


Rampas de Escape para Camiones en Carreteras: Un Nuevo Procedimiento para Justificar su Necesidad y Estimar su Ubicación

García-Ramírez, Yasmany^{1,*} 

¹Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ingeniería Civil, Loja, Ecuador

Resumen: Los conductores de camiones en pendientes descendentes pronunciadas pueden perder el control del vehículo por sobrecalentamiento del sistema de frenos. Ante esta posibilidad, las rampas de escape para camiones ayudan a detener esos vehículos errantes, reduciendo la fatalidad y daños materiales. La AASHTO presenta recomendaciones sin mostrar un procedimiento analítico para justificar su necesidad o estimar su ubicación. En Chile, se propuso un procedimiento, sin embargo, tiene ciertas limitaciones de aplicación y actualización; por lo tanto, el objetivo de este estudio es proponer un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y estimar su ubicación. Este procedimiento incluye las recientes actualizaciones del Sistema de Calificación de Peligrosidad de la Pendiente (GSRs por sus siglas en inglés). El sistema GSRs permite estimar la velocidad máxima de descenso seguro en una pendiente en descenso. Se explica el nuevo procedimiento mediante un ejemplo detallado de cálculo. El procedimiento propuesto resuelve las limitaciones del propuesto en Chile y completa las recomendaciones dadas por la AASHTO. Además, ofrece una base teórica, de fácil aplicación, para países en donde aún no se han construido este tipo de infraestructuras.

Palabras clave: rampas de escape para camiones, GSRs, necesidad y ubicación, nuevo procedimiento.

Truck Escape Ramps in Roads: A New Procedure to Justify its Need and Estimate its Location

Abstract: Truck drivers on steep downgrades can lose control of the vehicle from overheating the brake system. Given this possibility, truck escape ramps stop those errant vehicles, reducing fatality and property damage. The AASHTO makes recommendations without showing an analytical procedure to justify their need or estimate their location. In Chile, a method that tries to cover that gap has limited application and updating concerns. Therefore, this study proposes a new procedure to justify the truck escape ramps on roads and estimate their location. This procedure includes the recent updates in the Grade Severity Rating System (GSRs). The GSRs system allows estimating the maximum safe speed on downgrades. A detailed calculation example was employed to explain the new procedure. The proposed procedure solves the limitations of the proposal of Chile and completes the recommendations given by the AASHTO. In addition, it offers a theoretical basis, easy to apply, for countries where this type of infrastructure has not been built yet.

Keywords: truck escape ramp, GSRs, need and location, new procedure.

1. INTRODUCCIÓN

En carreteras, en pendientes descendentes pronunciadas, los vehículos, principalmente camiones, pueden perder su capacidad de frenado por el sobrecalentamiento de los frenos. Esta fatiga térmica se debe a fallas mecánicas o por el uso inadecuado del sistema de frenos. Esta reducción en la capacidad del frenado puede llevar a que el conductor pierda el control del vehículo. Para reducir la velocidad del vehículo sin control y alejarlo de la corriente principal del tránsito se construyen las rampas de escape para camiones.

Las rampas de escape han permitido salvar vidas y reducir los daños materiales (Bowman & Coleman, 1990). Esto se debe a que principalmente en la rampa, se desarrollan tasas de desaceleración aceptables y permiten que el conductor tenga el control adecuado sobre el vehículo dentro de ella (Witthof, 1992). También, mejora la seguridad del resto de usuarios viales, dado que el vehículo errante se detiene fuera del flujo vehicular. La señalización anticipada y antes del ingreso a la rampa debe realizarse en base al MUTCD (FHWA, 2009), permite avisar a los conductores acerca de su presencia. Hay tres categorías de las rampas de escape para camiones, basados en la forma de detención del camión: gravedad, pila de arena y lecho de frenado. El más utilizado y extendido la

*ydgarcia1@utpl.edu.ec

Recibido: 10/05/2021

Aceptado: 22/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.02

CC 4.0

rampa con el lecho de frenado, cuyo esquema típico se muestra en la Figura 1. Esta rampa consta principalmente de un ingreso pavimentado, el lecho de frenado, y en algunos casos, amortiguadores de choque. El vehículo queda atrapado en los áridos debido a la fricción que tienen con los neumáticos. La vía de servicio y los puntos de anclaje permite acceder y anclar la grúa para remover los vehículos que quedan atrapados en la rampa.

