Ciencia y Educación
(L-ISSN: 2790-8402 E-ISSN: 2707-3378)
Vol. 7 No. 12.1
Edición Especial XII 2026

ERROR DE APROXIMACIÓN EN MODELOS DE FRENADO VEHICULAR CON PENDIENTES Y FRICCIÓN VARIABLE

APPROXIMATION ERROR IN VEHICLE BRAKING MODELS UNDER ROAD GRADIENTS AND VARIABLE FRICTION

Autores: [1]Gabriel Vicente Macas Pisco, [2]Fabián Eduardo Vilema Chuiza, [3]Silvia Valeria Castelo Quinde y [4]Edwin Anibal Pilamunga Agualongo.
[1]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-3413-4660
[2]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1201-3592
[3]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-4839-9765
[4]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7075-9595
[1]E-mail de contacto: gmacas@itsjapon.edu.ec
[2]E-mail de contacto: fabian.vilema@istcarloscisneros.edu.ec
[3]E-mail de contacto: silvia.castelo@istcarloscisneros.edu.ec
[4]E-mail de contacto: edwin.pilamunga@istcarloscisneros.edu.ec
Afiliación: [1]*Instituto Superior Universitario Japón, (Ecuador). [2*3*4*]Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros, (Ecuador).
[1]Ingeniero Automotriz de la Universidad Tecnológica Equinoccial, (Ecuador). Maestría en Educación Especialidad en Educación Superior de la Universidad Internacional Iberoamericana, (México).
[2]Ingeniero Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Sistemas de Propulsión Eléctrica de la Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador).
[3]Licenciada en Ciencias de la Educación Profesora de Informática Aplicada a la Educación, graduada de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).
[4]Ingeniero Automotriz, graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Transporte y Logística, graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Educación con mención en Docencia e Investigación en Educación Superior, graduado de la Universidad Estatal de Milagro (Ecuador)

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar las discrepancias entre un modelo simplificado de frenado vehicular con fricción constante y otro con fricción dependiente de la velocidad, así como determinar la sensibilidad de las distancias estimadas a diferentes hipótesis de fricción en un intervalo sin datos tabulados. Se desarrolló un estudio cuantitativo de simulación determinista con 48 escenarios, obtenidos al combinar cuatro condiciones de adherencia neumático–pavimento, tres velocidades iniciales y cuatro pendientes longitudinales. Los coeficientes de fricción se obtuvieron de fuentes documentales secundarias y se interpolaron entre 50 y 90 kilómetros por hora. Para velocidades inferiores a 50 kilómetros por hora se compararon tres continuaciones matemáticas: constante, lineal acotada y exponencial. Las distancias de frenado se calcularon mediante una expresión analítica y mediante integración numérica de un modelo dinámico, cuya consistencia se comprobó con una cuadratura independiente. La máxima discrepancia relativa entre modelos alcanzó el 139,76 % en un escenario de baja adherencia, mientras que la sensibilidad máxima a las hipótesis de continuación fue del 23,09 %. Los resultados evidencian que las simplificaciones de la fricción y su extensión fuera del intervalo documentado pueden afectar sustancialmente las distancias calculadas, pese a la elevada concordancia entre procedimientos numéricos. Se concluye que estas diferencias describen la sensibilidad de los modelos matemáticos y no errores de predicción validados experimentalmente; su aplicación a vehículos reales requiere parámetros calibrados y contrastación instrumental.

Palabras clave: Frenado vehicular, Modelización matemática, Fricción neumático–pavimento, Error de aproximación, Análisis numérico, Análisis de sensibilidad.

