. Sin embargo, el segmento 48 tiene una pendiente negativa de -21.49% y el segmento 16 de -12.67%, representando cambios significativos de elevación.

Tabla 16-Pendientes obtenidas de la rampa 5

Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)	Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)
1	150	11.47	164	50	-8.78
2	50	11.76	165	50	-3.48
3	50	13.28	166	50	-3.48
4	50	7.03	167	50	-7.41
5	50	2.86	168	50	-10.38
6	50	1.41	169	50	-9.84
7	50	-5.88	170	50	0.48
8	50	-6.15	171	50	0.48
9	50	-6.37	172	50	0.05
10	50	-6.37	173	50	-9.52
11	50	-6.18	174	50	-9.52
12	50	-6.04	175	50	-3.06
13	50	0.20	176	50	1.59
14	50	9.15	177	50	-7.30
15	50	-1.73	178	50	-5.17
16	50	-12.67	179	50	-2.96
17	50	-4.60	180	50	-5.48
18	100	-1.26	181	50	-11.21
19	50	17.72	182	50	-11.21
20	50	4.47	183	50	-2.54
21	50	1.23	184	50	9.27
22	50	2.59	185	50	-2.59
23	50	3.51	186	50	-7.73
24	50	4.61	187	50	-13.78

25	50	8.75	188	50	-13.78
26	50	8.75	189	50	-13.78
27	50	11.49	190	50	-13.78
28	50	11.49	191	50	-12.41
29	50	3.09	192	50	-8.02
30	50	-1.56	193	50	-8.02
31	50	-12.38	194	50	-0.77
32	50	-9.48	195	50	-0.06
33	50	2.26	196	50	-6.97
34	50	3.49	197	50	-6.97
35	50	3.09	198	50	-6.45
36	50	9.26	199	50	-3.82
37	50	7.30	200	50	-3.82
38	50	-10.34	201	50	-3.82
39	50	-0.59	202	50	-4.00
40	50	-0.59	203	50	-4.40
41	50	-0.59	204	50	-4.40
42	50	12.85	205	50	-4.40
43	50	-1.50	206	50	-4.40
44	50	-2.57	207	50	1.41
45	50	-7.27	208	50	4.38
46	50	-7.27	209	50	6.17
47	50	-14.81	210	50	7.98
48	50	-21.49	211	50	4.74
49	50	-21.49	212	50	-0.43
50	50	-21.49	213	50	-0.43
51	50	-19.20	214	50	-0.43
52	50	-16.51	215	50	-0.43
53	50	-8.27	216	50	-0.43
54	50	10.47	217	50	-12.99
55	50	2.37	218	50	-14.49
56	50	-1.05	219	50	-14.49
57	50	-1.05	220	50	-16.69
58	50	-1.05	221	50	-20.72
59	50	8.40	222	50	-13.99
60	50	5.32	223	50	-4.59
61	50	3.33	224	50	-4.59
62	50	-0.71	225	50	-4.59
63	50	-0.08	226	50	-3.13
64	50	12.58	227	50	-3.13
65	50	-12.05	228	50	5.30
66	50	-3.33	229	50	-8.04
67	50	0.64	230	50	-8.56

68	50	0.64	231	50	-8.56
69	50	7.55	232	50	-14.95
70	50	5.24	233	50	10.71
71	50	11.02	234	50	22.16
72	50	-0.75	235	50	9.08
73	50	-0.89	236	50	-7.46
74	50	-9.86	237	50	-6.97
75	50	-1.87	238	50	-3.68
76	50	-9.77	239	50	2.05
77	50	0.40	240	50	-7.13
78	50	0.40	241	50	-15.38
79	50	0.40	242	50	-10.84
80	50	-4.01	243	50	-7.16
81	50	-7.42	244	50	0.29
82	50	-14.02	245	50	0.97
83	50	-14.02	246	50	0.97
84	50	-14.02	247	50	-6.63
85	50	-14.02	248	50	-13.00
86	50	-14.02	249	50	-1.49
87	50	-14.02	250	50	-0.17
88	50	-11.44	251	50	-0.17
89	50	4.01	252	50	-0.17
90	50	18.77	253	50	-0.17
91	50	0.56	254	50	-0.17
92	50	0.56	255	50	11.82
93	50	-12.54	256	50	13.66
94	50	-14.08	257	50	-3.45
95	50	4.01	258	50	-3.70
96	50	-9.75	259	50	-10.99
97	50	-1.75	260	50	-11.13
98	50	0.30	261	50	-11.99
99	50	-6.20	262	50	-12.52
100	50	-4.97	263	50	-17.58
101	50	0.83	264	50	-9.52
102	50	-4.34	265	50	1.86
103	50	-4.34	266	50	1.86
104	50	1.51	267	50	-11.46
105	50	-1.90	268	50	-15.00
106	50	-5.07	269	50	-3.71
107	50	-0.08	270	50	0.45
108	50	-0.08	271	50	6.82
109	50	-1.23	272	50	3.71
110	50	-4.50	273	50	-5.04

111	50	-4.50	274	50	-16.57
112	50	-4.32	275	50	-19.47
113	50	-2.60	276	50	13.62
114	50	-1.27	277	50	-10.42
115	50	-1.27	278	50	-13.65
116	50	-3.74	279	50	-11.91
117	50	-6.55	280	50	-7.33
118	50	-6.32	281	50	12.47
119	50	-8.49	282	50	0.77
120	50	-10.84	283	50	-4.57
121	50	-10.03	284	50	-11.89
122	50	-7.36	285	50	-16.01
123	50	-5.38	286	50	-6.53
124	50	-4.33	287	50	-6.53
125	50	-5.47	288	50	-6.53
126	50	-7.12	289	50	-6.53
127	50	-7.12	290	50	-6.53
128	50	-8.79	291	50	-6.53
129	50	-8.79	292	50	-6.53
130	50	-8.79	293	50	-6.53
131	50	-8.26	294	50	-6.45
132	50	-4.06	295	50	-5.03
133	50	-4.06	296	50	-5.03
134	50	-4.06	297	50	-5.03
135	50	-4.06	298	50	-3.10
136	50	-4.06	299	50	-2.57
137	50	-2.44	300	50	-2.57
138	50	-1.82	301	50	-2.57
139	50	-1.82	302	50	-4.26
140	50	-1.82	303	50	-15.08
141	50	-2.65	304	50	-15.08
142	50	-3.66	305	50	-5.47
143	50	4.70	306	50	-4.87
144	50	0.15	307	50	-5.97
145	50	0.15	308	50	-7.86
146	50	0.15	309	50	-7.86
147	50	0.15	310	50	-7.86
148	50	0.15	311	50	-10.05
149	50	0.15	312	50	-10.94
150	50	0.15	313	50	-10.94
151	50	0.15	314	50	-10.94
152	50	0.15	315	50	-5.07
153	50	0.15	316	50	-0.23

154	50	0.15	317	50	-0.23
155	50	0.15	318	50	-0.23
156	50	0.15	319	50	9.15
157	50	0.15	320	50	12.48
158	50	-1.05	321	50	-7.03
159	50	-10.39	322	50	-7.03
160	50	-0.89	323	50	-11.00
161	50	0.76	324	50	-14.44
162	50	0.76	325	50	-9.30
163	50	-2.55	326	20.4	-6.60

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se observa que la mayoría de las pendientes son negativas, lo que indica que el perfil está en descenso. Donde el segmento 51 tiene una pendiente de -18.92% y el segmento 43 una pendiente de -17.48%. También dentro de las pendientes obtenidas se muestra en el segmento 22 una pendiente de 9.05% en ascenso siendo la pendiente positiva con mayor pronunciación en comparación con los otros segmentos.

Tabla 17-Pendientes obtenidas de la rampa 6

Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)	Segmentos	Distancia (m)	Pendientes (%)
1	51.54	-4.56	53	50	-10.41
2	50	-7.99	54	50	-2.61
3	50	-10.39	55	50	4.33
4	50	-14.67	56	50	6.37
5	50	-5.19	57	50	5.14
6	50	0.29	58	150	-0.02
7	50	0.80	59	50	-4.44
8	50	1.91	60	100	-5.12
9	50	0.62	61	50	-5.01
10	50	-6.17	62	50	-4.70
11	50	-3.35	63	50	-4.60
12	50	-4.59	64	100	-3.28
13	200	-5.39	65	50	-4.64
14	50	-6.41	66	50	-5.25
15	50	-6.80	67	50	-5.36
16	50	-2.14	68	150	-5.80
17	50	-6.76	69	50	-4.80
18	50	-3.50	70	50	-2.67
19	50	-2.15	71	50	-4.02
20	50	-5.54	72	50	-4.99
21	50	-7.41	73	50	-5.56

22	50	9.05	74	100	-13.84
23	50	-9.44	75	50	-11.91
24	50	-5.55	76	50	-2.78
25	50	-3.73	77	50	2.69
26	50	-2.59	78	50	-1.94
27	50	-1.49	79	50	-5.54
28	50	-6.59	80	50	-13.74
29	50	-7.25	81	50	-4.94
30	50	-8.11	82	50	-0.15
31	50	-8.31	83	50	-3.12
32	50	-9.16	84	50	-7.60
33	50	-7.79	85	50	-6.85
34	50	-1.96	86	50	-6.55
35	50	7.26	87	50	-6.96
36	50	3.56	88	50	-7.95
37	50	0.43	89	50	-8.44
38	50	-7.01	90	50	-16.34
39	50	-0.83	91	50	-13.00
40	50	-2.29	92	50	-1.41
41	150	-2.39	93	50	5.73
42	50	-12.56	94	50	-8.59
43	100	-17.48	95	50	-1.89
44	50	-6.90	96	50	1.50
45	50	-3.53	97	50	-3.76
46	100	0.13	98	50	0.81
47	50	0.93	99	50	-4.40
48	50	1.13	100	50	-4.15
49	100	-7.11	101	50	-1.44
50	50	-13.58	102	50	-8.45
51	50	-18.92	103	50	2.60
52	50	-18.36	104	150	0.10

6.1.2. Masa (Peso Bruto Vehicular real)

En México la participación del vehículo de carga es significativa, su peso es regulado por la normativa NOM-012-SCT-2-2017 y se regula con el Peso Bruto Vehicular (PBV) el cual determina la capacidad máxima de carga que puede transportar un vehículo, ya que un uso excesivo disminuye la eficacia de los vehículos. Por ello se solicitaron los datos de los PBV a la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT) de la báscula de verificación

de pesos y dimensiones de calamanda, ubicada en el Estado de Querétaro. Se solicitaron los Pesos Brutos Vehiculares de los años 2020, 2021, 2022 y 2023, como se muestra en la Figura 18. Con los datos proporcionados, se realizó una base de datos, que fue depurada y ordenada por tipo de vehículo para posteriormente realizar un análisis estadístico para conocer los pesos reales por los que circula el transporte de carga por las carreteras federales. Los análisis se realizaron por configuración representativa, mostrando el comportamiento de los pesos por año.



Figura 18-Verificación de peso y dimensiones en la báscula calamanda

Para el primer análisis se escogió el Camión unitario C2. En la Figura 14 se puede apreciar que para el año 2020 solo el 1.17% del total de vehículos presentó un exceso de carga, para el año 2021 este porcentaje subió a 2.17%, para el siguiente año disminuyó a 1.62% y para el año 2023 este porcentaje subió a 1.77%. En esta configuración vehicular puede notar que no circulan con exceso de carga significativo.

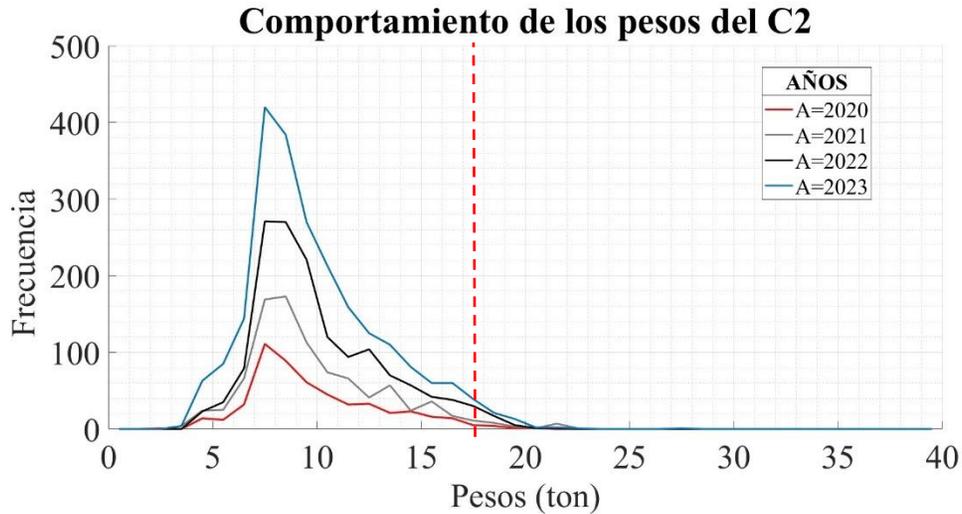


Figura 19-Comportamiento anual de los camiones C2

Como siguiente vehículo de análisis, se estudió los vehículos C3, como se muestra en la Figura 20. En las gráficas se puede notar que el año 2023 tiene valores mayores, en comparación con los años anteriores. En el primer año el porcentaje de vehículos que transitaban con exceso de carga por el estado de Querétaro representaban el 3.02%, al siguiente año fue del 6.94%, posteriormente disminuyó a 5.10% y en el año 2023 el porcentaje fue de 6.22%.

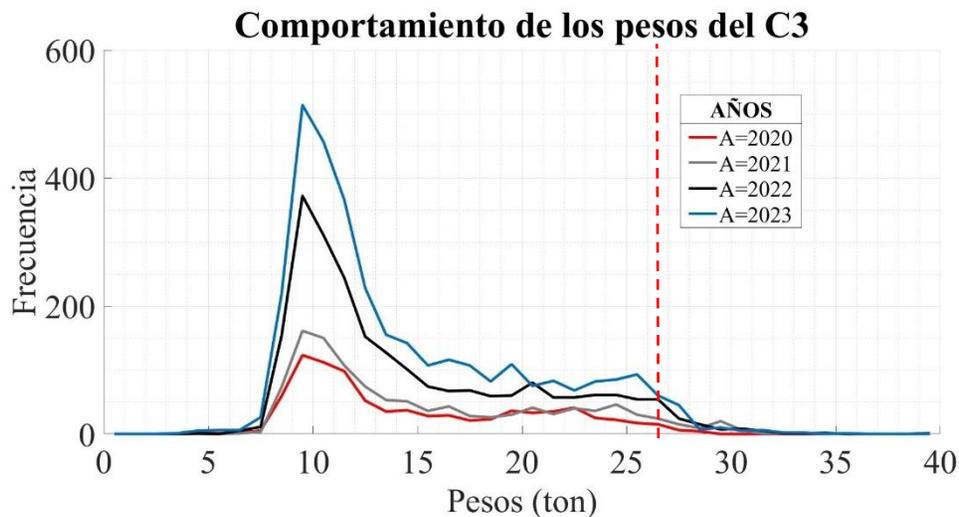


Figura 20-Comportamiento anual de los camiones C3

Para el vehículo T3-S2 se puede ver un comportamiento similar en el aumento de exceso de carga, dependiendo el último año. Para el año 2020 el porcentaje era de 1.42%, para el año siguiente este valor era de 2.13, para el 2022

el porcentaje era 1.92% y para el 2023 este valor fue de 2.03%, teniendo un comportamiento ascendente.

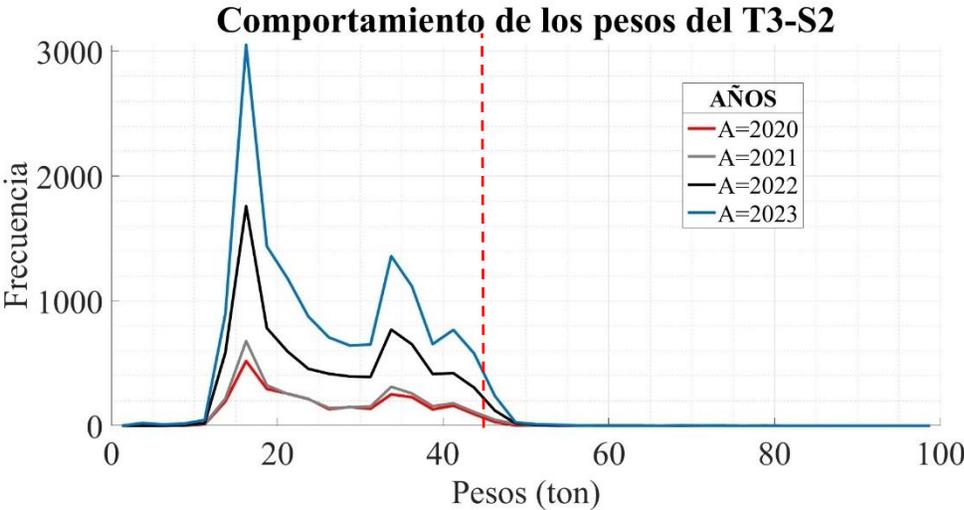


Figura 21-Comportamiento anual del T3-S2

El vehículo de carga T3-S3 representa un comportamiento ascendente conforme los años, pero sobre todo tiene porcentajes altos de sobrecarga. Para el año 2020 el porcentaje era de 56.10%, para el 2021 este porcentaje fue de 53.28%, para el siguiente año fue de 50.26% y para el año 2023 fue de 45.32%. El promedio de los años analizados es del 51.24%, siendo la configuración más cargada.

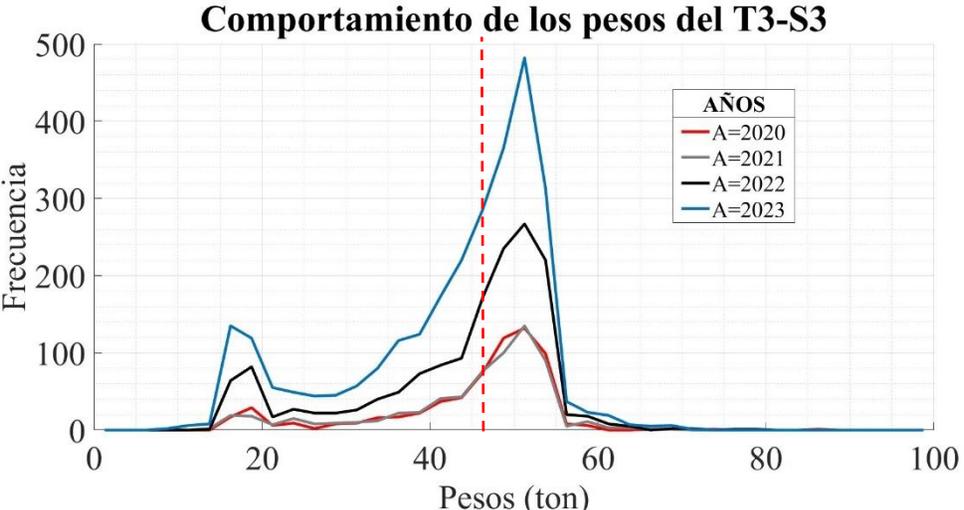


Figura 22-Comportamiento anual del T3-S3

El vehículo T3-S2-R4 ocupa el segundo lugar en exceso de carga. Para el año 2020 tenía un porcentaje de exceso de 29.11%, para el año 2021 creció a

38.20%, para el año subsecuente disminuyó a 28.90% y para el último año quedó en 27%.