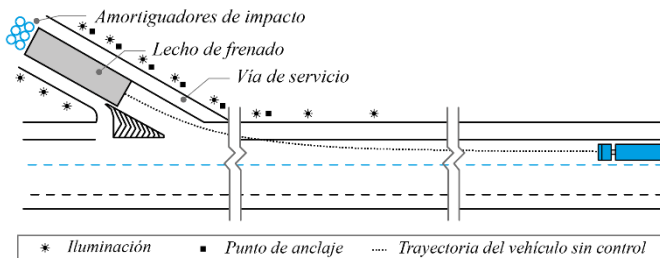


Figura 1. Esquema típico de la rampa de escape para camiones

El lecho de frenado es el más utilizado en Latinoamérica: Chile (MOP, 2019), Argentina (Espinoza et al., 2016) o Brasil (Moreira, 2011; Zanoli, 2003), por citar algunos ejemplos. A pesar de sus buenos resultados, otros países de la región no los han usado, por ejemplo, en Ecuador no se conoce que se haya hecho este tipo de intervención. El diseño del lecho de frenado está ampliamente explicado por el *Green Book* (AASHTO, 2011), y soportado por diversos estudios (por ejemplo: Valdes et al., 2018). En cuanto a la justificación de la necesidad y localización de la rampa, la AASHTO sólo presenta algunas recomendaciones.

La AASHTO (2011) menciona que es necesaria una rampa de escape cuando existan registros o indicios de que se están produciendo siniestros relacionados con el sobrecalentamiento del sistema de frenos. También, recomienda que se deben construir en alineamientos rectos de la carretera y antes de curvas circulares para evitar que el vehículo sin control negocie con ellas. Así mismo, se debe ubicar antes de áreas pobladas y que se deben colocar al lado derecho de la calzada. La AASHTO también menciona que se puede utilizar el GSRS o *Grade Severity Rating System* (FHWA, 1989) como complemento a estas recomendaciones. Sin embargo, la AASHTO no presenta procedimientos analíticos para determinar la necesidad y ubicación de la rampa.

Uno de los primeros intentos en proveer un procedimiento de cálculo es el propuesto en Chile (Echaveguren et al., 2007). Esta metodología usa el GSRS (FHWA, 1989) para determinar la necesidad y localización de la rampa de escape. Para justificar su necesidad, analiza la velocidad máxima de descenso seguro con el GSRS y la compara con la velocidad de operación de los vehículos. Cuando ésta última es mayor, existe la posibilidad de que se produzca una falla de frenos, por lo que justifica colocar una rampa. Propone ábacos para pesos de vehículos entre 30 a 40 Ton y 40 a 45 Ton. En estas gráficas, se puede emplear para estimar la velocidad máxima de descenso seguro y para determinar en dónde se debe ubicar la rampa (utilizando la velocidad de operación). A pesar de su base racional y fácil aplicación, este procedimiento presenta algunos inconvenientes: a) solo son aplicables para el rango de pesos con el que fueron desarrollados, b) solo son aplicables

para una pendiente simple, es decir, una pendiente compuesta por 2 o más valores de inclinación, no se pueden utilizar directamente, y c) el GSRS tuvo una actualización reciente (Moomen & Ksaibati, 2020), debido a las mejoras realizadas a los camiones que circulan en la actualidad. Se perfeccionó este procedimiento chileno por dos investigadores (Echaveguren & Vargas, 2013), sin embargo, fue publicada en el año 2013, donde no hubo la actualización mencionada.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es proponer un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y determinar su ubicación. Se utiliza el nuevo modelo GSRS para proponer el nuevo procedimiento analítico. Este procedimiento se complementa con un ejemplo de aplicación detallado. Este nuevo procedimiento resuelve las limitaciones del procedimiento propuesto en Chile y completa lo desarrollado por la AASHTO. Además, sirve como una base teórica y de fácil aplicación para países en donde aún no se han construido este tipo de infraestructura.

2. SISTEMA DE CALIFICACIÓN DE PELIGROSIDAD DE LA PENDIENTE (GSRS)

El GSRS fue desarrollado en 1974 por la FHWA (FHWA, 1989). Tuvo una actualización en el 2006 con respecto a la difusividad del sistema de frenado (Ruhl et al., 2006). Sin embargo, ante las mejoras que han existido en los camiones actuales hay una nueva actualización del sistema GSRS (Moomen & Ksaibati, 2020). El principio original no ha cambiado, pero se han actualizado algunas constantes del modelo.