Abstract

This study aimed to assess discrepancies between a simplified vehicle braking model with constant friction and a model with speed-dependent friction, and to determine the sensitivity of estimated braking distances to

alternative friction assumptions over an interval lacking tabulated data. A quantitative, deterministic simulation study was conducted using 48 scenarios combining four tire–road adhesion conditions, three initial speeds, and four longitudinal road gradients. Friction coefficients were drawn from secondary documentary sources and interpolated between 50 and 90 kilometers per hour. Below 50 kilometers per hour, three mathematical continuation rules were compared: constant, bounded linear, and exponential. Braking distances were computed using an analytical expression and numerical integration of a dynamic model; numerical consistency was checked against independent quadrature. The maximum relative discrepancy between models reached 139.76% under a low-adhesion scenario, whereas the highest sensitivity to the continuation assumptions was 23.09%. These results show that simplifying the friction representation and extending it beyond the documented speed range can substantially alter estimated braking distances, even when numerical methods agree closely. The study concludes that these differences quantify the sensitivity of mathematical formulations rather than experimentally validated prediction errors. Application to actual vehicles would require calibrated friction parameters and comparison against instrumented braking tests.
Keywords: vehicle braking, mathematical modeling, tire–road friction, approximation error, numerical analysis, sensitivity analysis.

Sumário

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as discrepâncias entre um modelo simplificado de frenagem veicular com atrito constante e outro com atrito dependente da velocidade, bem como determinar a sensibilidade das distâncias estimadas a diferentes hipóteses de atrito em um intervalo sem dados tabelados. Desenvolveu-se um estudo quantitativo de simulação determinística com 48 cenários, resultantes da combinação de quatro condições de aderência pneu–pavimento, três velocidades iniciais e quatro declividades longitudinais. Os coeficientes de atrito foram obtidos de fontes documentais secundárias e interpolados entre 50 e 90 quilômetros por hora. Para velocidades inferiores a 50 quilômetros por hora, compararam-se três regras matemáticas de continuação: constante, linear limitada e exponencial. As distâncias de frenagem foram calculadas por uma expressão analítica e pela integração numérica de um modelo dinâmico, cuja consistência foi verificada por uma quadratura independente. A maior discrepância relativa entre os modelos atingiu 139,76% em um cenário de baixa aderência, enquanto a sensibilidade máxima às hipóteses de continuação foi de 23,09%. Os resultados demonstram que as simplificações do atrito e sua extensão para além do intervalo documentado podem alterar substancialmente as distâncias calculadas, apesar da elevada concordância entre os procedimentos numéricos. Conclui-se que essas diferenças expressam a sensibilidade das formulações matemáticas, e não erros de previsão validados experimentalmente; a aplicação a veículos reais exige parâmetros calibrados e comparação com ensaios instrumentados.
Palavras-chave: frenagem veicular, modelagem matemática, atrito pneu–pavimento, erro de aproximação, análise numérica, análise de sensibilidade.

Introducción

La estimación de la distancia de frenado constituye una aplicación de la dinámica longitudinal vehicular en la que intervienen la velocidad inicial, la pendiente y la capacidad de transmisión de fuerzas tangenciales en el contacto neumático–pavimento. Un modelo elemental aproxima la desaceleración mediante un coeficiente de fricción constante, lo que permite calcular la distancia de forma analítica. Sin embargo, esta simplificación no describe los cambios de adherencia a lo largo del intervalo de velocidades recorrido durante la detención, particularmente cuando varían las condiciones de la calzada. La caracterización de la fricción neumático–pavimento mediante formulaciones

sustentadas en resultados experimentales representa un problema mecánico complejo. Cabrera et al. (2018) propusieron un procedimiento para determinar características de fricción y describieron su dependencia de las variables de operación. A su vez, Lorenčič (2023) documentó experimentalmente diferencias en el frenado asociadas con el estado de los neumáticos y la actuación del sistema antibloqueo. Estos antecedentes advierten que la fricción efectiva usada en cálculos simplificados no debe interpretarse como una constante universal.

Investigaciones recientes han formulado modelos más detallados de distancia de frenado. Jiang et al. (2024) consideraron pavimentos mojados y deformaciones por ahuellamiento mediante un modelo de resistencia al deslizamiento y un procedimiento computacional. Chen et al. (2026) estudiaron explícitamente las limitaciones de una aproximación habitual para pendientes descendentes e incorporaron variaciones de resistencia al deslizamiento con la velocidad y el espesor de agua. Por ello, ni la integración numérica de la distancia de frenado ni la consideración conjunta de pendiente y fricción variable constituyen por sí mismas una aportación inédita.