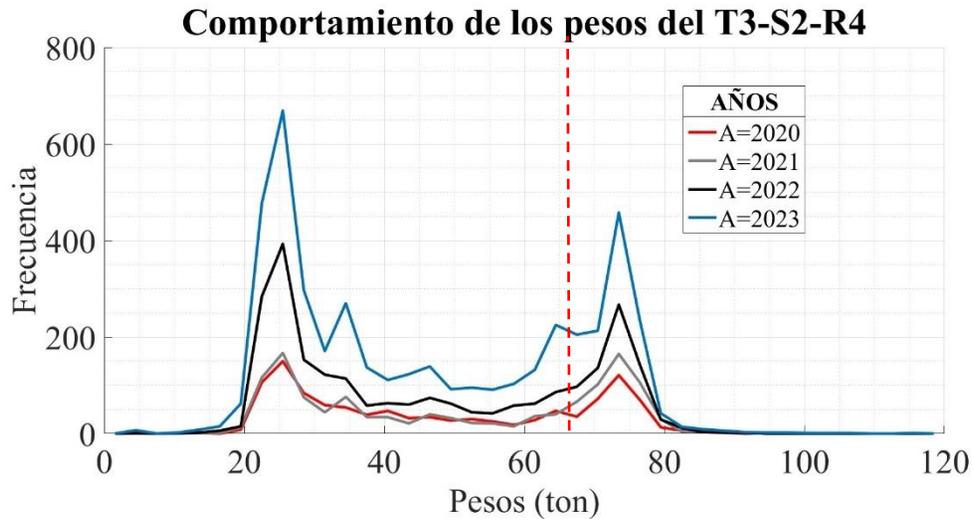


Figura 23-Comportamiento anual del T3-S2-R4

En la

Tabla 18 se muestra el resumen de los Pesos Brutos vehiculares del año 2020 donde se observa que a medida que aumenta la clasificación del tipo de vehículo, tanto el peso promedio como el peso máximo también tienden a aumentar.

Tabla 18- Peso Bruto Vehicular del año 2020

2020	Peso Bruto Vehicular	
<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Promedio (ton)</i>	<i>valor máximo (ton)</i>
C2	9.85	20.05
C3	14.87	36.00
T3-S2	26.21	77.70
T3-S3	45.00	86.20
T3-S2-R4	47.42	116.95

A continuación, se muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde Los vehículos de tipo C2 y C3 son considerablemente más

ligeros en comparación con las categorías T3-S2 y T3-S3. El vehículo con mayor peso es el T3-S2-R4.

Tabla 19- Peso Bruto Vehicular del año 2021

2021	Peso Bruto Vehicular	
<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Promedio (ton)</i>	<i>valor máximo (ton)</i>
C2	9.85	20.05
C3	14.87	36.00
T3-S2	26.21	77.70
T3-S3	45.00	86.20
T3-S2-R4	47.42	116.95

La Tabla 20 muestra que el camión unitario de 2 ejes es el que muestra el valor más pequeño y que el vehículo con más carga es el T3-S2-R4, representando que entre mayor sean sus ejes, con más carga transitan en las carreteras.

Tabla 20- Peso Bruto Vehicular del año 2022

2022	Peso Bruto Vehicular	
<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Promedio (ton)</i>	<i>valor máximo (ton)</i>
C2	10.10	22.00
C3	14.63	39.70
T3-S2	26.25	73.95
T3-S3	43.51	79.20
T3-S2-R4	46.33	90.55

En la Tabla 21 se observa que es año donde los vehículos presentan valores mayores en comparación con las otras configuraciones. Este año tiene la misma tendencia que los anteriores donde se puede mirar que los pesos van aumentando en proporción de los números de ejes.

Tabla 21- Peso Bruto Vehicular del año 2023

2023	<i>Peso Bruto Vehicular</i>		
	<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Promedio (ton)</i>	<i>valor máximo (ton)</i>
	C2	9.92	27.85
	C3	14.47	42.70
	T3-S2	26.24	72.50
	T3-S3	42.56	70.15
	T3-S2-R4	46.33	117.00

A partir de los datos analizados se muestra que el camión articulado (T3-S3) obtuvo el mayor porcentaje de exceso con respecto a la normativa de pesos y dimensiones tolerables con 54.46% y el camión doblemente articulado (T3-S2-R4) con 30.80%.

6.2. Etapa 2-Procesamiento de datos

En este apartado se muestran los perfiles con diferentes longitudes, esto se debe a la topografía de la zona y a que el análisis de la pendiente descendente no se puede tomar en una longitud que caiga justo o después de una curva horizontal, de igual forma se tiene que hacer justo cuando comience la pendiente descendente.

Programando la Ecuación 1, 2 y 3 expuestas en el marco teórico, se analizaron las cinco rampas cercanas al Estado de Querétaro, alimentadas con las pendientes obtenidas en el análisis de la topografía.

En la Figura 24 en el eje de las x se muestran las distancias acumuladas y en el eje de las y se muestran la velocidad alcanzada en ese punto, con las velocidades de punto de 78 km/h, 88 km/h y 105 km/h donde se muestra que el modelo 1 el cual corresponde a la Ecuación 1 de la SICT, con velocidad de operación de 105 km/h obtiene la mayor velocidad de entrada, el modelo 3 corresponde al modelo de Rakha *et al.* (2001), este modelo muestra los valores más pequeños en comparación con

el modelo 1 y 2, así como se puede ver en la gráfica que este modelo no tiene un rango amplio entre las velocidades de operación.

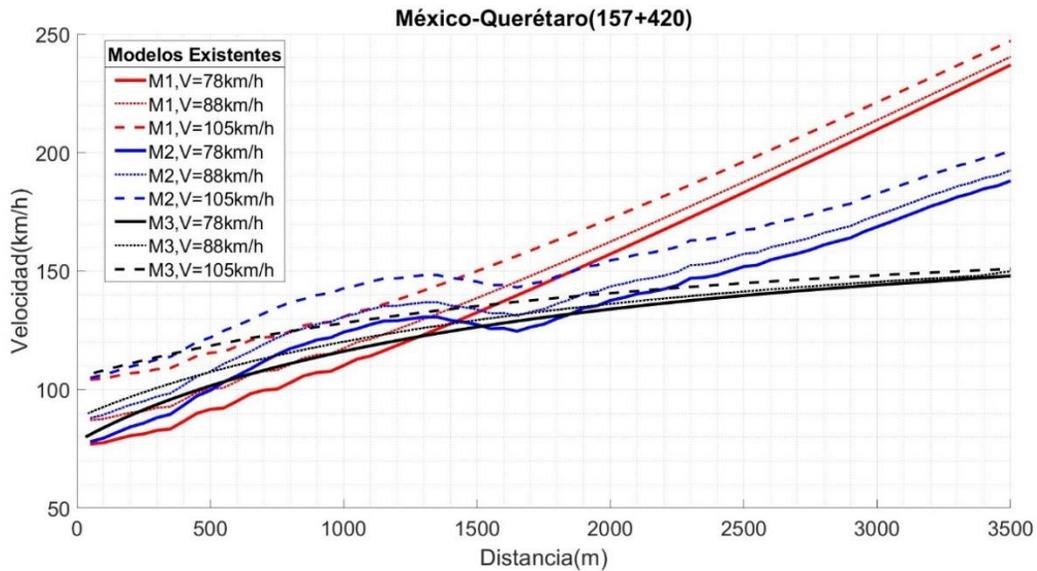


Figura 24-Modelos existentes, México-Querétaro (157+420)

En la Figura 25 se muestra una longitud inferior a 1200 m donde el modelo 2 y 3 tienen valores similares con la velocidad de operación de 105 km/h siendo la más alta, así mismo se visualiza que el modelo 1 con una velocidad de punto de 80 km/h presenta las velocidades más bajas en comparación con los otros 2 modelos y con las diferentes velocidades de operación.

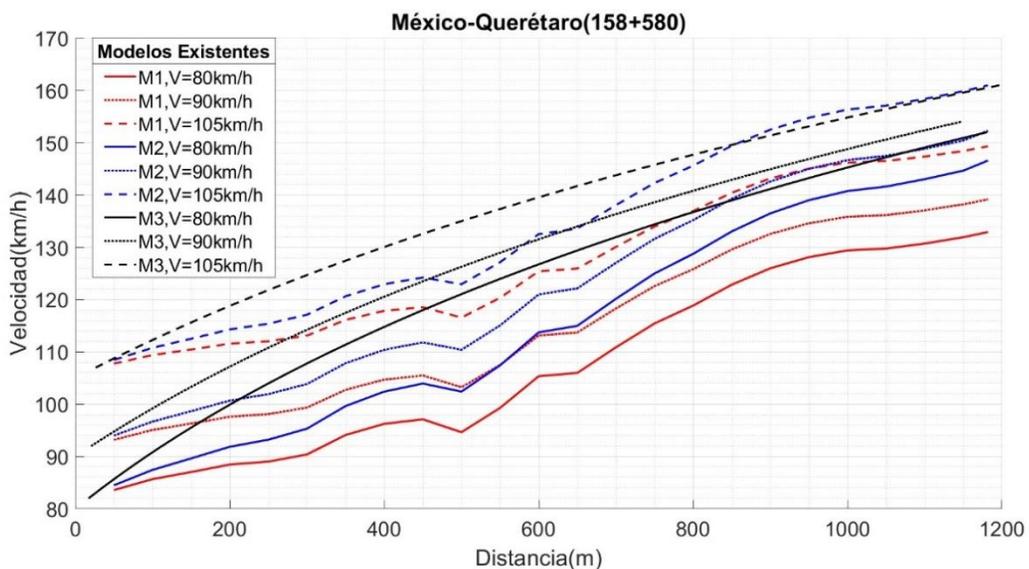


Figura 25-Modelos existentes, México-Querétaro (158+580)

Como se observa en la Figura 26 se tiene una longitud en descenso de 3200 m donde se muestra que el modelo 2 con una velocidad de operación de 85 km/h muestra la velocidad de entrada mayor, siguiendo con el modelo 3 que presenta velocidades intermedias en comparación de los otros dos modelos y el modelo 1 con una velocidad de operación de 62 km/h muestra el valor más pequeño en esta familia de curvas de velocidad de entrada.

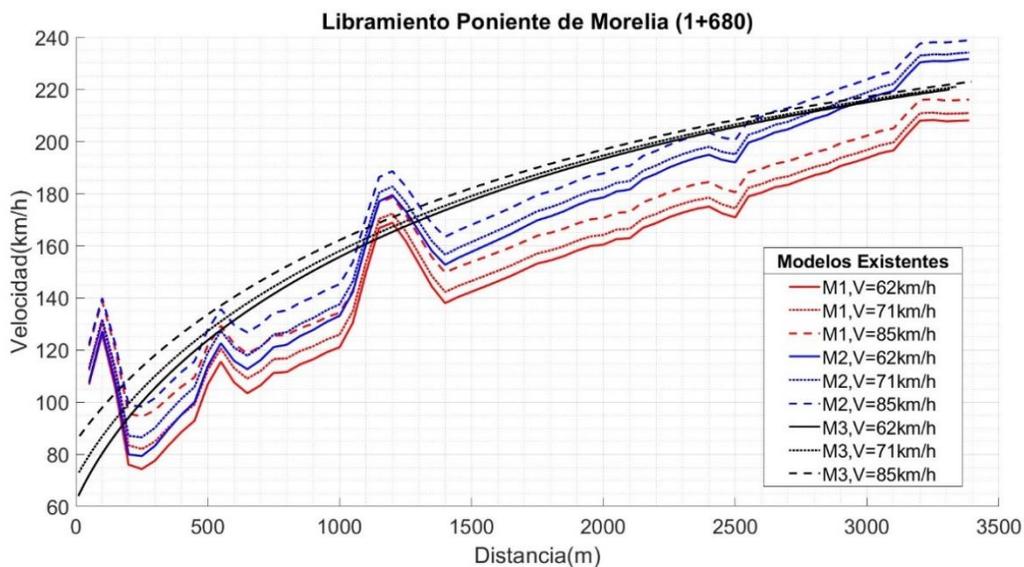


Figura 26-Modelos existentes, Libramiento Poniente de Morelia (1+680)

En la Figura 27 se muestra el perfil de velocidades de la rampa 4, donde se observa que el modelo 2 muestra las velocidades de entrada más grandes a las otras obtenidas con una velocidad de operación de 85 km/h, el modelo 1 muestra las velocidades intermedias y las velocidades menores la presenta el modelo 3 , el cual al final de la longitud tienen a unificarse con las 3 velocidades de operación seleccionadas para esta rampa.

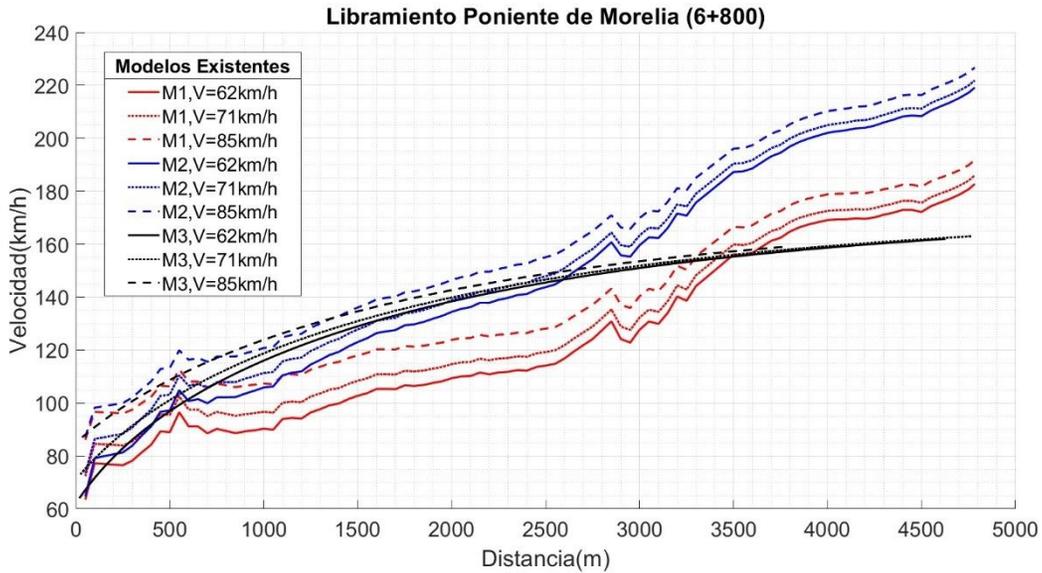


Figura 27-Modelos existentes, Libramiento Poniente de Morelia (6+800)

En la Figura 28 se muestra que el modelo 2 tiene las velocidades más altas en comparación de los modelos 1 y 3, mostrando que al final de la longitud analizada, el modelo 1 y 2 tienden a converger. El modelo 3 muestra las velocidades de entrada menores comparadas con los otros modelos existentes y al final de su longitud las velocidades tienen a converger entre las velocidades de operación, estudiadas en esta rampa.

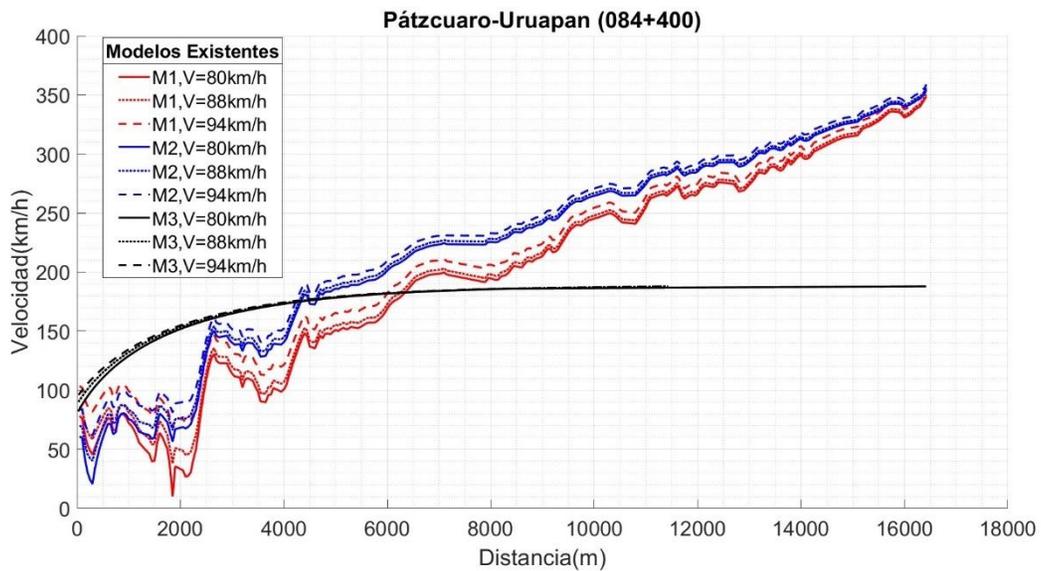


Figura 28-Modelos existentes, Pátzcuaro-Uruapan (84+400)

Con la Ecuación 3 se analizaron dos escenarios; el primero donde el vehículo estaba cargado y el otro escenario, donde estaba vacío, ingresando valores de 27.5 ton y para el primero y 16 ton para el segundo.

A continuación, se muestra el análisis de las dos rampas pertenecientes al Estado de Querétaro, con tres velocidades de entradas obtenidas en el un estudio de velocidad de punto (SICT,2022). En las siguientes graficas se puede notar que el peso está influyendo directamente en la adquisición de la velocidad, entre más cargado esté el vehículo, mayor velocidad tendrá.

En la Figura 29 se muestran las velocidades en dos escenarios, el primero consta de un peso de 16 ton vacío y un peso normativo de 27.5 ton, con lo cual se muestra que las velocidades de operación de 78 km/h, 88 km/h y 105 km/h convergen con el peso de 27.5 ton, posteriormente se visualiza otro grupo el cual muestra los valores del peso de 16 ton.