El modelo considera el peso bruto del camión junto a su rendimiento, el porcentaje de descenso de pendiente y la longitud de frenado del camión para recomendar velocidades de descenso seguras. El GSRS asume una velocidad de descenso constante, la potencia de retardo del motor se mantiene cerca del máximo permitido para el motor, y la presencia de un camión de cinco ejes, como vehículo tipo. En la actualización, este vehículo es un modelo Kenworth T680 Series (2016), cuyo peso bruto es de 36287 kg. El GSRS se basa la temperatura de frenado, tal como se muestra en la ecuación (1):

$$T_f = T_0 + [T_\infty - T_0 + K_2 HP_B] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L}{v}} \right] \quad (1)$$

Donde:

T_f = temperatura del sistema de frenos en la parte inferior de la pendiente, producto de circular por ella a una velocidad constante (°F),

T_0 = temperatura inicial del freno (150 °F),

T_∞ = temperatura ambiente, cuando no se tiene valores medidos se puede usar 90 °F,

K_1 = constante de calibración por difusividad, calculada con la ecuación (4) (h^{-1})

K_2 = constante de calibración por transferencia de calor, estimada con la ecuación (5) (°F/hp)

HP_B = potencia del sistema de frenos calculada según la

ecuación (6) (hp),

L = longitud de la pendiente (mi), y

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h).

El modelo GSRS fue modificado para asegurar que quedara suficiente capacidad de frenado para permitir una parada de emergencia al final de la pendiente sin exceder una temperatura máxima de 500 °F. La máxima temperatura permitida se obtiene con la ecuación (2).

$$T_{\text{lím}} = T_f + T_E \quad (2)$$

Donde

$T_{\text{lím}}$ = máxima temperatura del sistema de frenos, la cual no debe exceder de 500 °F (°F),

T_f = aumento de temperatura debido al descenso de la pendiente (°F), y

T_E = aumento de temperatura debido a una parada de emergencia, la cual se calcula con la ecuación (3) (° F).

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times W \times V^2 \quad (3)$$

Donde

W = peso bruto del vehículo (lb), y

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h).

La difusividad (K_1) y el parámetro de transferencia de calor (K_2) se calcula mediante la ecuación (4) y (5) respectivamente, cuyas variables ya fueron definidas previamente.

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 V) \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 V} \quad (5)$$

La potencia del sistema de frenos (HP_B) se calcula con la ecuación (6). Dentro de esta ecuación se necesita la fuerza de arrastre que se calcula con la ecuación (7).

$$HP_B = \left(W \theta - F_{\text{drag}} \right) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}} \quad (6)$$

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 V^2 \quad (7)$$

Donde

W = peso bruto del vehículo (lb),

θ = inclinación de la pendiente (decimal),

F_{drag} = fuerza de arrastre (lb),

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h), y

HP_{eng} = potencia de frenado del motor igual a 63,3 hp.

El modelo de la ecuación (1) permite encontrar la velocidad máxima segura para descender una pendiente cuidando de que el $T_{\text{lím}}$ no exceda de los 500 °F. Para ello, se puede despejar esa ecuación o se puede resolver por tanteos.

En lo que se refiere a la potencia de frenado del motor HP_{eng} , la condición base es que no tiene retardadores, si el retardador del camión está a la mitad, entonces $HP_{\text{eng}} = 238$ hp, mientras que, si la aplicación es completa, entonces, $HP_{\text{eng}} = 502$ hp. Los retardadores son frenos auxiliares que ayudan a que los frenos de servicio absorban los hp de frenado requeridos.

Existe un aumento considerable de camiones que lo poseen debido a la seguridad que proveen y el ahorro en los costos de uso y mantenimiento del sistema de frenos. Sin embargo, la condición base es que el vehículo pesado no tenga retardadores, y es el caso más desfavorable y adecuado para el parque automotor de la mayoría de países de Latinoamérica.

3. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

El GSRS al ser un modelo que incluye principalmente la velocidad y la temperatura del sistema de frenos, éste se puede utilizar como medio para estimar la necesidad y ubicación de las rampas de escape. Es así, que en 6 pasos se podría calcular la necesidad, ubicación de la rampa y en el último paso determinar longitud del lecho de frenado. A pesar de que se explique el último paso, no se entrará en mayores detalles, dado que es algo común y aceptado con la comunidad científica.