Una cuestión metodológica de interés adicional es la incertidumbre ocasionada por valores de adherencia disponibles solamente para velocidades discretas. La interpolación entre puntos tabulados permite construir funciones operativas, pero calcular la distancia hasta la detención requiere también describir el tramo de baja velocidad para el cual pueden faltar observaciones. La distancia resultante depende entonces de las hipótesis de continuación y no exclusivamente de la precisión del algoritmo de integración. Esta incertidumbre de estructura del modelo es especialmente relevante cuando se pretende comparar una expresión cerrada con una formulación de fricción variable.

La evidencia más reciente refuerza la necesidad de diferenciar los escenarios de adherencia. Zhao et al. (2024) calibraron un modelo que considera la textura del pavimento y la película de agua, mientras que Cai et al. (2024) estudiaron la relación entre profundidad de agua, dinámica vehicular y frenado en calzadas mojadas. Deng et al. (2025) y Guo et al. (2025) examinaron condiciones asociadas al hidroplaneo, procesos que quedan fuera de la representación longitudinal simplificada utilizada aquí.

Los enfoques de dinámica y evaluación del frenado también han avanzado en distintas condiciones de operación. Ekpo y Obinna (2025) analizaron la pendiente mediante formulaciones mecánicas; Genovese et al. (2025) evaluaron la influencia del material y el desgaste de la banda de rodadura en frenado sobre mojado; Karpenko et al. (2026) consideraron presión de inflado y envejecimiento del neumático. En condiciones de adherencia asimétrica o calzadas invernales, Karyotakis et al. (2026) y Xu et al. (2026) emplearon modelos de mayor complejidad. Por su parte, Lin et al. (2026) exploraron la seguridad de frenado durante lluvia mediante simulación acoplada. A diferencia de esos trabajos, el presente análisis no pretende modelar exhaustivamente el vehículo: cuantifica cómo la falta de parámetros de fricción a bajas velocidades condiciona el resultado de un esquema reducido.

El objetivo de la investigación fue cuantificar la discrepancia entre un modelo de frenado de desaceleración constante y un modelo de fricción dependiente de la velocidad, así como

evaluar la sensibilidad de la distancia calculada ante tres hipótesis de continuación de la función de fricción por debajo de 50 km/h, para diferentes pendientes y velocidades iniciales. La contribución se delimita a una comparación matemática reproducible de escenarios documentales y no a una predicción experimentalmente validada del frenado de vehículos particulares.

Materiales y Métodos

Se realizó un estudio cuantitativo, determinista, de simulación y comparación de modelos de frenado longitudinal en plano inclinado. La unidad de análisis fue cada combinación paramétrica, no un vehículo observado. Se definieron 48 escenarios a partir de cuatro condiciones nominales neumático–calzada, tres velocidades iniciales (50, 70 y 90 km/h) y cuatro pendientes longitudinales (−6 %, 0 %, 6 % y 10 %). Se adoptó pendiente positiva para descensos y negativa para ascensos; la inclinación angular se calculó como $\theta = \arctan(p/100)$, con p expresada en porcentaje.

Los coeficientes efectivos de fricción a 50 y 90 km/h se transcribieron de la Tabla 6 de Dimitrakopoulos et al. (2022), publicada en Journal of Sensor and Actuator Networks, 11(4), artículo 72 (https://doi.org/10.3390/jsan11040072). Los cuatro pares utilizados se contrastaron con esa tabla secundaria. La fuente remite a documentación técnica anterior, pero no se tuvo acceso comprobable a los ensayos que originaron esos valores; por ello no se los presenta como mediciones realizadas por los autores ni como una calibración contemporánea. Los valores de 50 y 90 km/h son entradas documentales; la interpolación y las funciones de continuación son decisiones explícitas de modelización.