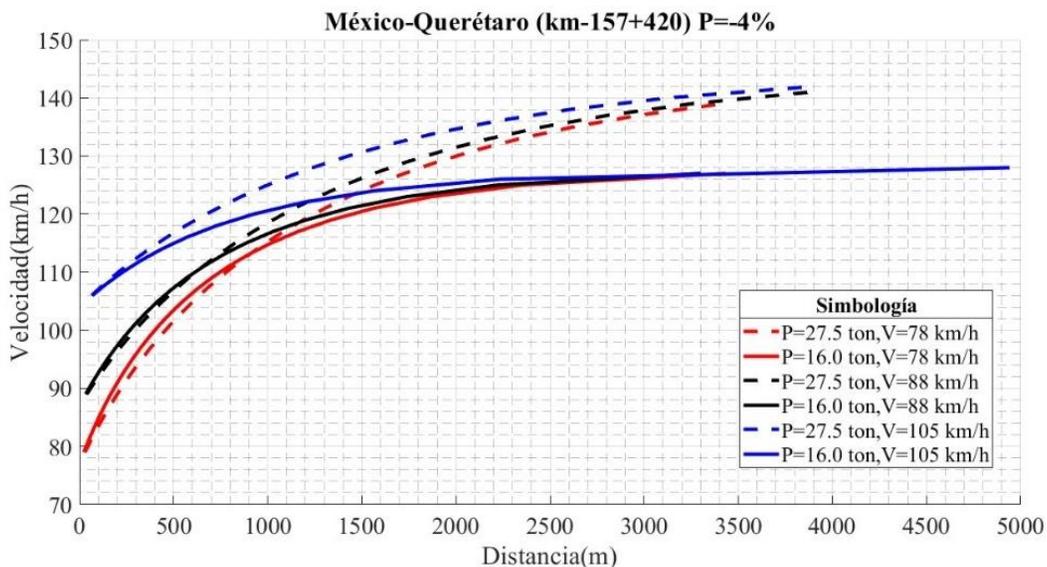


Figura 29-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 1)

En la Figura 30 se muestran dos grupos que se dividen por pesos, las velocidades más grandes se muestran para velocidades de 105 km/h, seguido de 90 km/h y 80 km/h, mostrando que, a mayor velocidad de operación, mayor es la velocidad de entrada. Con el peso de 16 ton se muestra que las velocidades tienden a unirse en una parte de la longitud.

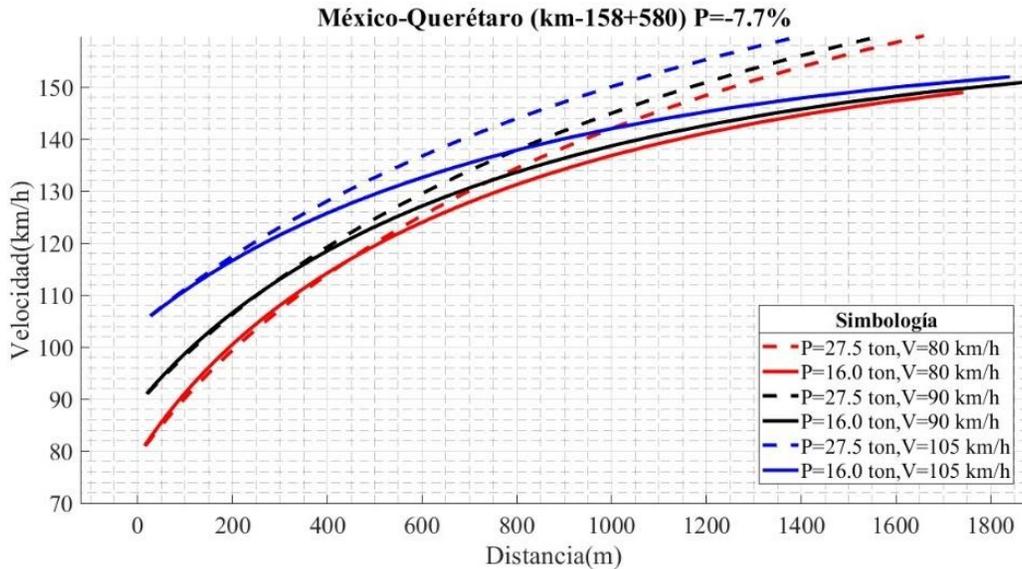


Figura 30-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 2)

En la Figura 31 se observa que están marcadas las velocidades en función de los pesos, donde las velocidades mayores se obtuvieron con el peso de 27.5 ton y las velocidades menores fueron con un peso de 16 ton, en ambos casos se muestran que las velocidades convergen en un punto dado.

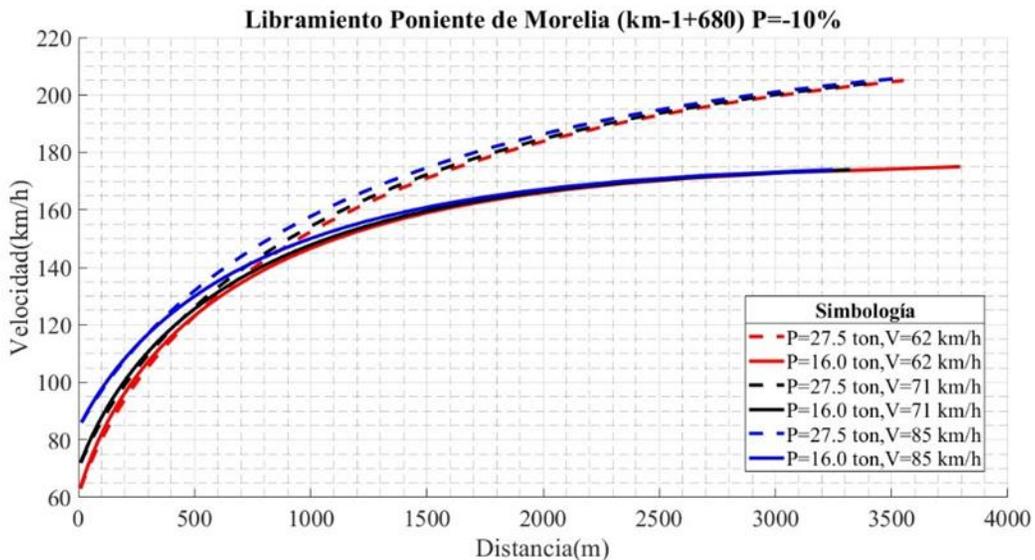


Figura 31-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 3)

En la Figura 32 se visualiza que la grafica muestra dos familias de curvas que se unen en un punto dado de la longitud, la cual se centra en la influencia del peso en las velocidades de entrada, entre mayor sea el peso, mayor velocidad se alcanza.

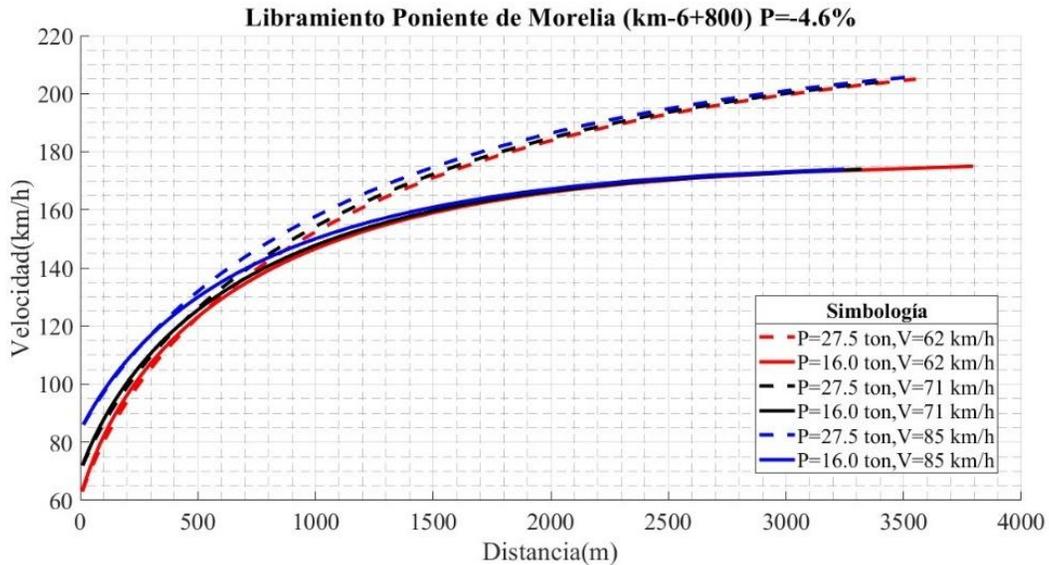


Figura 32-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 4)

En la Figura 33 muestra que las tres velocidades de operación (80 km/h, 88 km/h y 94 km/h) convergen en dos distancias diferentes, para mayor peso, la longitud es más grande y cuando el peso es menor se muestra la unión de las velocidades a menor longitud.

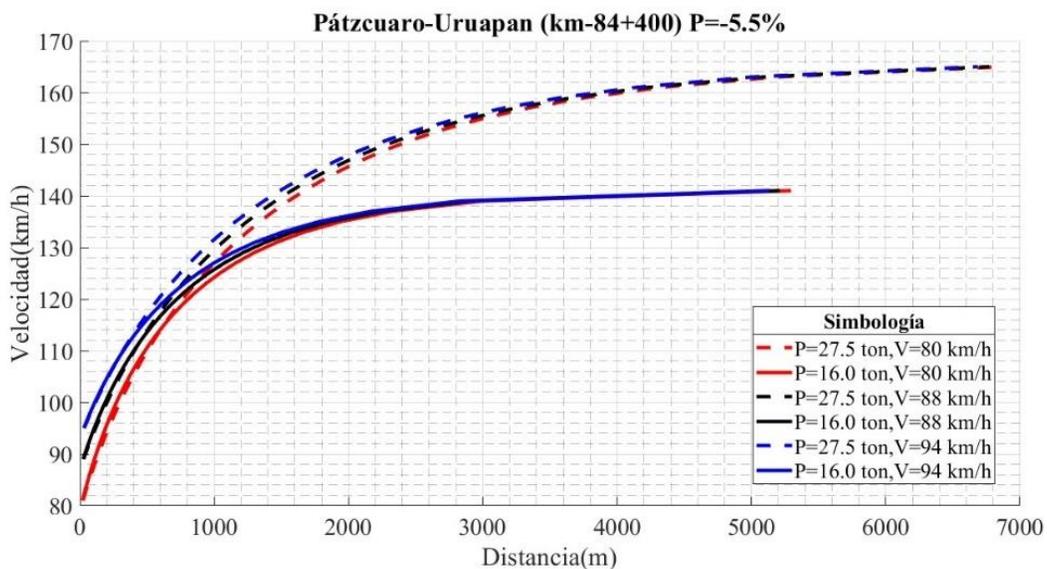


Figura 33-Velocidades de entrada en función del peso (Rampa 5)

A continuación, se muestran los valores los valores mínimos, máximos, media y desviación estándar de cada rampa de estudio como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 22-Valores obtenidos en los modelos existentes

	Modelo 1 (SCT, 2017)			Modelo 2 (Echaveguren et al., 2007)			Modelo 3 (Rakha et al., 2001)		
Rampa 1 (México-Querétaro,157+420)									
Mínimo	77.02	87.13	104.27	78.00	88.00	105.00	80.00	90.00	107.00
Máximo	237.00	240.48	247.21	188.14	192.51	200.85	140.00	142.00	143.00
<i>Media</i>	157.28	161.13	166.64	143.25	147.26	153.02	110.00	116.00	125.00
<i>Desviación Estándar</i>	48.50	46.59	43.52	28.60	27.24	25.09	18.18	15.87	11.25
Rampa 2 (México-Querétaro,158+580)									
Mínimo	83.59	93.21	107.76	84.51	94.03	108.47	82.00	92.00	107.00
Máximo	132.91	139.16	149.30	146.59	152.27	160.96	150.00	152.00	151.00
<i>Media</i>	108.08	115.84	128.02	116.07	123.37	134.91	116.00	122.00	130.00
<i>Desviación Estándar</i>	17.53	16.37	14.83	21.00	19.75	18.02	20.49	18.18	14.14
Rampa 3 (Libramiento Poniente de Morelia,1+680)									
Mínimo	106.78	112.25	121.59	107.53	112.96	122.25	64.00	73.00	87.00
Máximo	208.07	210.93	216.04	231.67	234.24	238.85	176.00	175.00	175.00
<i>Media</i>	151.29	155.46	162.72	166.48	170.31	177.02	120.00	124.00	131.00
<i>Desviación Estándar</i>	36.95	35.80	33.98	42.78	41.65	39.84	33.20	30.31	26.27
Rampa 4 (Libramiento Poniente de Morelia,6+800)									
Mínimo	63.50	72.31	86.10	64.69	73.362	86.98	64.00	73.00	87.00
Máximo	182.73	185.98	191.76	219.13	221.85	226.71	176.00	175.00	175.00
<i>Media</i>	124.09	129.14	137.75	148.80	153.10	160.55	120.00	124.00	131.00
<i>Desviación Estándar</i>	33.00	31.75	29.85	42.03	40.79	38.84	33.20	30.31	26.27
Rampa 5 (Pátzcuaro-Uruapan,84+400)									
Mínimo	78.12	86.29	103.57	60.81	69.97	84.97	82.00	90.00	96.00
Máximo	348.53	350.45	355.10	354.26	355.94	359.00	142.00	142.00	142.00
<i>Media</i>	199.38	203.96	213.81	220.55	224.09	230.06	112.00	116.00	119.00
<i>Desviación Estándar</i>	88.34	85.43	80.38	86.37	84.16	80.97	18.18	15.87	14.14

En la rampa 1 muestra mínimos que oscilan entre 77.02 y 104.27, y máximos que van de 140.00 a 247.21, con una con una desviación estándar que varía entre 43.52 y 48.50 indicando una dispersión entre los valores de velocidad. Por otra parte, la rampa 2, presenta valores mínimos más homogéneos (83.59 a 108.47) y un rango máximo de 132.91 a 160.96, con desviación estándar entre 14.83 y 21.00 indican que los valores están alrededor de la media.

La rampa 3, muestra una variabilidad de valores desde 64.00 hasta 122.25 y máximos alcanzando hasta 238.85, además de una media que va desde 120.00 hasta 177.02, una desviación estándar de 33.98 y 42.78 estos valores sugieren que las velocidades de los vehículos tienen una dispersión significativa.

La rampa 4 es similar a la rampa 3, con mínimos de 63.50 hasta 87 y máximos de 175 hasta 226.71, una media de 120.00 hasta 153.10, así mismo una desviación estándar con valores entre 29.85 y 42.03 y la rampa 5, exhibe los valores más altos en la media y máximos en comparación con las rampas anteriores, especialmente en el modelo SCT, la desviación estándar va de 14.14 a 88.34, este rango es muy amplio indicando que hay una alta dispersión en las mediciones, lo cual se debe a la condición topográfica de la zona.

6.3. Etapa 3-Diseño del modelo

Como inicio de esta etapa se identificaron las variables que interactúan, para que un vehículo aumente o disminuya la velocidad, para esto se identificaron los parámetros del vehículo, del ambiente y de operación con la que circulen. Para esto se muestran los valores utilizados.

Tabla 23-Parámetros utilizados en el modelo

Referencia	Parámetros	Descripción
SICT, 2023	$m = 38287.5$	Masa del camión (kg)
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$g = 9.81$	Gravedad (m/s^2)
<i>Aparicio et al.</i> ,1995	$f_r = 0.02$	Coefficiente de resistencia a la rodadura
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$\rho = 1.225$	Densidad del aire (kg/m^3)
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$C_d = 0.7$	Coefficiente de arrastre
PROY-NOM-012-SCT2-2022	$A_r = 10$	Área frontal del camión (m^2)
Rampas seleccionadas	$D_s = \text{variable}$	Distancia entre segmentos (m)
Rampas seleccionadas	$\theta = \text{variable}$	Ángulo de la pendiente (rad)
SICT, 2023	$V = \text{variable}$	Velocidad (m/s^2)
TATOMA (2024)	$F_p = 108000$	Potencia (watts)

Con los parámetros obtenidos se programó la Ecuación 15, iniciando con las resistencias que se oponen al movimiento las cuales se dividen en resistencia aerodinámica como se muestra en la Figura 34 donde se toma en cuenta la

densidad del aire, el coeficiente aerodinámico, el área frontal y la velocidad con la que transitan los vehículos.

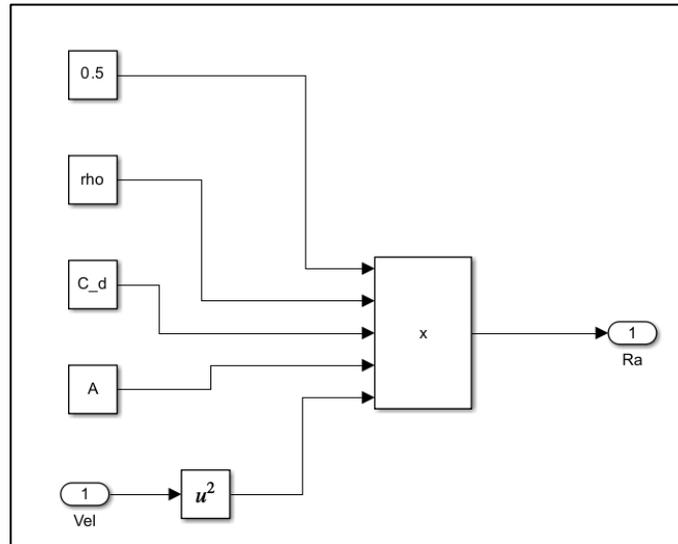


Figura 34- Componentes de la resistencia aerodinámica

La Figura 35 muestra la resistencia a la rodadura, la cual consta de la interacción del coeficiente a la rodadura que para nuestro caso será para pavimento y para material granular, la masa, la gravedad y el coseno del ángulo de la pendiente. Esta investigación se centra en este valor.