3.1 Paso 1: analizar la necesidad de la rampa de escape

En primer lugar, se calcula la velocidad máxima para un descenso seguro utilizando el procedimiento descrito en el GSRS. Se realizan tanteos, imponiéndose velocidades, hasta que se acerque a la temperatura límite de 500 °F. En ningún caso, se puede exceder esa temperatura, ya que, si sucede eso, significa una alta probabilidad de sobrecalentamiento y su consecuente pérdida de control.

Una vez que se haya determinado esa velocidad de descenso seguro, se debe medir (en carreteras construidas) o estimar (en proyectos) la velocidad de operación. Para el segundo caso, cada país o región tiene sus modelos desarrollados, por ejemplo, para Ecuador, se pueden utilizar las ecuaciones de predicción en carreteras de dos carriles (García-Ramírez & Alverca, 2019), tal como se muestra en la Tabla 1.

Aunque, las ecuaciones de la Tabla 1 fueron desarrollados para entretangencias horizontales, se las puede adoptar debido a que los tramos en el GSRS son entretangencias verticales, y por lo tanto son similares desde el punto de vista geométrico. Ante esta analogía, el valor de L , en las ecuaciones de la Tabla 1, será la longitud del tramo en análisis. Así mismo, los valores obtenidos son aplicables para vehículos livianos, por lo que se los puede transformar utilizando el procedimiento descrito en el MUTCD (FHWA, 2009) para determinar la velocidad recomendada en curvas. Para ello, la velocidad de operación de vehículos livianos se debe multiplicar por 0,97 y sumarle 1 mi/h.

Tabla 1. Ecuaciones calibradas de predicción de la velocidad de operación en entre-tangencias horizontales

G (%)	Ecuación de predicción	R ²	Rango de L (m)
6 a 10 %	$V_{t_{85}} = 69,69$	*	22 - 260
4 a 5,99%	$V_{t_{85}} = 0,03L + 69,52$	0,29	22 - 392
0 a 3,99%	$V_{t_{85}} = 0,04L + 73,69$	0,37	22 - 435
-3,99 a 0%	$V_{t_{85}} = 0,05L + 73,65$	0,50	22 - 435
-5,99 a -4%	$V_{t_{85}} = 0,04L + 72,68$	0,47	22 - 392
-10 a -6%	$V_{t_{85}} = 0,07L + 66,09$	0,41	22 - 433

$V_{t_{85}}$ = velocidad de operación en la entre-tangencia horizontal en km/h, G = pendiente longitudinal de la carretera, L = longitud de la entre-tangencia horizontal, * = no es posible de calcular dado que es una ecuación constante, R² = coeficiente de determinación, N° = número de ecuación.

Ahora bien, para determinar si se necesita o no de una rampa de escape, se compara las velocidades obtenidas. Si la velocidad de operación es mayor a la velocidad máxima para un descenso seguro, entonces, se requiere la construcción de una rampa de escape. En pendientes compuestas (2 o más pendientes) es necesario analizar esta diferencia en cada tramo.

3.2 Paso 2: estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F

Una vez que se haya determinado que se necesita la rampa de escape, entonces, se debe estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F. Para ello, se utiliza el mismo modelo GSRS, sin embargo, se ingresa con una velocidad conocida, que corresponde a la velocidad de operación. En primer lugar, se detecta el tramo en donde, con la velocidad de operación, el sistema de frenos excede de la temperatura de 500 °F (tramo i). En ese tramo, se procede a calcular la distancia a la que se alcanza esa temperatura. Utilizando el modelo GSRS y con retro-cálculo se obtiene esa distancia, de la siguiente manera:

En la ecuación (2), utilizando una temperatura al final de ese tramo igual a 500 °F, se puede reescribir como:

$$T_{f,ti} = 500 - T_{E,ti} \quad (8)$$

Donde

$T_{f,ti}$ = aumento de temperatura debido al descenso de la pendiente en el tramo i (°F), y

$T_{E,ti}$ = aumento de temperatura debido a una parada de emergencia en el tramo i (°F).

Por otra parte, la ecuación (1) se puede escribir como:

$$T_{f,ti} = T_{0,ti-1} + [T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}] \left[1 - e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}} \right] \quad (9)$$

Donde

$T_{0,ti-1}$ = temperatura inicial del freno en el tramo i-1. Si existe un solo tramo en la pendiente o en el primer tramo se excede de los 500 °F utilizar $T_{0,ti-1} = T_0$ (°F),

T_{∞} = temperatura ambiente (90 °F),

$K_{1,ti}$ = constante de calibración por difusividad en el tramo i (h⁻¹),

$K_{2,ti}$ = constante de calibración por transferencia de calor en el tramo i (°F/hp),

$HP_{B,ti}$ = potencia del sistema de frenos calculada en el tramo i (hp),

$L_{500,ti}$ = longitud del tramo i en donde se alcanza la temperatura de 500° F (mi), y

$V_{85,ti}$ = velocidad de operación en el tramo i (mi/h).