Tabla 1. *Pares de coeficientes documentales utilizados en las simulaciones.*

Condición nominal	μ a 50 km/h	μ a 90 km/h
Seco, neumático nuevo	0,85	0,80
Mojado 0,2 mm, neumático nuevo	0,65	0,60
Lluvia 1 mm, neumático nuevo	0,55	0,30
Mojado 0,2 mm, neumático desgastado	0,50	0,20

Fuente: Elaboración propia.

Para un vehículo en descenso, se formuló un balance de fuerzas longitudinales sin arrastre aerodinámico ni transferencia dinámica de carga. La pendiente se representa mediante el ángulo θ y el coeficiente efectivo de fricción mediante μ(v). Las ecuaciones (1) y (2) expresan la evolución de la velocidad y el desplazamiento.

$$dv/dt = g\sin(\theta) - g\,\mu(v)\cos(\theta) \qquad (1)$$

$$dx/dt = v \qquad (2)$$

El modelo A adopta fricción constante evaluada a la velocidad inicial (ecuación 3). El modelo B calcula la distancia de frenado mediante integración de la desaceleración dependiente de la velocidad (ecuación 4). Ambas expresiones suponen desaceleración positiva durante todo el recorrido hasta la detención.

$$d_A = v_0^2 / \{2g[\mu(v_0)\cos(\theta) - \sin(\theta)]\} \qquad (3)$$

$$d_B = \int_0^{v_0} v/\{g[\mu(v)\cos(\theta) - \sin(\theta)]\}dv \qquad (4)$$

Entre 50 y 90 km/h, μ(v) se aproximó mediante interpolación lineal de cada par tabulado. Para velocidades inferiores a 50 km/h se contrastaron: (i) continuación constante en μ(50); (ii) extrapolación lineal con cota superior arbitrada de 0,95; y (iii) continuación exponencial hacia un valor límite supuesto, con escala de 25 km/h. Estas tres reglas son hipótesis de sensibilidad estructural, no tres modelos calibrados experimentalmente. Se evitó atribuir significado empírico al límite de 0,95 o a la escala exponencial. El modelo

dinámico se resolvió hasta velocidad nula. Para verificar la consistencia se confrontó la integración de las ecuaciones diferenciales ordinarias con la cuadratura independiente de la expresión integral en velocidad. El porcentaje de discrepancia del modelo A frente a cada variante B se definió como $E_{AB}=100|d_A-d_B|/d_B$. La sensibilidad a la continuación sub-50 km/h se cuantificó como $100[\max(d_B) - \min(d_B)]/d_B$, constante. Estas medidas reflejan diferencias de modelos, no errores frente a una distancia experimental verdadera. Las tablas de las etapas 3 y 4 y el código de simulación constituyen el respaldo reproducible del análisis.

No se modelaron maniobras de conducción, ABS en detalle, temperatura o desgaste dinámico del neumático, transferencia de carga, película de agua dependiente del perfil de pavimento ni condiciones locales instrumentadas. Los parámetros secundarios antiguos y las prolongaciones hipotéticas impiden inferir exactitud predictiva para vehículos particulares. El estudio debe presentarse como análisis de error de aproximación y sensibilidad estructural de los supuestos.

Resultados y Discusión

La comparación comprende 48 combinaciones de cuatro condiciones nominales de adherencia, cuatro pendientes y tres velocidades iniciales. En la continuación de fricción constante por debajo de 50 km/h, el modelo simplificado A y el modelo B coinciden cuando la velocidad inicial es de 50 km/h, porque ambos utilizan la misma adherencia durante toda la detención. Por ello, los 16 escenarios a 50 km/h muestran una discrepancia nula por construcción, no por validación experimental. Al incrementarse la velocidad inicial, el modelo A produjo distancias superiores a las del modelo B en los escenarios evaluados. El comportamiento se deriva de la forma elegida para μ(v): al disminuir la velocidad, aumenta el coeficiente interpolado hasta el correspondiente a 50 km/h. En consecuencia, la desaceleración del modelo B se incrementa respecto de la que el modelo A fija al inicio del frenado. Este resultado corresponde al conjunto de parámetros examinados y no establece que todos los neumáticos presenten idéntica dependencia de la velocidad.