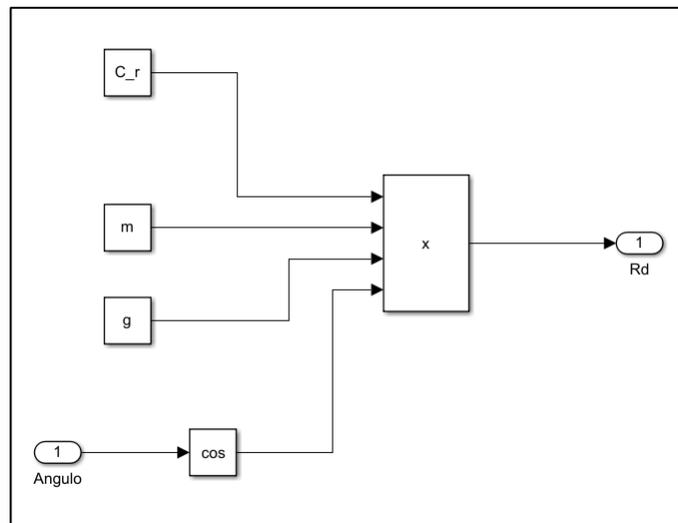


Figura 35- Componentes de la resistencia a la rodadura

En la Figura 36 se toma en cuenta en el modelo debido a que un vehículo que se encuentra en movimiento al transitar por una pendiente inclinada ayuda a adquirir

mayor velocidad en el caso de una pendiente en descenso o disminuya la velocidad por la pendiente en ascenso. Para este caso se toma en cuenta la masa, la gravedad y en seno del ángulo de la pendiente.

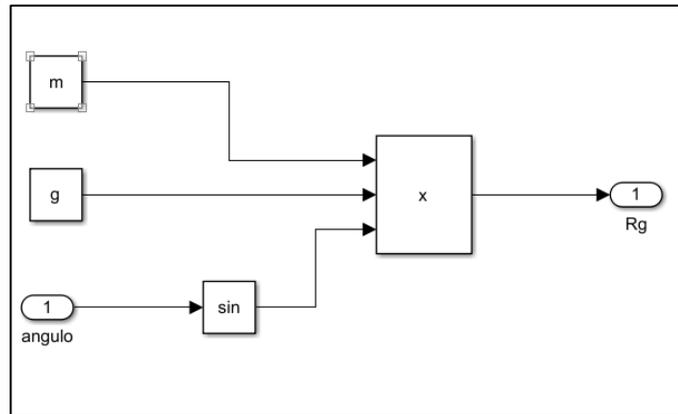


Figura 36- Componentes de la resistencia por pendiente

Para transformar las resistencias que se oponen al movimiento se utilizó la segunda ley de Newton para obtener aceleraciones en cada segmento y posteriormente se aplicaron las fórmulas de movimiento uniformemente acelerado.

Con lo antes descrito se propone la Ecuación 16.

6.3.1. Validación

Para comprobar los valores del modelo propuesto se obtuvo evidencia de un accidente en la rampa México- Puebla (39+220), donde se muestra un tractocamión articulado (T3-S2) que pierde los frenos 10 kilómetros antes del ingreso a la rampa, para esto se trazó una ruta en Google Earth ubicando la posición de inicio, posteriormente esta ruta se exportó a AutoCAD para trazar los cadenamientos a cada 50 m y con esto obtener los puntos de control para trazar las pendientes en el perfil topográfico y el tiempo en el que el vehículo recorría cada uno de los segmentos. Como se muestra en la

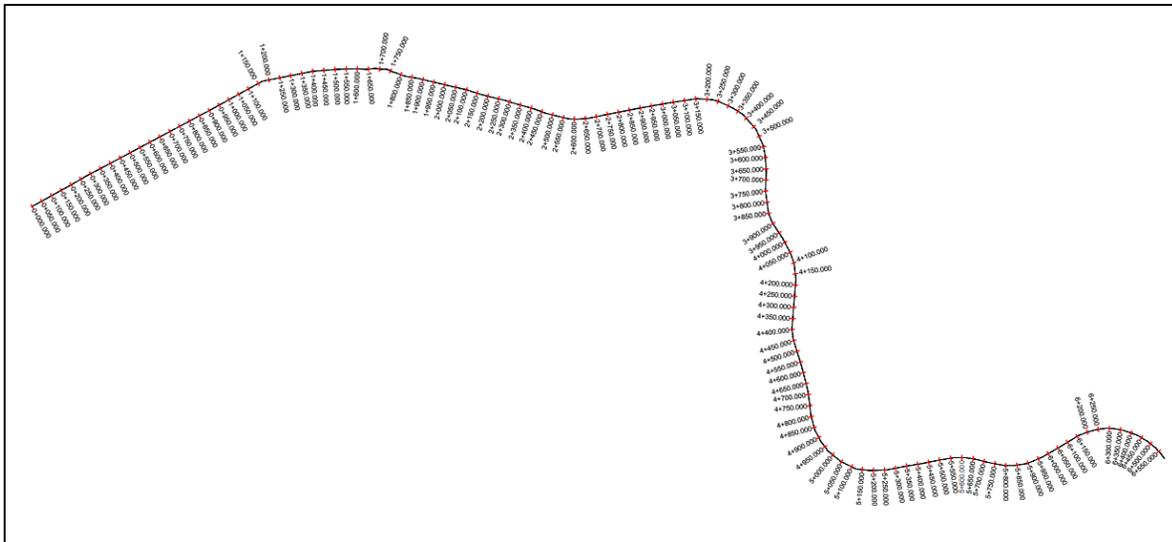


Figura 37-Ruta recorrida por el vehículo sin frenos

A continuación, se muestra una tabla con los valores obtenidos en cada segmento analizado, esto se logró identificando el inicio y final de cada segmento y con esto se tomaron el tiempo en que llegaba al siguiente segmento, con estos valores se obtuvo una diferencia y estos valores posteriormente se utilizaron en las Ecuaciones de movimiento uniformemente acelerado.

Tabla 24-Tiempos tomados en los puntos de control

Segmento	t1 (seg)	t2 (seg)	Delta t (seg)	Segmento	t1 (seg)	t2 (seg)	Delta t (seg)
1	2.00	3	1	62	238.00	239.00	1.00
2	3.00	6.00	3.00	63	239.00	242.00	3.00
3	6.00	8.00	2.00	64	242.00	244.00	2.00
4	8.00	12.00	4.00	65	244.00	245.00	1.00
5	12.00	16.00	4.00	66	245.00	246.00	1.00
6	16.00	22.00	6.00	67	246.00	248.00	2.00
7	22.00	26.00	4.00	68	248.00	251.00	3.00
8	26.00	28.00	2.00	69	251.00	252.00	1.00
9	28.00	31.00	3.00	70	252.00	255.00	3.00
10	31.00	34.00	3.00	71	255.00	256.00	1.00
11	34.00	37.00	3.00	72	256.00	257.00	1.00
12	37.00	39.00	2.00	73	257.00	258.00	1.00
13	39.00	44.00	5.00	74	258.00	260.00	2.00
14	44.00	49.00	5.00	75	300.00	302.00	2.00
15	49.00	53.00	4.00	76	302.00	304.00	2.00
16	53.00	60.00	7.00	77	304.00	305.00	1.00

17	100.00	103.00	3.00	78	305.00	306.00	1.00
18	103.00	108.00	5.00	79	306.00	307.00	1.00
19	108.00	112.00	4.00	80	307.00	308.00	1.00
20	112.00	114.00	2.00	81	308.00	309.00	1.00
21	114.00	118.00	4.00	82	309.00	311.00	2.00
22	118.00	121.00	3.00	83	311.00	313.00	2.00
23	121.00	123.00	2.00	84	313.00	314.00	1.00
24	123.00	128.00	5.00	85	314.00	315.00	1.00
25	128.00	132.00	4.00	86	315.00	316.00	1.00
26	132.00	135.00	3.00	87	316.00	317.00	1.00
27	135.00	138.00	3.00	88	317.00	318.00	1.00
28	138.00	140.00	2.00	89	318.00	319.00	1.00
29	140.00	142.00	2.00	90	319.00	320.00	1.00
30	142.00	146.00	4.00	91	320.00	322.00	2.00
31	146.00	149.00	3.00	92	322.00	324.00	2.00
32	149.00	150.00	1.00	93	324.00	326.00	2.00
33	150.00	152.00	2.00	94	326.00	328.00	2.00
34	152.00	153.00	1.00	95	328.00	330.00	2.00
35	153.00	154.00	1.00	96	330.00	332.00	2.00
36	154.00	155.00	1.00	97	332.00	333.00	1.00
37	155.00	157.00	2.00	98	333.00	334.00	1.00
38	157.00	160.00	3.00	99	334.00	336.00	2.00
39	200.00	202.00	2.00	100	336.00	337.00	1.00
40	202.00	205.00	3.00	101	337.00	338.00	1.00
41	205.00	207.00	2.00	102	338.00	340.00	2.00
42	207.00	208.00	1.00	103	340.00	342.00	2.00
43	208.00	210.00	2.00	104	342.00	344.00	2.00
44	210.00	212.00	2.00	105	344.00	345.00	1.00
45	212.00	213.00	1.00	106	345.00	346.00	1.00
46	213.00	215.00	2.00	107	346.00	348.00	2.00
47	215.00	216.00	1.00	108	348.00	350.00	2.00
48	216.00	217.00	1.00	109	350.00	351.00	1.00
49	217.00	219.00	2.00	110	351.00	353.00	2.00
50	219.00	221.00	2.00	111	353.00	355.00	2.00
51	221.00	222.00	1.00	112	355.00	357.00	2.00
52	222.00	224.00	2.00	113	357.00	358.00	1.00
53	224.00	226.00	2.00	114	358.00	360.00	2.00
54	226.00	227.00	1.00	115	400.00	401.00	1.00
55	227.00	229.00	2.00	116	401.00	402.00	1.00
56	229.00	230.00	1.00	117	402.00	403.00	1.00
57	230.00	232.00	2.00	118	403.00	404.00	1.00
58	232.00	234.00	2.00	119	404.00	405.00	1.00
59	234.00	236.00	2.00	120	405.00	406.00	1.00

60	236.00	237.00	1.00	121	406.00	408.00	2.00
61	237.00	238.00	1.00				

Con los tiempos tomados en cada punto se realizó la sumatoria del tiempo, antes del ingreso a la rampa, con este valor se dividió la diferencia de la velocidad final menos la velocidad inicial y se dividió entre el tiempo transcurrido, con esto se obtuvo la aceleración, posteriormente se aplicó la Ecuación 17.

$$v_f = v_o + at \quad (17)$$

Donde:

v_f =Velocidad final m/s

v_o =Velocidad inicial m/s

a = aceleración m/s²

t =tiempo (s)

Con esta Ecuación se obtiene la velocidad real y la velocidad obtenida con el modelo propuesto. Para alimentar el modelo se utilizaron los parámetros del modelo con los datos de la Tabla 25.

Tabla 25-Datos del modelo propio

Referencia	Parámetros	Descripción
Video	T3-S2	Tipo de vehículo
SICT, 2023	$m = 39900$	Masa del camión (kg)
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$g = 9.81$	Gravedad (m/s ²)
<i>Aparicio et al.,1995</i>	$f_r = \text{variable}$	Coeficiente de resistencia a la rodadura
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$\rho = 1.225$	Densidad del aire (kg/m ³)
Landau L. D. <i>et al.</i> ,1987	$C_d = 0.8$	Coeficiente de arrastre
Streamline,2024	$A_r = 11.44$	Área frontal del camión (m ²)
Rampas seleccionadas	$D_s = \text{variable}$	Distancia entre segmentos (m)
Rampas seleccionadas	$\theta = \text{variable}$	Ángulo de la pendiente (rad)
SICT, 2023	$V = 22.22$	Velocidad (m/s ²)
Streamline,2024	$F_p = 328100$	Potencia (watts)

El modelo presentado presenta discrepancias en relación con los datos reales, dado que se basa en las pendientes del terreno. Entre el inicio y los 3000 metros de longitud, las diferencias son notables. Sin embargo, en el tramo de 5000 a 6000 metros, ambas curvas tienden a converger, lo que sugiere que el modelo empieza

a estabilizarse y se aproxima a valores más cercanos a los reales. Como se muestra en la Figura 38, obteniendo una velocidad final estimada de 159.77 km/h.

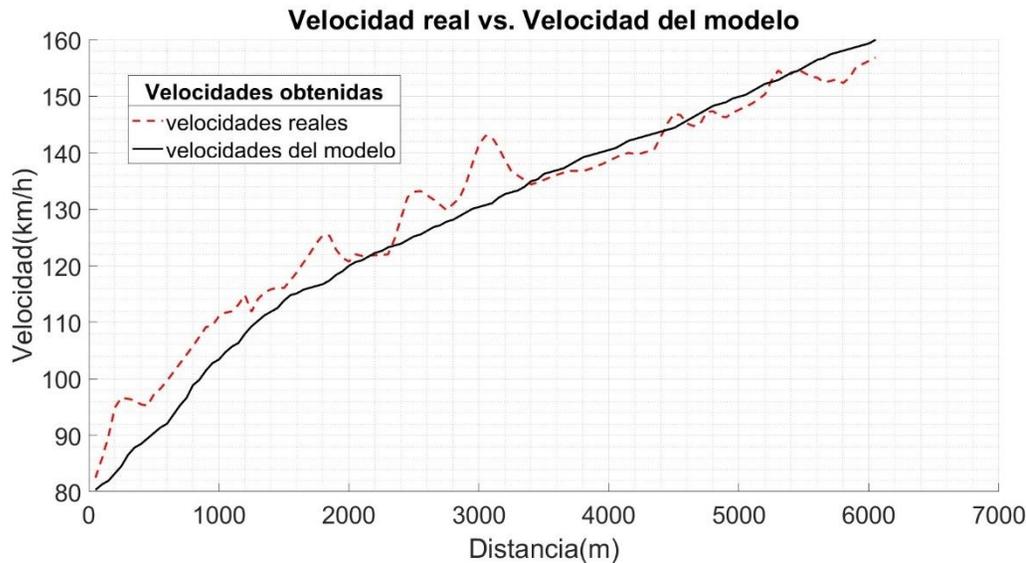


Figura 38-Velocidades reales y del modelo.

Con los datos obtenidos en campo y los estimados con el modelo se calculó el error absoluto donde muestra que de la longitud inicial a la longitud de 3000 m se tiene un error absoluto promedio de 10.89 km/h y que de la longitud 3000 m a 6051.54 m se tiene un error absoluto promedio de 3.19 km/h. Tan solo al ingreso a la rampa se obtuvo 0.23 km/h, como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26-Error absoluto y relativo del recorrido del vehículo sin frenos.

<i>V</i> <i>real</i>	<i>V</i> <i>estimada</i>	<i>Error</i> <i>absoluto</i>	<i>Error</i> <i>relativo</i>	<i>V</i> <i>real</i>	<i>V</i> <i>estimada</i>	<i>Error</i> <i>absoluto</i>	<i>Error</i> <i>relativo</i>
80.33	83.08	2.76	3.43	130.73	147.94	17.21	13.17
81.30	87.16	5.86	7.21	131.06	147.59	16.53	12.62
81.95	91.71	9.76	11.91	132.03	145.75	13.72	10.39
83.25	97.27	14.01	16.83	132.68	143.47	10.79	8.13
84.55	99.37	14.82	17.53	133.01	141.51	8.50	6.39
86.50	99.62	13.12	15.17	133.33	140.72	7.38	5.54
87.80	99.71	11.90	13.55	133.98	139.95	5.96	4.45
88.46	99.43	10.98	12.41	134.96	139.19	4.23	3.13
89.43	99.59	10.16	11.36	135.28	139.45	4.17	3.08

90.41	101.88	11.47	12.69	136.26	139.87	3.61	2.65
91.38	103.18	11.80	12.91	136.59	140.27	3.69	2.70
92.03	104.79	12.76	13.87	136.91	140.65	3.74	2.73
93.66	106.57	12.91	13.78	137.24	140.94	3.70	2.70
95.28	108.25	12.97	13.61	137.89	141.20	3.31	2.40
96.59	109.86	13.28	13.75	138.54	141.16	2.63	1.90
98.86	111.40	12.54	12.68	139.19	141.13	1.94	1.39
99.84	113.15	13.31	13.34	139.51	141.38	1.87	1.34
101.46	114.93	13.47	13.28	139.84	141.79	1.95	1.40
102.76	115.35	12.59	12.25	140.16	142.21	2.05	1.46
103.41	117.04	13.62	13.17	140.49	142.70	2.21	1.58
104.72	117.76	13.05	12.46	140.81	143.18	2.37	1.68
105.69	118.12	12.43	11.76	141.46	143.65	2.19	1.55
106.34	119.34	13.00	12.22	142.11	143.88	1.77	1.24
107.97	121.01	13.05	12.08	142.44	143.65	1.21	0.85
109.27	118.28	9.01	8.25	142.76	143.70	0.94	0.66
110.24	120.52	10.28	9.32	143.09	143.98	0.89	0.62
111.22	121.68	10.46	9.40	143.41	144.38	0.96	0.67
111.87	122.30	10.43	9.32	143.74	146.54	2.80	1.95
112.52	122.62	10.10	8.97	144.07	148.61	4.55	3.16
113.82	122.64	8.82	7.75	144.39	150.21	5.82	4.03
114.80	123.98	9.18	8.00	145.04	149.85	4.81	3.32
115.12	125.44	10.31	8.96	145.69	148.32	2.63	1.81
115.77	127.04	11.27	9.73	146.34	147.81	1.47	1.01
116.10	128.63	12.53	10.79	146.99	148.09	1.09	0.74
116.42	130.37	13.95	11.98	147.64	150.08	2.44	1.65
116.75	131.71	14.97	12.82	148.29	150.17	1.87	1.26
117.40	131.62	14.22	12.11	148.62	149.23	0.61	0.41
118.37	129.26	10.89	9.20	148.94	148.96	0.01	0.01
119.02	127.84	8.82	7.41	149.59	149.64	0.05	0.03
120.00	127.25	7.25	6.04	149.92	150.14	0.22	0.15
120.65	128.51	7.86	6.52	150.24	150.57	0.32	0.21
120.98	128.20	7.23	5.97	150.89	151.08	0.19	0.12
121.63	128.27	6.65	5.46	151.54	151.77	0.22	0.15
122.28	128.36	6.09	4.98	152.20	152.54	0.35	0.23
122.60	128.45	5.85	4.77	152.52	154.89	2.37	1.55
123.25	128.54	5.29	4.29	152.85	156.50	3.65	2.39
123.58	131.10	7.53	6.09	153.50	155.61	2.11	1.38
123.90	134.68	10.78	8.70	154.15	155.72	1.58	1.02
124.55	138.07	13.52	10.86	154.47	156.42	1.95	1.26
125.20	138.94	13.74	10.97	155.12	155.74	0.62	0.40
125.53	139.01	13.48	10.74	155.77	155.03	0.74	-0.48
126.18	138.25	12.07	9.56	156.42	154.77	1.66	-1.06

126.83	137.50	10.67	8.42	156.75	153.91	2.84	-1.81
127.15	136.59	9.43	7.42	157.40	154.07	3.33	-2.12
127.80	135.64	7.84	6.13	157.72	154.36	3.36	-2.13
128.13	136.63	8.50	6.64	158.05	153.66	4.39	-2.78
128.78	137.59	8.81	6.84	158.37	154.60	3.77	-2.38
129.43	139.99	10.56	8.16	158.70	157.01	1.69	-1.07
130.08	143.42	13.34	10.26	159.02	157.95	1.08	-0.68
130.41	146.59	16.18	12.41	159.35	158.86	0.49	-0.31
				160.00	159.77	0.23	-0.14

Con los valores obtenidos, posteriormente se calcularon las longitudes de las rampas de emergencia como se muestra en la Tabla 27. Para la estimación de las longitudes, se evaluaron las pendientes en las áreas de estudio y los materiales de construcción. La resistencia a la rodadura influye directamente proporcional a la longitud estimada en cada rampa, a menor resistencia, mayor longitud necesitará la rampa para que los vehículos frenen de manera segura.

Tabla 27- Longitudes del modelo propio en función del material

Rampa	Material	Resistencia a la rodadura	Longitud (m)
1	Grava triturada suelta	0.05	1062.83
	Grava de río suelta	0.10	669.34
	Arena suelta	0.15	488.49
	Gravilla uniforme suelta	0.25	317.12
2	Grava triturada suelta	0.05	699.40
	Grava de río suelta	0.10	420.03
	Arena suelta	0.15	300.14
	Gravilla uniforme suelta	0.25	191.07
3	Grava triturada suelta	0.05	821.12
	Grava de río suelta	0.10	501.37
	Arena suelta	0.15	360.85
	Gravilla uniforme suelta	0.25	231.24
4	Grava triturada suelta	0.05	704.40
	Grava de río suelta	0.10	423.34
	Arena suelta	0.15	302.60
	Gravilla uniforme suelta	0.25	192.69
5	Grava triturada suelta	0.05	983.84

	Grava de río suelta	0.10	613.48
	Arena suelta	0.15	445.70
	Gravilla uniforme suelta	0.25	288.11
	Grava triturada suelta	0.05	2303.01
6	Grava de río suelta	0.10	1045.41
	Arena suelta	0.15	676.17
	Gravilla uniforme suelta	0.25	396.26

En la Figura 39 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10 en la rampa No. 1 (México-Querétaro, 157+420), obteniendo una velocidad de ingreso de 42.99 m/s para obtener un tiempo de 15.33 segundos, con una longitud de 329.49 m.

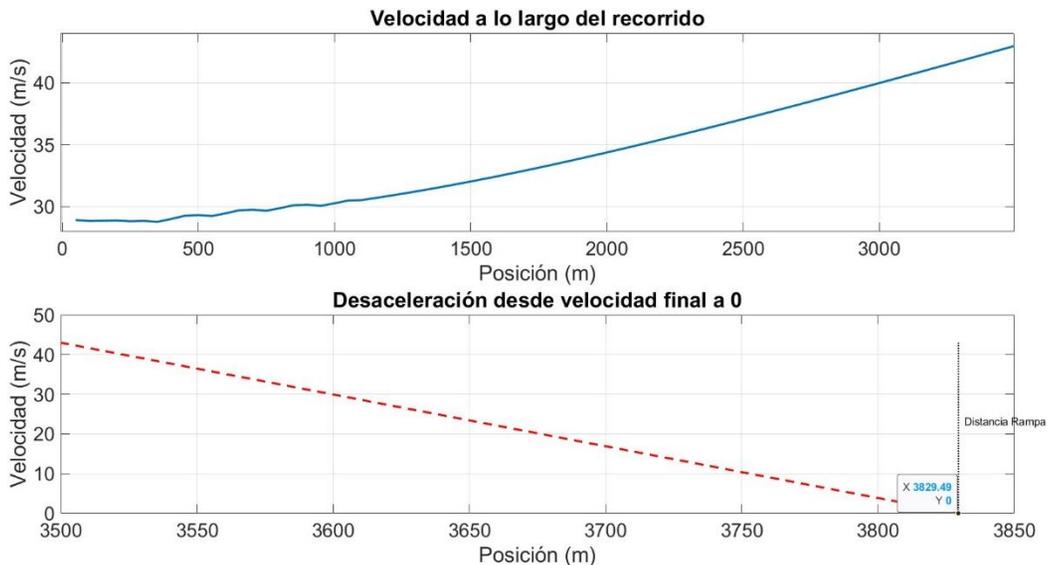


Figura 39-Recorrido previo al ingreso de la rampa 1, con superficie de concreto.

En la Figura 40 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo en la rampa No. 1 (México-Querétaro, 157+420, donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa es de 42.11 m/s, con un tiempo de 15.06 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 317.12 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

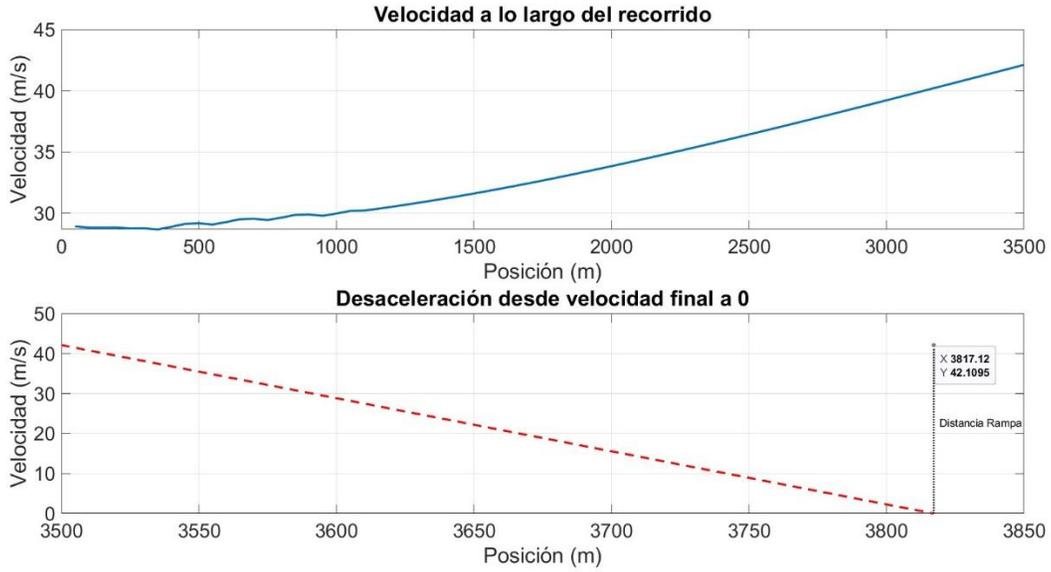


Figura 40-Recorrido previo al ingreso de la rampa 1, con superficie de asfalto.

En la Figura 41 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes en la rampa No. 2 (México-Querétaro, 158+580) con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10, obteniendo una velocidad de ingreso de 32.50 m/s para obtener un tiempo de 12.03 segundos para detenerse, con una longitud de 195.43 m.

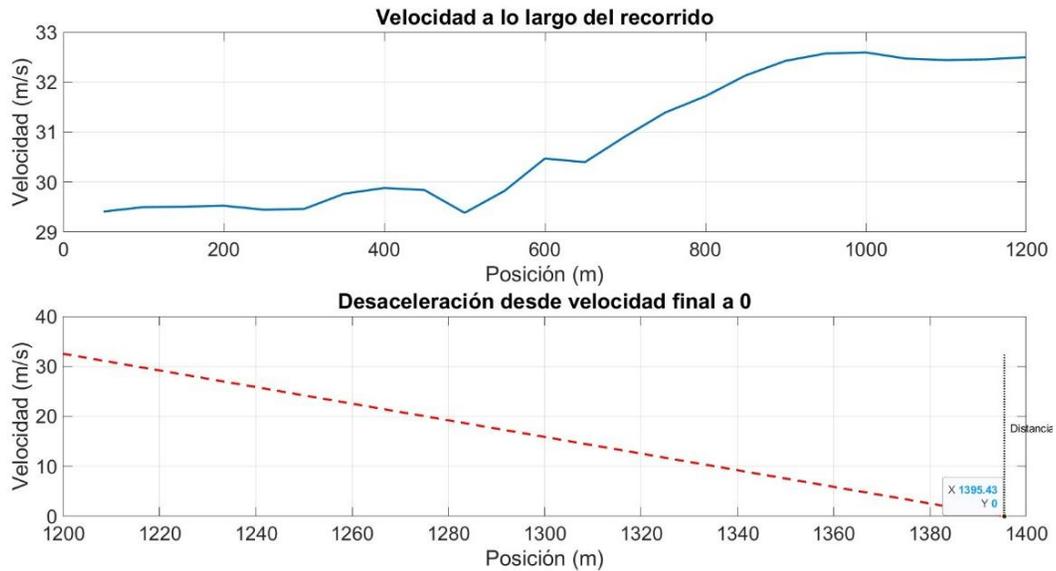


Figura 41-Recorrido previo al ingreso de la rampa 2, con superficie de concreto.

En la Figura 42 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo, donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa No. 2 (México-Querétaro, 158+580) es de 32.12 m/s, con un tiempo de 11.90 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 191.07 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

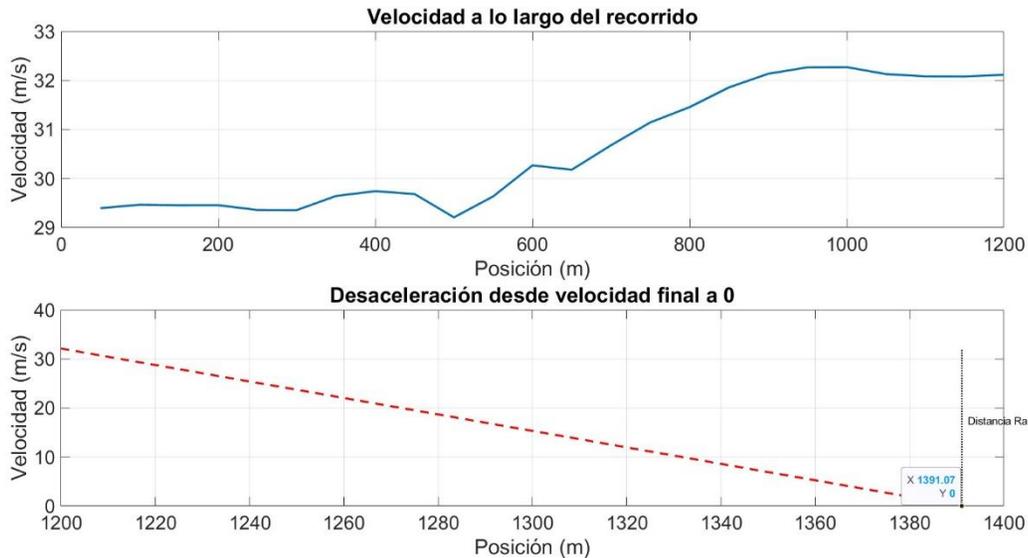


Figura 42-Recorrido previo al ingreso de la rampa 2, con superficie de asfalto.

En la Figura 43 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes de la rampa No. 3 (Libramiento Morelia, 001+680) con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10, obteniendo una velocidad de ingreso de 36.33 m/s para obtener un tiempo de 13.27 segundos para detenerse, con una longitud de 241.07 m.

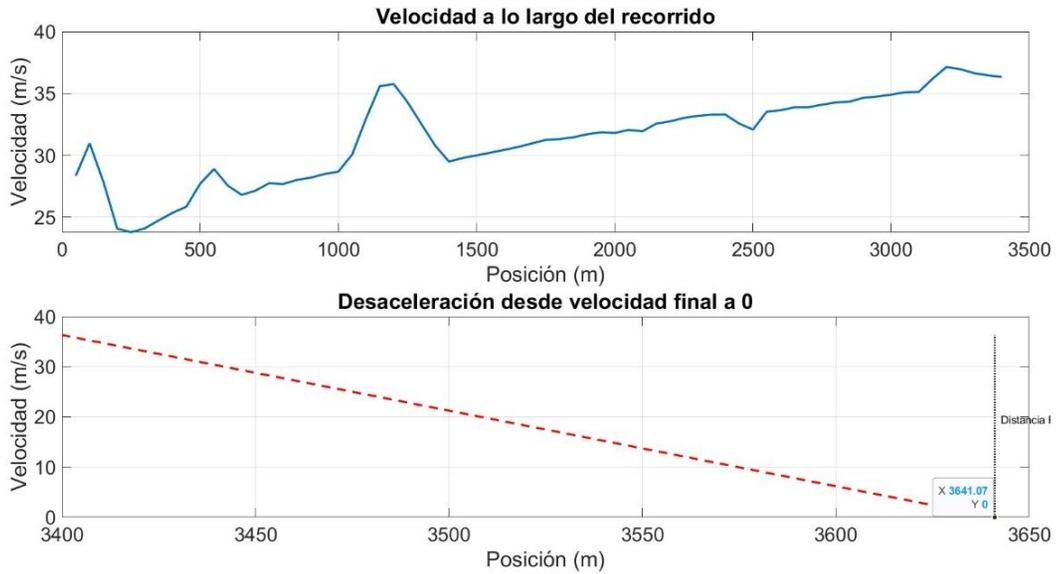


Figura 43-Recorrido previo al ingreso de la rampa 3, con superficie de concreto.

En la Figura 44 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo, en la rampa No. 3 (Libramiento Morelia, 001+680), donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa es de 35.54 m/s, con un tiempo de 13.01 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 231.24 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

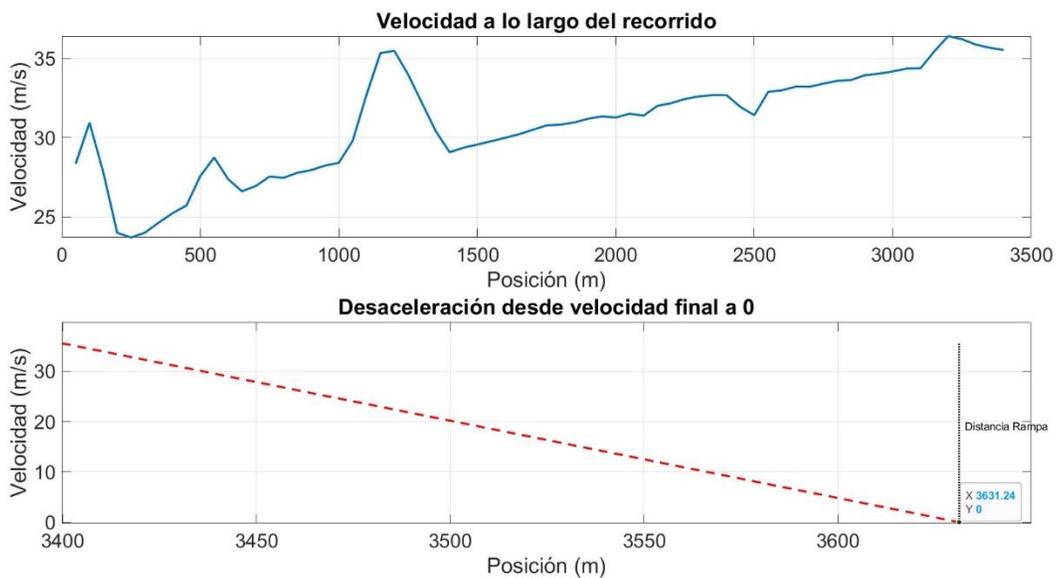


Figura 44-Recorrido previo al ingreso de la rampa 3, con superficie de asfalto.

En la Figura 45 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes en la rampa No. 4 (Libramiento Morelia, 006+800) con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10, obteniendo una velocidad de ingreso de 32.26 m/s para obtener un tiempo de 11.95 segundos para detenerse, con una longitud de 192.69 m.

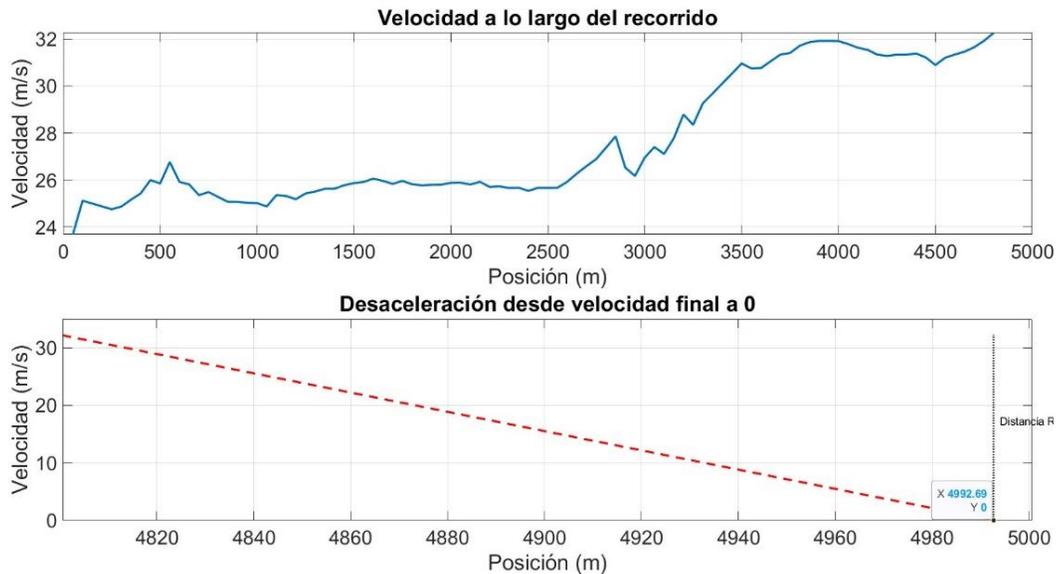


Figura 45-Recorrido previo al ingreso de la rampa 4, con superficie de concreto.