Tabla 2. *Distancias de frenado y discrepancias del modelo simplificado para 90 km/h y descenso del 10 %.*

Condición	Modelo A (m)	Modelo B (m)	Diferencia (%)
Seco, neumático nuevo	45.73	43.82	4.38
Mojado, neumático nuevo	64.03	60.35	6.10
Lluvia intensa, neumático nuevo	160.07	96.49	65.89
Mojado, neumático desgastado	320.14	133.52	139.76
Nota: Modelo B: interpolación entre 50 y 90 km/h y continuación constante por debajo de 50 km/h. El porcentaje usa la distancia del modelo B como denominador.			

Fuente: Elaboración propia.

En el escenario de pavimento mojado con neumático desgastado, la distancia estimada por el modelo A fue de 320,14 m, frente a 133,52 m con el modelo B, lo que equivale a una discrepancia relativa de 139,76 %. Una diferencia tan amplia requiere cautela: el coeficiente inicial del modelo A es especialmente bajo, mientras que la continuación de fricción del modelo B aumenta la desaceleración a medida que cae la velocidad. No puede interpretarse esta discrepancia como un error observado en carretera ni como una tasa de error general de los modelos convencionales.

La segunda comparación mantuvo constantes las parejas tabuladas de fricción a 50 y 90 km/h, pero modificó la forma de continuar μ(v) hasta la detención. Las tres continuaciones

representan alternativas matemáticas no calibradas: constante, lineal acotada y exponencial. La diferencia máxima entre sus distancias cuantifica la sensibilidad del resultado a esta hipótesis y no constituye un intervalo estadístico de confianza.

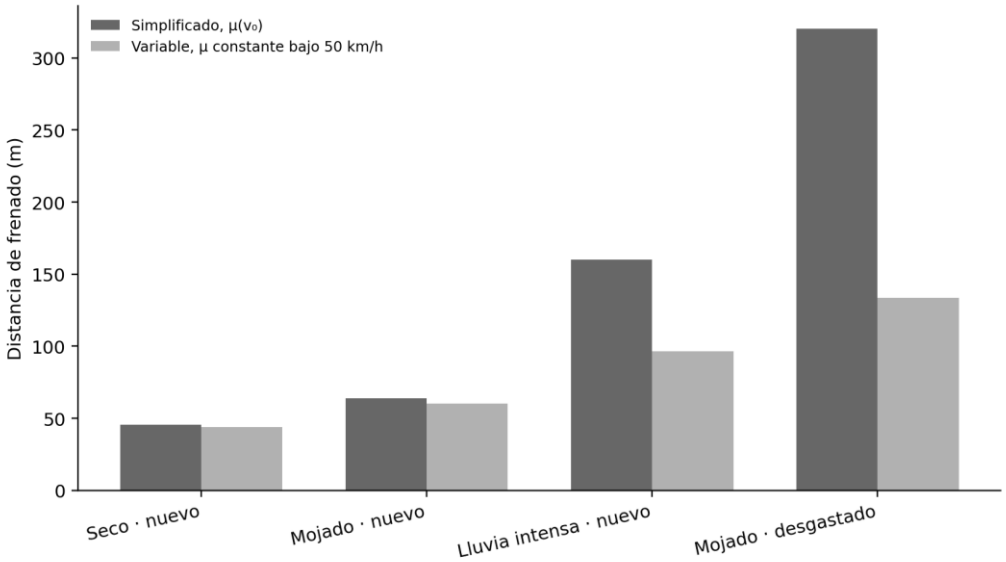


Figura 1. *Distancias de frenado de los modelos A y B a 90 km/h y pendiente descendente del 10 %.*

Fuente: Elaboración propia. Parámetros documentales y supuestos matemáticos, no mediciones de campo.

Tabla 3. *Sensibilidad máxima de la distancia del modelo B al tratamiento de la fricción bajo 50 km/h.*

Condición	Variación (%)	Velocidad (km/h)	Pendiente (%)
Seco, neumático nuevo	2.78	50	+10
Mojado, neumático nuevo	3.74	50	+10
Lluvia intensa, neumático nuevo	18.45	50	+10
Mojado, neumático desgastado	23.09	50	+10

Nota: Variación = 100 × (distancia máxima − distancia mínima) / distancia del modelo B con continuación constante. Se muestran los máximos entre los 12 escenarios de cada condición.

Fuente: Elaboración propia.

La variación máxima fue de 23,09 % en pavimento mojado con neumático desgastado, a 50 km/h y en descenso del 10 %. Este caso es particularmente esclarecedor: aunque A y B coinciden con la continuación constante a 50 km/h, las dos continuaciones alternativas producen distancias menores y ponen de manifiesto que el resultado depende de un tramo de velocidades sin información tabulada. En la condición de lluvia intensa con neumático nuevo, la variación máxima alcanzó 18,45 %. Las condiciones de mayor adherencia presentaron máximos inferiores a 4 %.

La máxima diferencia absoluta registrada entre la integración de la ecuación diferencial y una cuadratura independiente fue de $1{,}12 \times 10^{-8}$ m en los 48 escenarios de la etapa 3. Esta concordancia muestra consistencia de las soluciones bajo las mismas ecuaciones y parámetros. No cuantifica el error respecto de la distancia de frenado de un vehículo real, ni sustituye una evaluación formal de incertidumbre paramétrica o una validación con ensayos. Los hallazgos son compatibles, en términos generales, con la advertencia de Chen et al. (2026) acerca de las limitaciones de utilizar fricción constante en descensos. Sin embargo, ese trabajo combina resistencia al

deslizamiento, influencia de la película de agua y simulación del contacto neumático–pavimento; por tanto, no deben equipararse sus valores a nuestros porcentajes. Lorenčič (2023) aporta evidencia experimental de diferencias asociadas con neumáticos, superficie y sistema antibloqueo, mientras que Jiang et al. (2024) incorpora fenómenos de agua y ahuellamiento ausentes en nuestros modelos. Tales diferencias de alcance impiden una validación indirecta de las distancias simuladas. Los modelos de Cai et al. (2024) y Zhao et al. (2024) advierten sobre la importancia de la película de agua y la textura superficial, mientras que las observaciones experimentales de Lorenčič (2023) y los análisis de Genovese et al. (2025) muestran que las características de los neumáticos también modifican la adherencia.

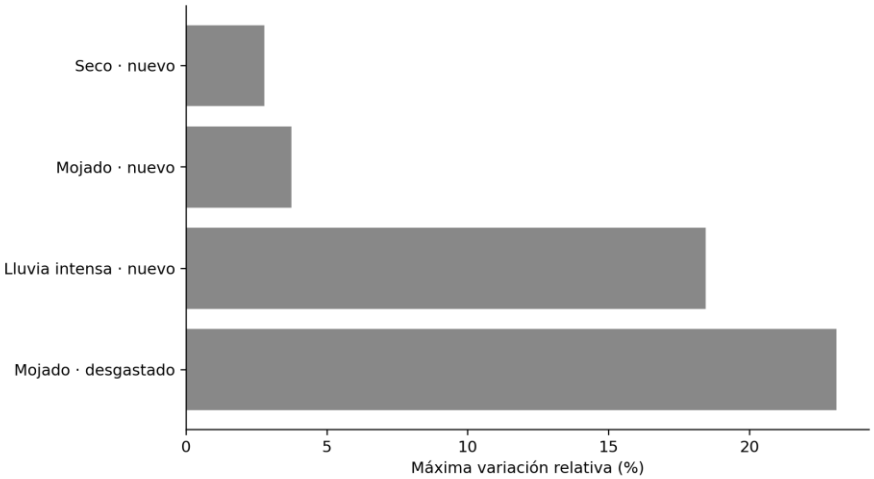


Figura 2. *Variación máxima de la distancia calculada con fricción variable según tres hipótesis de continuación bajo 50 km/h.*

Fuente: Elaboración propia. La gráfica representa sensibilidad estructural, no incertidumbre experimental.