En la Figura 46 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo, en la rampa No. 4 (Libramiento Morelia, 006+800), donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa es de 31.47 m/s, con un tiempo de 11.68 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 183.84 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

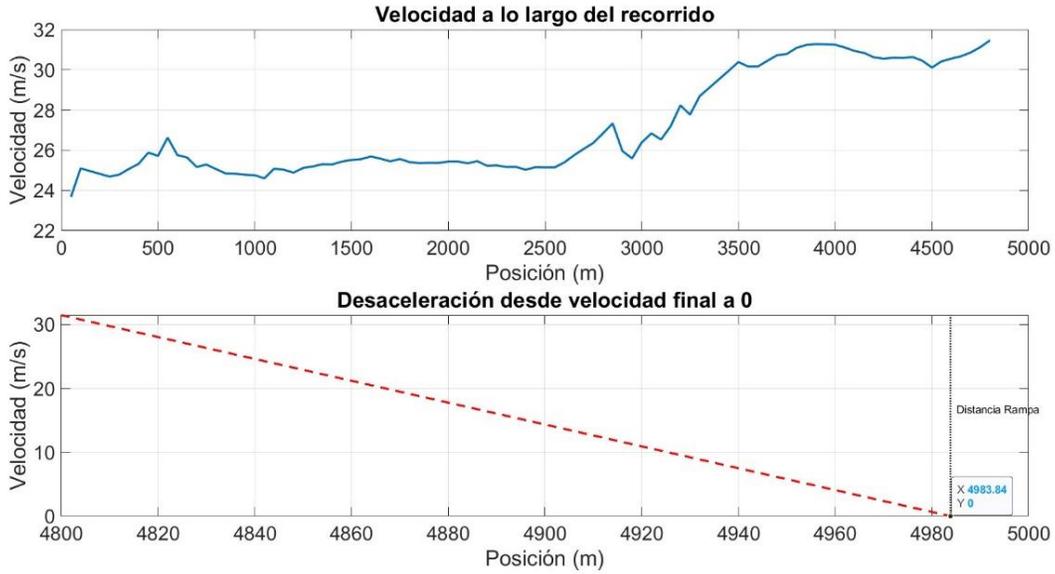


Figura 46-Recorrido previo al ingreso de la rampa 4, con superficie de asfalto.

En la Figura 47 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes en la rampa No. 5 (Pátzcuaro-Uruapan, 084+400) con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10, obteniendo una velocidad de ingreso de 41.33 m/s para obtener un tiempo de 14.83 segundos para detenerse, con una longitud de 306.42 m.

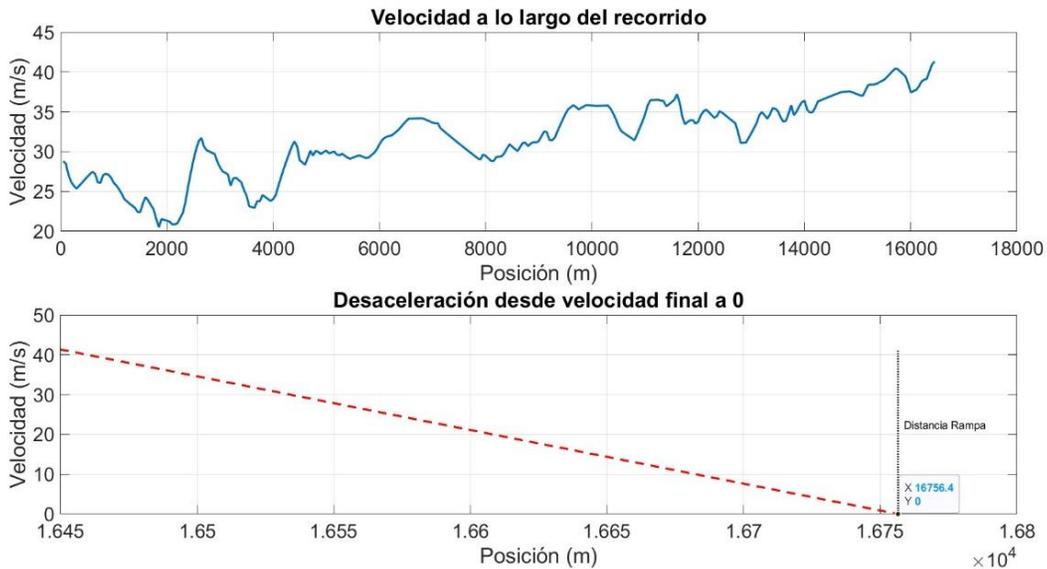


Figura 47-Recorrido previo al ingreso de la rampa 5, con superficie de concreto.

En la Figura 48 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo, en la rampa No. 5 (Pátzcuaro-Uruapan, 084+400), donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa es de 39.98 m/s, con un tiempo de 14.41 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 288.11 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

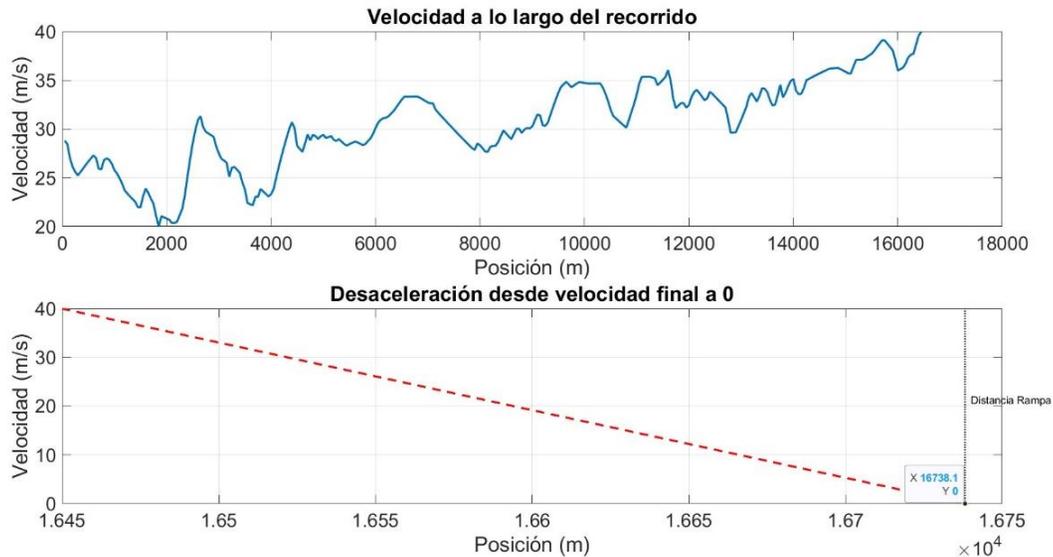


Figura 48-Recorrido previo al ingreso de la rampa 5, con superficie de asfalto.

En la Figura 49 se muestra el perfil de velocidad de las pendientes en la rampa No. 6 (México-Puebla, 39+220) con una superficie de rodamiento de concreto de 0.10, obteniendo una velocidad de ingreso de 44.38 m/s para obtener un tiempo de 18.52 segundos para detenerse, con una longitud de 411.02 m.

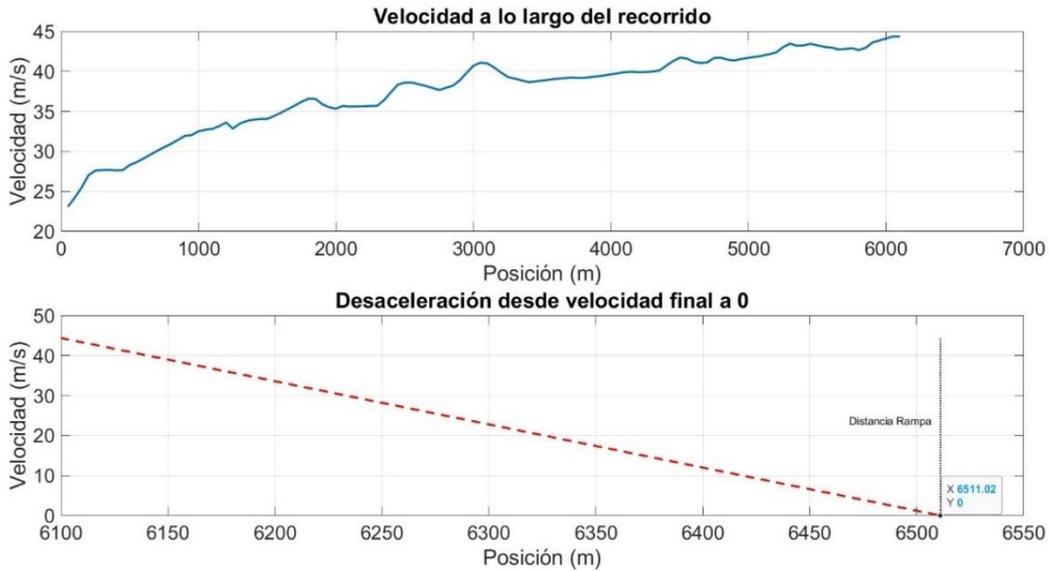


Figura 49-Recorrido previo al ingreso de la rampa 6, con superficie de concreto.

En la Figura 50 se muestra la gráfica de las velocidades alcanzadas en cada punto de la ruta del vehículo, en la rampa No. 6 (México-Puebla, 39+220) donde la velocidad con la que se ingresó a la rampa es de 43.33 m/s, con un tiempo de 18.29 segundos para frenar el vehículo en una longitud de 396.26 metros, con una superficie de rodamiento de asfalto de 0.12.

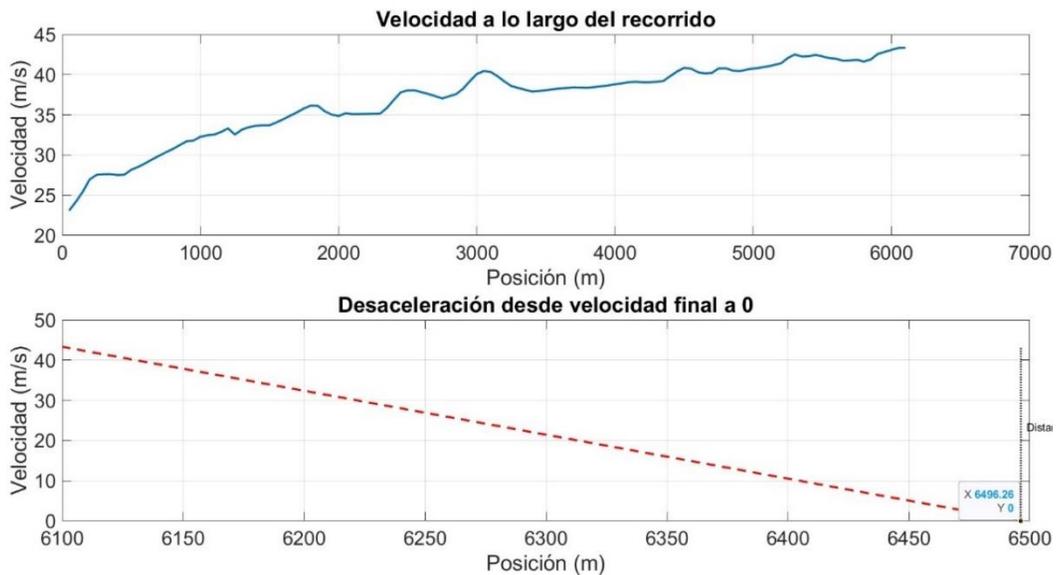


Figura 50-Recorrido previo al ingreso de la rampa 6, con superficie de asfalto.

Con las longitudes de las rampas existentes se realizó una comparación con las longitudes estimadas en el modelo. Para calcular estas longitudes, se consideraron las pendientes en las áreas de estudio y el tipo de material utilizado en su construcción. Se observa que las rampas México-Querétaro (158+580), Libramiento Morelia (001+680) y Libramiento Morelia (006+800) tienen longitudes menores a las proyectadas en sitio de estudio. Por otro lado, las rampas México-Querétaro (157+420), Pátzcuaro-Uruapan (084+400) y México-Puebla (39+220) presentan longitudes superiores a las reales, como se muestra en la Figura 51 y en la Tabla 28.

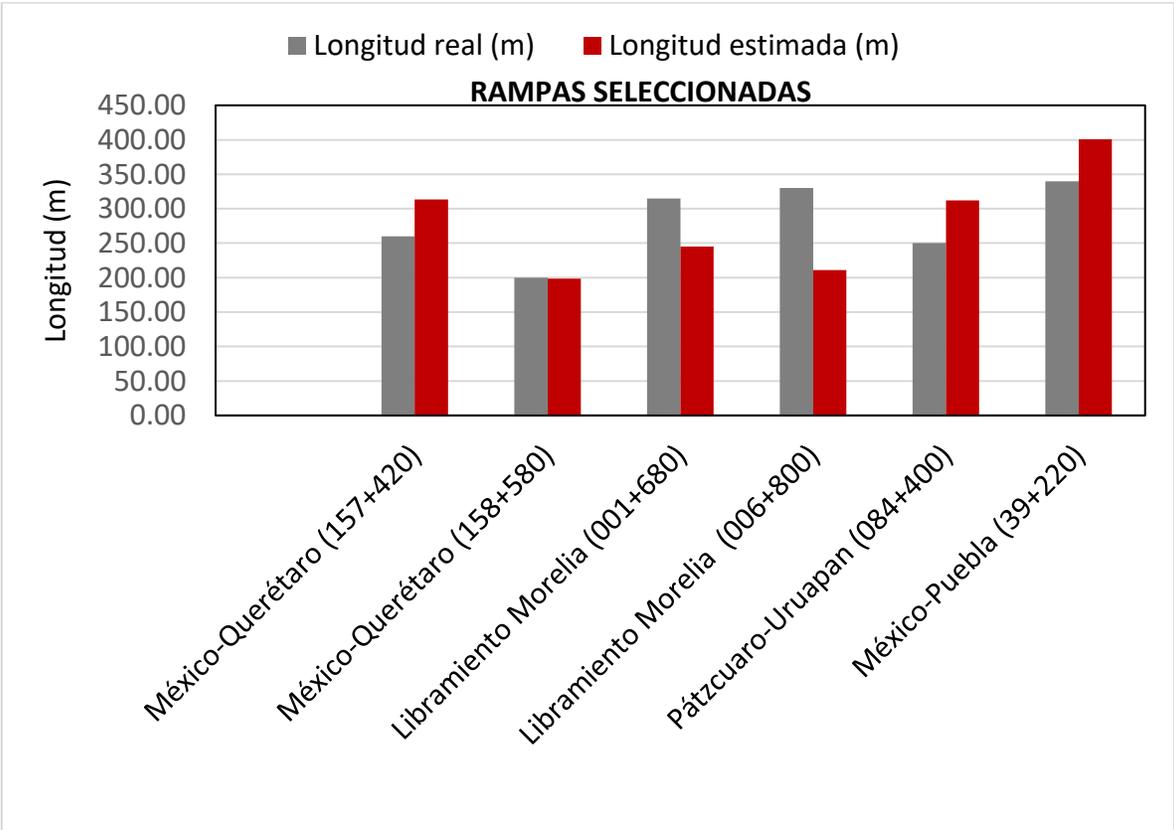


Figura 51-Comparación de longitudes estimadas y longitudes reales.

Tabla 28- Porcentajes de reducción en comparación de los modelos existentes

Nombre de la rampa	Longitud real (m)	Longitud estimada (m)
México-Querétaro (157+420)	260.00	317.12
México-Querétaro (158+580)	200.00	191.07
Libramiento Morelia (001+680)	315.00	231.24
Libramiento Morelia (006+800)	330.00	192.69
Pátzcuaro-Uruapan (084+400)	250.00	288.11
México-Puebla (39+220)	340.00	396.26

También se calcularon las fuerzas G, que reflejan un análisis de diferentes características de las rampas, como velocidad, fricción y tiempo de recorrido. El coeficiente de fricción dinámico se calculó en base a la longitud obtenida por el modelo propuesto y con el ángulo de inclinación que existe en cada rampa. Como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29- Fuerzas G obtenidas en el proceso de desaceleración

Velocidad (km/h)	μ_k	G	Seg.	Pendiente
Rampa 1 (México-Querétaro,157+420)				
41.53	0.1335	0.16	31.02	0.03
42.03	0.1414	0.17	29.67	
43.01	0.1415	0.17	30.36	
Rampa 2 (México-Querétaro,158+580)				
28.53	0.1475	0.2	19.08	0.05
30.06	0.1477	0.2	20.08	
32.56	0.1489	0.2	21.58	
Rampa 3 (Libramiento Poniente de Morelia,1+680)				
35.10	0.1286	0.16	27.19	0.03
35.54	0.1393	0.17	25.46	
36.35	0.1397	0.17	25.97	

Rampa 4 (Libramiento Poniente de Morelia,6+800)				
31.41	0.143	0.18	21.79	0.04
31.71	0.1383	0.18	22.72	
32.27	0.1385	0.18	23.09	
Rampa 5 (Pátzcuaro-Uruapan,84+400)				
40.22	0.1408	0.17	28.51	0.03
41.32	0.141	0.17	29.25	
41.33	0.141	0.17	29.26	

6.3.2. Análisis estadístico

Para esta etapa se utilizó el análisis de varianza de dos factores (ANOVA de dos factores) el cual es una técnica estadística utilizada para evaluar si hay diferencias significativas en las de los grupos, considerando dos variables independientes (factores), en este caso es longitudes por modelos y por tipo de material.

Mediante un análisis estadístico de varianza (ANOVA), se evaluaron las longitudes estimadas en campo y las del modelo propuesto para cada rampa seleccionada. En la Tabla 11, se presenta un p-value de 0.9521, que es superior al nivel de significancia común de 0.05. Esto indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, que establece que las longitudes estimadas en el modelo y las reales no son diferentes. Sin embargo, los resultados del ANOVA muestran que las medias de los grupos son estadísticamente similares. El p-value de 0.9521 sugiere que las longitudes estimadas y las longitudes reales en el sitio son comparables, lo que permite formular una hipótesis alternativa: el modelo calcula longitudes que son similares a las proyectadas. A pesar de que existe una diferencia entre los dos grupos (real y estimado), como lo indica la suma de cuadrados dentro de los grupos (44344.5726) frente a la suma de cuadrados entre ellos (16.8507), se concluye que el factor que separa los grupos tiene un impacto insignificante en la variable dependiente. En otras palabras, las longitudes estimadas en el modelo son cercanas a las reales, lo que demuestra que, estadísticamente, los resultados

obtenidos son similares a las longitudes reales observadas en el sitio, como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30-Análisis estadístico

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	16.8507	16.8507	0.00379995	0.95206123	4.964602744
Dentro de los grupos	44344.5726	4434.45726			

Para entender la relación entre las fuerzas que interactúan en el modelo propuesto, se llevó a cabo un análisis de correlaciones. En la Figura 8 se observa que la fuerza debida a la pendiente presenta un R^2 de 0.9864, lo que indica que es la fuerza predominante en el modelo. En contraste, la resistencia a la rodadura muestra un R^2 de 0.0006 y la resistencia aerodinámica un R^2 de 0.0012. Esto sugiere que las pendientes del perfil topográfico son el factor más influyente en los resultados de las velocidades de entrada, mientras que tanto la resistencia a la rodadura como la resistencia aerodinámica no tienen un impacto significativo en los resultados del modelo, dado que sus valores de R^2 son inferiores a 0.9.