Estas dependencias físicas no se representan explícitamente en las tres continuaciones hipotéticas utilizadas aquí. Desde una perspectiva mecánica y numérica, el resultado central no es que una técnica de integración sea superior a otra, sino que las simplificaciones del coeficiente de fricción y su extensión fuera del intervalo documentado pueden dominar las distancias estimadas. Esta conclusión se restringe a los modelos longitudinales, valores documentales y funciones propuestas; no autoriza extrapolaciones a pendientes, velocidades, neumáticos o sistemas de frenado no estudiados.La extrapolación lineal incluye una cota de 0,95 y la opción exponencial una escala de 25 km/h, ambas convenciones de sensibilidad. El modelo presupone frenado limitado por adherencia y no resuelve el deslizamiento de rueda, la transferencia de carga, la temperatura, la película de agua ni el control antibloqueo. Por ello, la investigación sustenta comparaciones entre supuestos matemáticos, no una determinación empírica de distancias reales ni recomendaciones operativas de velocidad segura

Conclusiones

La comparación de los modelos de frenado mostró que la representación de la fricción influye de manera decisiva en las distancias estimadas bajo los supuestos estudiados. En los

escenarios de velocidad inicial superior a 50 km/h, el modelo de fricción fija en la velocidad inicial produjo distancias mayores que el modelo de fricción dependiente de la velocidad. La discrepancia máxima fue de 139,76 % en el caso de pavimento mojado y neumático desgastado, con velocidad inicial de 90 km/h y pendiente descendente del 10 %. Este resultado es una discrepancia entre formulaciones y no un error de predicción contrastado con datos de carretera.

La continuación matemática de la fricción por debajo de 50 km/h, intervalo sin coeficientes tabulados en la fuente utilizada, modificó las distancias obtenidas con el modelo dinámico. La mayor variación relativa, de 23,09 %, se identificó en el escenario de neumático desgastado, velocidad inicial de 50 km/h y descenso del 10 %. Por consiguiente, la especificación de la función de fricción en intervalos sin datos constituye una condición relevante para interpretar y reproducir el cálculo.

La concordancia entre integración de ecuaciones diferenciales y cuadratura independiente demuestra consistencia numérica para los parámetros y supuestos evaluados, pero no acredita la validez física de las distancias estimadas. La comparación confirma la necesidad de distinguir el error atribuible a la simplificación del modelo de la incertidumbre derivada de parámetros incompletos y del error propio de la resolución numérica.

El alcance del estudio se limita a simulaciones deterministas de dinámica longitudinal y coeficientes documentales de procedencia secundaria. En consecuencia, los resultados permiten identificar escenarios sensibles a las hipótesis del modelo, pero no establecer distancias de frenado certificadas ni recomendaciones operativas para vehículos reales. Su contrastación con ensayos instrumentados y funciones de fricción calibradas representa la principal línea para ampliar la investigación.

Referencias Bibliográficas

Cabrera, J., Castillo, J., Pérez, J., Velasco, J., Guerra, A, & Hernández, P. (2018). A procedure for determining tire-road friction characteristics using a modification of the Magic Formula based on experimental results. Sensors, 18(3), 896. https://doi.org/10.3390/s18030896

Cai, J., Ong, G. P., Wu, D., Zhao, L., & Zhao, H. (2024). Assessing braking performance on wet-road through water-depth estimation and vehicle-pavement dynamic simulation. International Journal of Pavement Engineering, 25(1), 2421896. https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2421896

Chen, K., Chu, L., & Fwa, T. F. (2026). Improved method for determination of braking distance on downgrade pavement slope. Road Materials and Pavement Design. https://doi.org/10.1080/14680629.2026.2628867

Deng, T., Wang, S., Cheng, D., Zheng, L., & Ren, L. (2025). Effects of driving conditions on tire hydroplaning performance. Lubricants, 13(2), 76. https://doi.org/10.3390/lubricants13020076