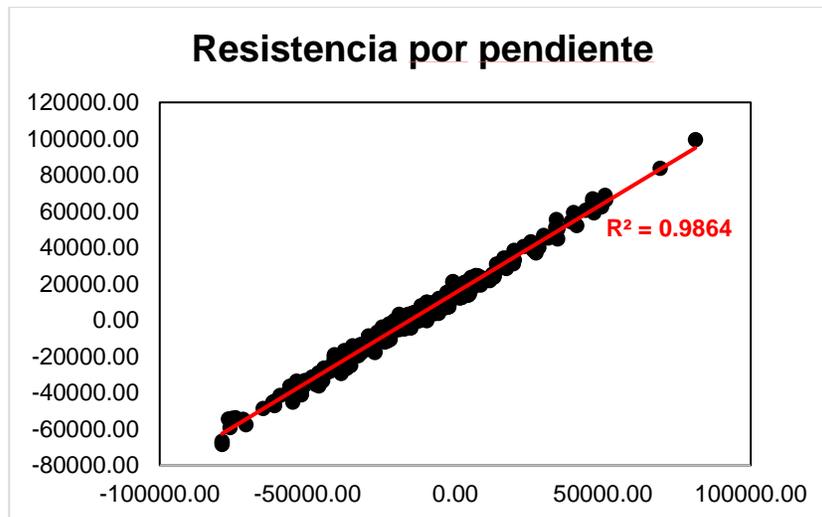


Figura 52-Correlación de la fuerza total y la resistencia por pendiente.

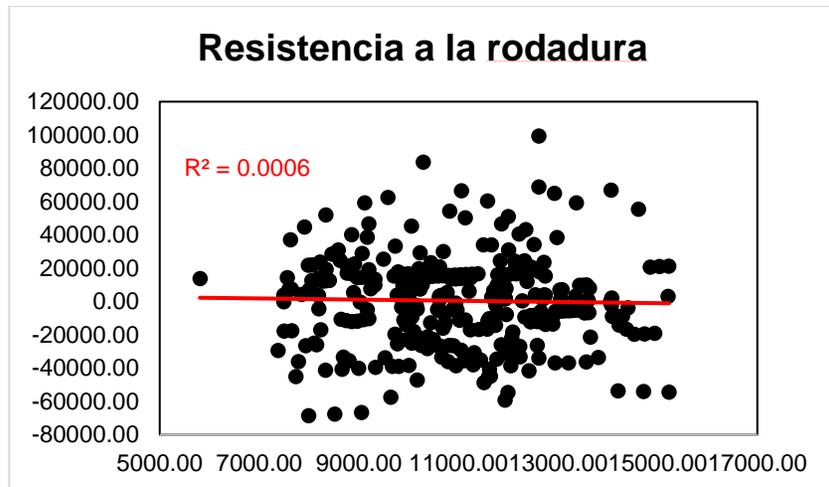


Figura 53-Correlación de la fuerza total y la resistencia a la rodadura.

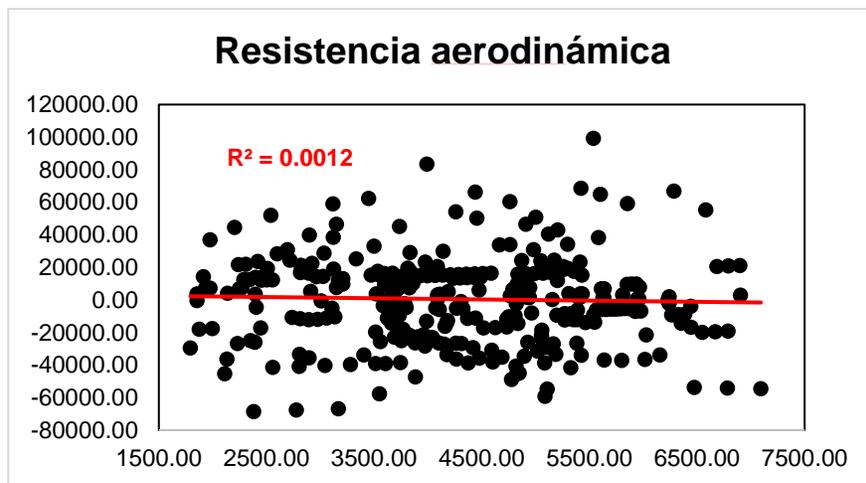


Figura 54-Correlación de la fuerza total y la resistencia aerodinámica.

1.1. Discusión

Cuando se aplicaron los modelos existentes anteriormente descritos, se observó que las velocidades de entrada a las rampas de emergencia, presentan correlaciones asociadas con la longitud de cada segmento analizado, la pendiente longitudinal y la carga que viaja en el sistema de transporte carretero.

En el mismo sentido, cuando las longitudes previas al ingreso de las rampas de emergencia son menores o exceden a 3.6 km, no se obtienen variaciones de las velocidades de entrada cuando se emplean los modelos descritos anteriormente, esto se debe a que los autores consideran que el cuerpo en estudio entra en un equilibrio de fuerzas, ocasionando que no exista aceleración y las velocidades se vuelvan constantes.

Sin embargo, la normativa mexicana PROY-NOM-036-SCT2-2023 se fundamenta en la Ley de la Conservación de la Energía Mecánica, que transforma la energía potencial en energía cinética (en movimiento) en un punto del plano inclinado donde se puede calcular la velocidad del vehículo en cualquier punto del recorrido. Esto resulta práctico en el diseño de las rampas de emergencia, ya que solo se necesita considerar la altura sin tener que considerar todos los aspectos del movimiento en cada instante. Sin embargo, esta ley generaliza los valores en cada segmento sin contar las pérdidas debido al aire, al desgaste del material o a las condiciones del medio ambiente. Al no considerar las pérdidas de energía debidas a fricción o resistencia, se puede sobreestimar la velocidad de un vehículo al final de la rampa, lo que podría llevar a diseños inadecuados en la longitud y un peligro para los usuarios.

Al inicio de la presente investigación, se observó que la velocidad máxima de entrada recomendada por la normativa mexicana es de 140 km/h, debido a que principalmente la ecuación planteada estandariza el comportamiento del vehículo en pendientes descendentes. Sin embargo; esta ecuación es la misma que la que se aplica en Estados Unidos de América para pendientes en descenso de longitudes menores a 6 km. Para longitudes mayores a 6 km, la normativa mexicana no

menciona nada al respecto de los criterios de diseño. Esto es importante, en casos particulares, como el de la carretera Pátzcuaro- Uruapan donde la longitud de descenso es de 16.7 km, por lo cual, en este momento la normativa limita al proyectista a tomar decisiones respecto a considerar un espectro de velocidades de entrada en exceso de lo que propone dicha normativa, lo que trae como consecuencia la falta de aplicación del criterio técnico del especialista.

Por otra parte, el modelo de Rakha *et al.*, (2001), propone, como ya fue explicado, que existe una influencia importante de la carga que viaja en el sistema de transporte carretero generando un incremento en la velocidad de entrada en una rampa de emergencia, ya que para su análisis se consideran una pendiente descendente, las fuerzas que se oponen al movimiento y la relación peso/potencia. Esto es importante en México, ya que como se ha mostrado en la estación de calamanda los vehículos viajan con un exceso de carga de hasta el 53%, lo cual tampoco se considera dentro de las variables de diseño de las rampas de emergencia.

Autores como Qin *et al.* (2019), se centran en el análisis de la interacción del neumático con la superficie de rodamiento, sin considerar el escenario previo al ingreso a la rampa. Otros como Chen *et al.* (2008), solo consideran la dinámica vehicular ante las condiciones de las carreteras, sin considerarlo en un escenario de ingreso a las rampas. Lo que nos indica que las rampas de emergencia han sido analizadas en un solo escenario, pendientes en descenso y dentro de la rampa. Comprender que el coeficiente a la rodadura cambia en función a la velocidad y el material con el que transitan.

La propuesta presentada en esta investigación busca incorporar parámetros que no han sido considerados en otros modelos dentro de las ecuaciones de movimiento uniformemente acelerado. Estos parámetros incluyen características de los vehículos, así como factores ambientales y operativos. Al integrar estas variables en el cálculo de la velocidad de entrada para las rampas de emergencia, se asegura

que estas rampas proporcionen una longitud efectiva para detener vehículos de manera segura. Esto implica que las aceleraciones se mantendrán dentro de límites que garanticen el bienestar de los ocupantes, incluso en situaciones extremas. Además, se pueden analizar escenarios con sobrecarga, condiciones ambientales desfavorables y diferentes coeficientes de resistencia a la rodadura, que están asociados principalmente con materiales granulares como grava y arena.

1.2. Conclusión

Con esta investigación se nota la complejidad que se tiene para obtener los valores de velocidad de entrada a la rampa de emergencia, estos requieren un estudio previo de la zona donde se tiene la rampa. Por otra parte, se pudo comprobar que el peso del vehículo de diseño influye directamente en la velocidad alcanzada, así como la pendiente de diseño. Los resultados obtenidos muestran que en un alineamiento vertical descendente deja como consecuencia que los vehículos puedan alcanzar velocidades a las establecidas por la normativa (140 km/h).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede demostrar que la norma mexicana PROY-NOM-036-SCT2-2023 (SCT, 2017), contiene una Ecuación fundamentada en la ley de la conservación de la energía mecánica, la cual evalúa el comportamiento del vehículo cuando comienza su descenso desde una altura h , partiendo de una energía inicial y cuando llega a una rampa de emergencia dicha energía se ha transformado en una energía que se debe “liberar”. Entre mayor sea la velocidad de operación y la distancia que recorrerá el vehículo, tendremos velocidades mayores de ingreso a las rampas de emergencia

El modelo propuesto está fundamentado en parámetros como; pendientes y características del vehículo, donde se observó con el análisis estadístico que la fuerza por pendiente es la que tiene mayor correlación con las fuerzas que se oponen al movimiento con una R^2 de 0.9864.

La hipótesis se cumple en las rampas, México-Querétaro (158+580), Libramiento Morelia (001+680) y el Libramiento Morelia (006+800). Sin embargo, en rampas

como México-Querétaro (157+420), Pátzcuaro-Uruapan (084+400) y México-Puebla (39+220) se obtienen longitudes mayores a las reales.

Asociado a lo anterior se nota que las longitudes obtenidas en el modelo son mayores a las proyectadas en las rampas, concluyendo que no se cumple la hipótesis debido a que los vehículos necesitan mayor longitud para frenar, con esto igual se tienen fuerzas G menores permitiendo que la desaceleración no sea tan brusca.

Para la disminución de la longitud de las rampas de emergencia, se puede notar que influye directamente el coeficiente de resistencia a la rodadura del material, así como la elección de la pendiente, ya que esta puede hacer que disminuya o aumente.

Con el análisis de los Pesos Brutos Vehiculares, se demostró que los vehículos viajan con exceso de carga, siendo el tracto camión articulado (T3-S3) y tracto camión doblemente articulado (T3-S2-R4) con un 50.03% y un 30.80% respectivamente. Esto influye directamente en el modelo ya que, a mayor carga, más longitud de frenado necesitará el vehículo en detenerse.

Esta investigación demuestra que el modelo propuesto, parte del análisis de pendientes, pero este modelo no contempla las disminuciones de velocidad en curvas horizontales. Aunque en algunas rampas se cumplió la hipótesis en general, se concluye que muchas rampas están diseñadas con longitudes menores a las requeridas en la longitud de frenado necesarias, es por ello que se recomienda a la Secretaria de Comunicaciones Infraestructura y Transporte que las rampas deben de tener mayor longitud, lo cual minimiza el riesgo que los vehículos recorran toda la rampa sin detenerse y necesiten montículos de arenas que frenen abruptamente el vehículo, además de revisar la inclinación de las rampas en los diseños, ya que éstas influyen en la longitud, y permiten que los vehículos puedan entrar de forma suave a la rampa y frenar de forma paulatinamente sin perder el control.

Así mismo revisiones periódicas para asegurar que los materiales cumplan con la resistencia a la rodadura, ya que estas están expuestas a condiciones climáticas adversas y al momento de usarse sean eficientes.

Esta investigación tiene un enfoque humanista donde se invita a las autoridades correspondientes a revisar la normativa, donde se puedan regular los pesos con los que los camiones transitan en la red federal, así como la inclusión de ecuaciones claras donde involucren las características del vehículo, de la vía y de operación. Con esto se plantean líneas futuras de un modelo que se centre en el cálculo del coeficiente de rodadura con exceso de carga. Así como evaluar el modelo propuesto con variaciones con los datos ambientales como; densidad debido a la temperatura, rodadura debido a escenarios climáticos no óptimos (lluvia, neblina), para saber cómo estos influyen en la longitud de las rampas de emergencia.

2. LITERATURA CITADA

- Acosta, M., Kanarachos, S., & Blundell, M. (2011). Road friction virtual sensing: A review of estimation techniques with emphasis on low excitation approaches. *Applied Sciences*, 7(12), 1230.
- af Wåhlberg, A. E. (2000). The reliability of g-force, and a replication of its relation to bus accidents. *Submitted for publication, a*.
- Alaei, E., & Mahboubi, A. (2012). A discrete model for simulating shear strength and deformation behaviour of rockfill material, considering the particle breakage phenomenon. *Granular Matter*, 14(6), 707-717.
- Al-Qadi, I. L., & Rivera-Ortiz, L. A. (1991). Use of gravel properties to develop arrester bed stopping model. *Journal of transportation engineering*, 117(5), 566-584.
- Álvarez Mantaras, D., LUQUE RODRÍGUEZ, P. A. B. L. O., & Vera, C. (2004). *Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico: sistemas y comportamiento dinámico*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Ambrož, M., Trajkovski, J., & Kunc, R. (2020). Decelerations of passenger vehicles on gravel arrester beds. *Sustainability*, 12(5), 1761.
- Ambrož, M., Trajkovski, J., & Kunc, R. (2023). Gravel arrester beds as an important motorway safety element. *Transportation research procedia*, 69, 592-599.
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, D.C.
- Ayala Rivera, J. (2019). Factores de riesgo psicosociales en conductores de transporte terrestre de carga sobredimensionada. Caso: Transportes Acoinsa SAC. Tesis para obtener el grado de licenciatura, Universidad ESAN.
- Bello-Salau. H., Aibinu. A. M., Onumanyi. A. J., Ahunsi. S., Onwuka. E. N., & Dukiya. J. J. (2018, September). Development of a road surface condition monitoring and database system. In *2nd International Conference on Information and Communication Technology and Its Applications (ICTA 2018)*. Federal University of Technology. Minna. Nigeria (Vol. 6).
- Besiktepe. D., Valdes-Vasquez. R., Strong. K., & Shuler. S. (2020). *Improving performance of emergency escape ramps (EERs)*. *Journal of Transportation Safety & Security*. 1–21. doi:10.1080/19439962.2020.1796864
- Bhatnagar. R. V., & Ram. S. (2021). *Assessment of level of service for access and dispersal facilities in a railway terminal*. *International Journal of Transportation Science and Technology*. doi:10.1016/j.ijst.2021.04.010
- Boza-Valle, J. A., & Manjarez-Fuentes, N. (2016). Diagnóstico estratégico de emprendimientos de economía popular y solidaria en ecuador. *Ingeniería industrial*, 37(2), 208-217.

- Cadengo, R., Cuevas, C., Mayoral G. & Silva, R. (2022) .*Recomendaciones de seguridad vial para rampas de emergencia para frenado en carreteras*. Documento Técnico No 708, México, IMT.
- Calvi. A., Bella. F. & D'Amico. F. (2015). *Diverging Driver Performance Along Deceleration Lanes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2518. 95–103. doi:10.3141/2518-13*
- Capuano, F. A., Heymsfield, E., & Li, N. (2017). *Alternative arresting system design for truck escape ramps. International Journal of Crashworthiness, 1–9. doi:10.1080/13588265.2017.1368120*
- Cárcamo Velázquez, F. R. (2014). *Diseño de rampas de emergencias en autopistas de México*. Tesis para obtener el grado de Maestro, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Chen, C., Wagner, G., Pace, M., & Rogness, T. (2008). *Prediction of heavy truck stopping distance and vehicle behavior using real-time HIL and SIL simulation* (No. 2008-01-2604). SAE Technical Paper.
- Cubillos, C. M. N., & López, Y. A. R. (2009). Fatiga laboral, accidentes e incidentes laborales en los conductores de carga pesada de una empresa transportista de la ciudad de Yopal. *Cuadernos hispanoamericanos de psicología [Internet]*, 7-21.
- Cuevas, C., Cadengo, R., Mayoral G. & Mendoza, D. (2019) .*Anuario estadístico de colisiones en carreteras federales 2019*. Documento Técnico No 80, México, IMT.
- Cuevas, C., Cadengo, R., Mayoral G. & Mendoza, D. (2021) .*Anuario estadístico de colisiones en carreteras federales 2020*. Documento Técnico No 83, México, IMT.
- Delaigue, P., & Eskandarian, A. (2004). A comprehensive vehicle braking model for predictions of stopping distances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 218(12), 1409-1417.*
- Di Rado, G. R., & García, D. S. P. (2013). Modelo de simulación computacional en tiempo real de aceleración de un automóvil en diferentes superficies de rodamento. In *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (27.: 2013 nov. 4-8: Belém, PA).[Anais][recurso eletrônico],[Rio de Janeiro: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2013].[12] p., il. color.*
- Di Rado, G. R., Devincenzi, G. H., & García, D. S. P. (2011). Aplicación del Método de Integración Numérica de Ecuaciones Diferenciales Runge Y Kutta 4 (Rk4) a un Modelo de Simulación Longitudinal de Dinámica Vehicular Terrestre. *Mecánica Computacional, 30(38), 2907-2927.*
- Dirección General de Servicios Técnicos (2018). Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, 2da Edición. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Echaveguren, T., Vargas, S., & Ñancufil, J. (2007). Metodología de análisis y diseño de lechos de frenado. *Revista ingeniería de construcción, 22(3), 175-184.*