Dimitrakopoulos, G., Politi, E., Karathanasopoulou, K., Panagiotopoulos, E., & Zographos, T. (2022). Cognitive risk-assessment and decision-making framework for increasing in-vehicle intelligence. Journal of Sensor and Actuator Networks, 11(4), 72. https://doi.org/10.3390/jsan11040072

Ekpo, A, & Obinna, U. (2025). Mathematical modelling of road gradient effects on vehicle braking efficiency. FNAS Journal of Mathematical Modeling and Numerical Simulation, 2(4), 1–7. https://doi.org/10.63561/jmns.v2i4.1118

Genovese, A., Ruffini, M., Ciampi, G., Re, F., & Broggi, D. (2025). Enhancing wet braking performance: The impact of tire tread material viscoelastic properties and the influence of tread wear. Vehicle System Dynamics. https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2598002

Guo, J., Li, B., Bei, S., Yin, G., Zhang, L., Meng, F., Hu, S., Daoud, W., & Hu, M. (2025). An algorithm for estimating the ultimate speed of vehicles on wet roads. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 239(7), 2535–2550. https://doi.org/10.1177/09544070241240807

Jiang, J., Ketabdari, M., Crispino, M., & Toraldo, E. (2024). Estimating vehicle braking distance over wet and rutted pavement surface through back-propagation neural network. Results in Engineering, 21, 101686. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101686

Karpenko, M., Skačkauskas, P., Mejeras, G., Delembovskyi, M., & Stosiak, M. (2026). Effects of tire dynamics on vehicle safety: A simulation-driven comparison of new and service-aged tires under variable inflation pressures and loads. Machines, 14(9), 1002. https://doi.org/10.3390/machines14091002

Karyotakis, E., Jonasson, M., Yang, D., & Sjöberg, J. (2026). Minimum stopping distance on split friction roads via joint control of steering and individual wheel braking. Vehicle System Dynamics. https://doi.org/10.1080/00423114.2026.2630033

Lin, F., Zhao, Y., Chen, P., Chen, G., Hou, K., Zou, Y., Zhang, D., Huang, L., Tang, B., Li, C., & Zhan, Y. (2026). Simulation study on rainy driving safety considering tire-road adhesion. Intelligent Transportation Infrastructure, 5, liag009. https://doi.org/10.1093/iti/liag009

Lorenčič, V. (2023). The effect of tire age and anti-lock braking system on the coefficient of friction and braking distance. Sustainability, 15(8), 6945. https://doi.org/10.3390/su15086945

Xu, Y., Luo, Y., Xu, Y., Han, L., Zhao, Y., & Guo, R. (2026). CarSim-based stopping distance model for snow-and-ice roads: Critical speed limits on ice and packed snow. Construction and Building Materials, Article 147733. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147733

Zhao, L., Zhao, H., & Cai, J. (2024). Tire-pavement friction modeling considering pavement texture and water film. International Journal of Transportation Science and Technology, 14, 99–109. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.04.001.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Gabriel Vicente Macas Pisco, Fabián Eduardo Vilema Chuiza, Silvia Valeria Castelo Quinde y Edwin Anibal Pilamunga Agualongo.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo
Contribución de los autores (Taxonomía CRediT). Gabriel Vicente Macas Pisco: Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Redacción – borrador original, Supervisión. Fabián Eduardo Vilema Chuiza: Software, Validación, Análisis formal, Visualización, Curación de datos. Silvia Valeria Castelo Quinde: Investigación, Curación de datos, Metodología, Validación, Redacción – revisión y edición. Edwin Anibal Pilamunga Agualongo: Investigación, Análisis formal, Visualización, Redacción – revisión y edición, Administración del proyecto.
Declaración de conflicto de intereses Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.
Declaración de financiamiento La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.
Declaración del editor El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.
Declaración de los revisores Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.
Declaración ética de la investigación Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.
Declaración sobre el uso de inteligencia artificial Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.
Disponibilidad de datos Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.