- Edelmann, J., Gobbi, M., Mastinu, G., Ploechl, M., & Previati, G. (2015). Friction estimation at tire-ground contact. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 8(2015-01-1594), 182-188.
- Evans, L., & Wasielewski, P. (1983). *Risky driving related to driver and vehicle characteristics*. *Accident Analysis & Prevention*, 15(2), 123–136. doi:10.1016/0001-4575(83)90068-4
- Fonseca. R. L.. Fernández. J. P.. & Raïmat. C. (2022). *Dimensionamiento de un lecho de frenado soportado por un sistema dinámico de protección-amortiguación para minería de interior*.
- García León, R. A., Acosta Pérez, M. A., & Flórez Solano, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Tecnura*, 19(45), 53-63.
- García Martín, G. (2019). Metodología de decisión sobre el material de diseño del sistema de frenado de un avión ligero
- García, L. J., & Rivera, J. H. (2009). Formulación matemática de algunos modelos físicos utilizados en la reconstrucción de un evento de tránsito y las consideraciones para su implementación. *Scientia et technica*, 15(43), 199-203
- García-Ramírez. Y. (2022). Rampas de Escape para Camiones en Carreteras: Un Nuevo Procedimiento para Justificar su Necesidad y Estimar su Ubicación. *Revista Politécnica*. 49(2). 17-26.
- Greto, K., & Easa, S. M. (2020). Reliability-based design of truck escape ramps. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 47(4), 395-404.
- Gutiérrez, S., Cuevas, C., Zamora, D. y Jiménez S. (2009). El Autotransporte de carga y la seguridad vial. NOTAS núm. 120, septiembre-octubre 2009, artículo 2.
- Hall, D. E., & Moreland, J. C. (2001). Fundamentals of rolling resistance. *Rubber chemistry and technology*, 74(3), 525-539.
- Híjar-Medina, M. C., Carrillo-Ordaz, C. E., Flores-Aldana, M. E., Anaya, R., & López-López, M. V. (1999). Factores de riesgo de lesión por accidentes de tráfico y el impacto de una intervención sobre la carretera. *Revista de salud Pública*, 33(5), 505-512.
- Hu, X., Qin, H., Zhu, Y., Liu, W., & Dai, G. (2022). Intelligent Control and Parameter Calculation of Highway Truck Escape Ramp. *Journal of Engineering, Project & Production Management*, 12(3).
- Instituto Mexicano del Transporte [IMT] . (2023). *Consulta de la Base de Datos del EECAN*. Recuperado el 10 de septiembre del 2023 de <https://www.imt.mx/micrositios/seguridad-y-operacion-del-transporte/estadisticas/consulta-del-eecan.html>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Accidentes de tránsito* Estándar de datos abiertos. Recuperado el 26 de abril del 2023 de <https://www.inegi.org.mx/temas/accidentes/#Tabulados>
- Jazar N. R. (2010). Vehicle dynamics: Theory and applications. Springer(Ed.). *Rolling Resistance*, 33(1), 114-121.
- Jianjun, Z., & Gaoqiang, Z. (2013). Analysis of incident in emergency escape ramps and legal risk aversion [J]. *ICTE*, 706-715.
- Liu, H., Shen, T., Wang, F., & Zhang, W. (2010). Determining design speed of truck escape ramp based on back analysis method. In *Traffic and Transportation Studies 2010* (pp. 969-976).
- López, A. A., Henao, J. B., & Martínez, W. P. (2007). Determinación experimental de la distancia de frenado de un automóvil. *Entre Ciencia e Ingeniería*, (2), 33-42.
- Magiera. T. Kułaga. P. & Wójcik. K. (2017). Analysis and assessment of dynamic response to passengers during lift emergency braking. *Advances in Science and Technology. Research Journal*. 11(3). 164-171.
- Maldonado Saquisare, R. O., & Neira Vivanco, E. M. (2019). *Análisis de los accidentes de tránsito provocados por fallas mecánicas en los vehículos de la categoría N1 y de la subcategoría M3 tipo bus, en el cantón Cuenca-Ecuador* . Tesis para obtener el grado de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana.
- Mayoral, E., Cuevas, C., Mendoza, D., Moreno, J. & Cuella, R. (2008). *Experiencia mexicana en el diseño y operación de rampas de frenado en carreteras*. 1-23.
- Mendoza, D., Cadena, A., Buen, O., Domínguez, L., & Rico, A. (1992). *Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras. estaciones instaladas durante 1991*. Documento Técnico No 8, México, IMT.
- Mirfendereski. L.. Salimi. M.. & Ziaei-Rad. S. (2008). *Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings*. *International Journal of Mechanical Sciences*. 50(6). 1042–1057. doi:10.1016/j.ijmecsci.2008.02.007
- Mondragón, F., Pérez, A., Garnica, P. & Hernández, R. (2021). *Caracterización de espectros de carga en la red carretera mexicana*. Documento Técnico No 624. México. IMT.
- Moral. L. A. (2014). *Logística del transporte y distribución de carga*. Ecoe Ediciones.
- National Cooperative Highway Research Program [NCHRP]. (1992). *NCHRP Synthesis 178. Truck Escape Ramps, a Synthesis of Highway Practice* . Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Pennsylvania Department of Transportation [PENNDOT]. (2018). *Highway Design (Design Manual Part 2)*. Pennsylvania Department of Transportation.

- Peréz, E. F. C., Gallo, O. J. M., & Pinilla, C. B. (2010). Sistema de Regeneración de energía en Vehículos (modelado y Simulación dinámica). *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 145-156.
- Peterson, T. D., Jolly, B. T., Runge, J. W., & Hunt, R. C. (1999). Motor vehicle safety: current concepts and challenges for emergency physicians. *Annals of emergency medicine*, 34(3), 384-393.
- Piro, O. E. (2012). Notas sobre Física General: Resistencia a la rodadura. *Universidad Nacional de La Plata, Argentina*.
- Planzer, R. (2005). *La seguridad vial en la región de América Latina y el Caribe: situación actual y desafíos*. CEPAL.
- Puente-Rodríguez, E., & Pillon, S. C. (2011). Estrategias de prevención y vigilancia sobre el uso de sustancias ilícitas y su impacto en los costos de accidentes en conductores de carga pesada en México. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 19, 831-838.
- Qin, P., Chen, C., Guo, H., Han, Y., & Meng, Q. (2019). Analyzing the influence of aggregate properties on stopping distance on truck escape ramps. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24, 323-327.
- Qin, P., Li, Z., Li, H., Huang, J., & Wang, G. (2022). Influence of Aggregate Pollution in Truck Escape Ramps on Stopping Distance of Uncontrolled Vehicles. *Sustainability*, 14(18), 11593.
- Qin, P., Wu, F., Wu, D., Zhang, S., & Huang, D. (2020). Three-dimensional discrete element simulation of the runaway vehicle deceleration process on the arrester bed of truck escape ramps. *Science progress*, 103(3), 0036850420940890.
- Rakha, H., Lucic, I., Demarchi, S. H., Setti, J. R., & Van Aerde, M. 2001. Vehicle dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 127(5), 418-425.
- Ramírez Sánchez, J. E. (2015). Diseño de rampas de emergencia para frenado en carreteras.
- San Filippo, W. K., & DeLong, H. (2002). *Engineered Materials Arresting System (EMAS): An Alternative Solution to Runway Overruns. Designing. Constructing. Maintaining. and Financing Today's Airport Projects*. doi:10.1061/40646(2003)23
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte [SCT]. (2017). NOM-012-SCT-2-2017: *Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. Ciudad de México: SCT.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte [SCT]. (2023). NOM-036-SCT2-2023: *Rampas de emergencia para frenado en carreteras*. Ciudad de México: SCT.

- Strong, K. (2019). Spill clean-up recommendations for emergency escape ramps (EERs): western mountain DOTs' perspectives. In *Proceedings of the 55th ASC Annual International Conference*.
- Van Schoor, O., van Niekerk, J. L., & Grobbelaar, B. (2001). *Mechanical failures as a contributing cause to motor vehicle accidents — South Africa*. *Accident Analysis & Prevention*, 33(6), 713–721. doi:10.1016/s0001-4575(00)00083-x
- Vanlaar, W., & Yannis, G. (2006). *Perception of road accident causes*. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 155–161. doi:10.1016/j.aap.2005.08.007
- Velasteguí Carrillo, A. J. (2015). *Los materiales de fricción y su influencia en la eficiencia de frenado* (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2015).
- Vera, C., Aparicio, F., & San Roman, J. L. (1995). Theoretic model for the computer analysis of vehicle collisions. *Safety science*, 19(2-3), 179-189.
- Viñas, G. V. (2014). *Estructuras del vehículo*. Editex: España. 67 pp.
- Weaver, C. S., Sloan, B. K., Brizendine, E. J., & Bock, H. (2006). *An Analysis of Maximum Vehicle G Forces and Brain Injury in Motorsports Crashes*. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 38(2). 246–249. doi:10.1249/01.mss.0000184773.07870.5e
- Witthford, D. K. (1992). *Truck escape ramps* (Vol. 178). Transportation Research Board: United States of America. 11 pp.
- Yan, M., & Xu, J. (2018). Prediction Model for Brake-Drum Temperature of Large Trucks on Consecutive Mountain Downgrade Routes Based on Energy Conservation Law. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Zhang, J., & Zhang, G. (2013). *Analysis of Incidents on Emergency Escape Ramps and Legal Risk Aversion*. *ICTE 2013*. doi:10.1061/9780784413159.104

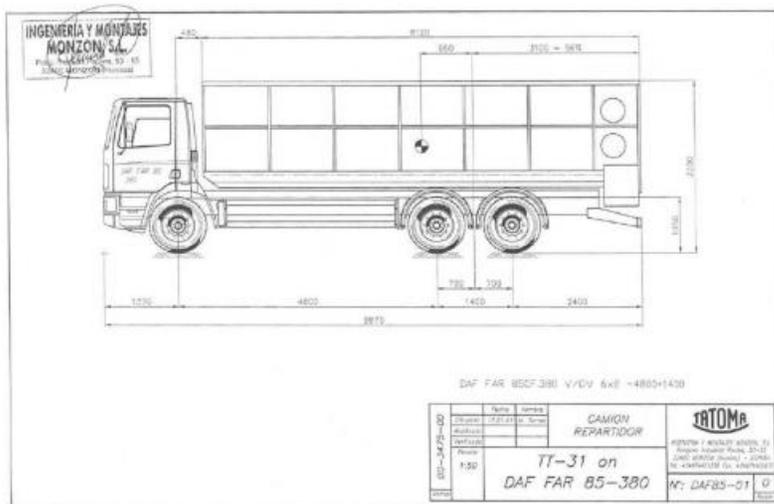
ANEXOS

CAMIÓN REPARTIDOR DE UN COMPARTIMENTO



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Caja metálica distribuidora
- Dimensiones según camión.
- Capacidad aproximada: 31 m³
- Peso en vacío depende de la cinta móvil
- Estructura de la caja en acero al carbono alta resistencia
- Laterales de la caja en aluminio
- Carga de producto : 350 kg/m³
- Transmisión hidráulica continua a velocidad variable
- Sistema de carrete hidráulico para regular la descarga
- Instalación hidráulica con caja de conexión
- Sistema de pesaje con 6 células.
- Carga de rotura de la cadena : 10 000 kg
- Descarga por ambos lados.
- Opcional: fondo de aluminio.





Soluciones para larga distancia

EURO5

RH 440 LA 6x2 Highline

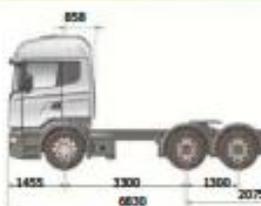


STREAMLINE

13 litros 440 HP

CAPACIDADES Y PESOS

	Eje delantero	Eje trasero	Total
Capacidad técnica	7.100	19.000	26.100
Límite legal *	6.000	18.900	24.900
Peso del chasis **	5.125	3.292	8417
Capacidad máxima de tracción	66.000 kg		



Opcionales: Diferentes distancias entre ejes disponibles desde 1.100 hasta 1.900 mm.

CABINA

CR 19 N Cabina de última generación diseñada para brindar máxima seguridad, visibilidad y confort.

Puesto de conducción	<ul style="list-style-type: none"> • Volante regulable revestido en cuero con comandos de estéreo y control de crucero integrados. • Asiento de conductor con control y suspensión neumática, apoyacabeza integrado 100% regulable, apoyabrazos y apoyo para el pie. • Asiento de acompañante rebatible con apoyabrazos para mayor espacio y comodidad. • Panel de instrumentos color plus equipado con computadora de a bordo con múltiples funciones y tacógrafo 7 días. • Sistema de climatización automático con AA. Cierre centralizado con comando a distancia. • Sistema de audio Premium con pantalla táctil de 5 pulgadas, sistema de navegación, conexiones AUX, USB, SD y Bluetooth.
Características	Cabina frontal Highline aerodinámicamente optimizada con doble litera, visera de nuevo diseño en color de cabina, deflectores de aire y terminaciones Streamline. Paragolpes de plástico alto en color cabina, altura de techo normal. Compartimiento externo en ambos lados de la cabina.
Suspensión	Neumática en 4 puntos.
Vidrios y espejos	Retrovisores térmicos de accionamiento eléctrico en ambos lados. Espejo retrovisor plano del lado conductor y espejo esférico, un gran angular y un lateral superior de visión cercana en el lado del acompañante. Levantavidrios eléctrico y escotilla de techo manual.
Iluminación	Tipo H7, lámpara halógena para luz larga y de cruce. Unidad de faro con luz intermitente, luz de posición, y luz intermitente lateral. Lámparas blancas de identificación y marcación en visera. Luces de largo alcance y luces antiniebla en paragolpes. Limpiafaros con agua de alta presión.
Tecnología	Sistema de Gestión de Flotas, Scania Driver Support.
Opcionales	Bocina neumática en techo, escotilla de techo eléctrica, luces de Xenón, asientos Premium, AICC, LDW, AEB

* El límite legal solo aplica para desplazamientos dentro de la red vial nacional.

** El peso es aproximado e incluye 100 lt de combustible y equipamiento de acuerdo al estándar. (Peso aproximado de combustible 85 kg)

*** Puede variar dependiendo de la medida de las neumáticas.

La imagen es de carácter ilustrativo.

Código de programación

```
% Parámetros iniciales
m = 38287.5; % Masa del objeto (kg)
g = 9.81; % Aceleración debida a la gravedad (m/s^2)
cda = 0.69; % Coeficiente de arrastre aerodinámico
rodamiento = 0.01; % Coeficiente de resistencia de rodamiento
longitudes = xlsread("Longitudes.xlsx"); % Longitudes de segmentos del perfil
topográfico (m)
pendientes = xlsread("Pendientes.xlsx"); % Pendientes para cada segmento (ej.:
5%, 10%, -3%)
v_inicial = 29.166667; % Velocidad inicial (m/s)
Potencia=77552.8; % Potencia del vehículo (watts)
rodram=0.3;
penram=0.02;

% Inicializa variables
x = 0; % Posición inicial
v = v_inicial; % Velocidad inicial

% Propiedades del aire y del objeto
rho = 1.225; % Densidad del aire (kg/m^3)
A = 10; % Área frontal del objeto (m^2)

% Inicializa arreglos para almacenar datos
posiciones = [];
velocidades = [];

% Bucle para cada segmento del perfil topográfico
for i = 1:length(longitudes)
    L_segmento = longitudes(i); % Longitud del segmento
    pendiente = pendientes(i); % Pendiente del segmento

    % Inicialización de la posición en el segmento
    x_segmento = 0; % Posición dentro del segmento

    % Bucle para recorrer el segmento
    while x_segmento < L_segmento
        % Calcula resistencia por pendiente y resistencias aerodinámica y de
        rodamiento
        resistencia_pendiente = m * g * sin(atan(pendiente));
        resistencia_aerodinamica = 0.5 * cda * rho * A * v^2;
        resistencia_rodamiento = (0.015+(rodamiento*((v*3.6)/100)^(2.5)))) * m * g
        *cos(atan(pendiente));

        % Fuerza neta
```

```

    fuerza_mo=Potencia/v;
    fuerza_neta = fuerza_mo-(resistencia_pendiente + resistencia_aerodinamica
+ resistencia_rodamiento);

    % Aceleración
    a = fuerza_neta / m;

    % Actualiza la velocidad y la posición
    v = ((v^2) + (a * (1)*L_segmento))^(1/2); % Se asume que el incremento de
longitud es de 1 metro para simplicidad
    x_segmento = x_segmento + 50; % Incrementa la posición dentro del
segmento

    % Almacena los valores de posición y velocidad
    posiciones(end+1) = x + x_segmento;
    velocidades(end+1) = v;

    % Muestra información de la iteración
    fprintf('Segmento: %d, Posición: %.2f m, Velocidad: %.2f m/s,Rp: %.4f N,Ra:
%.4f N,Rd: %.4f N, Aceleración: %.2f m/s^2\n', ...
        i, x + x_segmento,
v,resistencia_pendiente,resistencia_aerodinamica,resistencia_rodamiento,a);
    end
    % Actualiza la posición total
    x = x + L_segmento;
end

fprintf('Posición final: %.2f m, Velocidad final: %.2f m/s\n', x, v);

% Cálculos finales
resistencia_pendiente = m * g * sin(atan(penram));
resistencia_aerodinamica = 0.5 * cda * rho * A * v^2;
resistencia_rodamiento = rodram * m * g * cos(atan(penram));
fuerza_mo=Potencia/v;
fuerza_neta = fuerza_mo - (resistencia_pendiente + resistencia_aerodinamica +
resistencia_rodamiento);
a = fuerza_neta / m;
t=-v/a;
d=(v/2)*t;

fprintf('Tiempo: %.2f seg, Longitud: %.2f m\n', t, d);

% Graficar las velocidades y distancias
figure;

% Graficar la velocidad durante el recorrido
subplot(2, 1, 1); % Subgráfico 1

```

```

plot(posiciones, velocidades, '-','LineWidth', 2);
title('Velocidad a lo largo del recorrido');
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Velocidad (m/s)');
grid on;

% Graficar distancia y velocidad hasta 0
t_vector = linspace(0, t, 100); % Tiempo desde el presente hasta el tiempo de
parada
velocidad_final = linspace(v, 0, 100); % Velocidades desde la final hasta 0
distancia_rampa = linspace(0, d, 100); % Distancia de la rampa

% Crear el segundo subgráfico para velocidad versus distancia de la rampa
subplot(2, 1, 2); % Subgráfico 2
plot(distancia_rampa + max(posiciones), velocidad_final, 'r--','LineWidth', 2); % '+'
para desplazar la rampa
title('Desaceleración desde velocidad final a 0');
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Velocidad (m/s)');
grid on;

% Marcar la distancia de la rampa en el segundo gráfico
hold on; % Mantener el gráfico actual
plot([max(posiciones) + d, max(posiciones) + d], [0, v], 'k:', 'LineWidth', 1.5); %
Línea vertical en la distancia de la rampa
text(max(posiciones) + d, v/2, ' Distancia Rampa', 'VerticalAlignment', 'bottom',
'Color', 'k');
hold off;

```