La ecuación (9) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} - 1 = -e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}}$$

Que es lo mismo que:

$$e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}} = 1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}}$$

Aplicando el logaritmo natural se tiene:

$$-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}} = \ln \left(1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} \right)$$

Despejando $L_{500,ti}$ quedaría la ecuación (10), cuyas variables fueron previamente definidas.

$$L_{500,ti} = -\frac{V_{85,ti}}{K_{1,ti}} \ln \left(1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} \right) \quad (10)$$

Por seguridad, la $L_{500,ti}$ se puede redondear hacia abajo. Esta longitud sería el valor teórico en donde se sobrecalientan el sistema de frenos. Esta distancia se puede referenciar desde el inicio de la pendiente de descenso en el caso de que se exceda de la temperatura límite sea excedida a partir del segundo tramo.

3.3 Paso 3: estimar el punto en donde el conductor es consciente de la situación y está en capacidad de decidir el uso la rampa

En el paso anterior, se estimó la longitud en donde el conductor podría perder el control del vehículo a causa del sobrecalentamiento de los frenos. En ese instante, no necesita inmediatamente la rampa, dado que el conductor necesita tiempo para entender la situación y tiempo para decidirse a utilizar la rampa. Durante ese tiempo, el camión sin control se desplazará una cierta distancia a lo largo de la carretera hasta tomar la decisión de ingresar a la rampa. Por lo tanto, el objetivo de este paso es determinar esa longitud. Esta distancia se puede obtener mediante el tiempo de percepción y reacción más la distancia de decisión. El tiempo de percepción y reacción, acorde a la AASHTO (2011), es de 2,5 s y que abarca a la mayoría de conductores. Entonces, esta distancia se obtiene con la velocidad de operación del tramo y ese tiempo (ver ecuación 11), en donde los 3600 permite transformar los segundos a horas:

$$d_{pr} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,ti} \quad (11)$$

Donde:

dpr = distancia en donde el conductor es consciente de que el camión ha perdido la capacidad de frenado (mi), y,
 $V_{85,ti}$ = velocidad de operación del tramo i.

Por otro lado, la distancia de visibilidad de decisión es aquella distancia para seleccionar una velocidad y una trayectoria adecuadas e iniciar y maniobras complejas, tal como, utilizar la rampa de escape, dado que pueden involucrar daños materiales y una mayor exposición del conductor a lesiones. Acorde a la AASHTO (2011), se puede asumir que esta maniobra corresponde a una maniobra tipo C, D o E. La maniobra de evasión C corresponde al cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera rural (t varía entre 10,2 y 11,2 s). La maniobra de evasión D incluye el cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera suburbana (t varía entre 12,1 y 12,9 s) y la maniobra de evasión E corresponde al cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera urbana (t varía entre 14,0 y 14,5 s). La distancia de visibilidad de decisión se calcula con la ecuación (12).

$$DSD = \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,ti})(t) \quad (12)$$

Donde:

DSD = distancia de visibilidad de decisión en la cual, el conductor toma la decisión de utilizar la rampa de escape (mi),

$V_{85,ti}$ = velocidad de operación del tramo i, y,

t = tiempo total para realizar la maniobra hasta ingresar a la rampa de escape (s), el cual depende de la maniobra.

Por lo tanto, la distancia de decisión para el uso de la rampa de escape (DD_{re}) es la suma de las dos distancias anteriores, tal como se muestra en la ecuación (13), cuyas variables ya fueron definidas previamente.

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,ti} + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,ti})(t) \quad (13)$$

3.4 Paso 4: estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h

Para ello, se puede utilizar la velocidad de ingreso de la rampa como velocidad de referencia para calcular esa longitud. Esa velocidad es igual a 80 mi/h (≈ 130 km/h). Con este supuesto, se presentan dos casos:

Caso 1: la longitud del tramo en donde se excede los 500 °F es suficientemente larga para alcanzar la velocidad de 80 mi/h. En este escenario, se requiere calcular el desnivel para alcanzar esa velocidad, para ello se puede utilizar la ecuación (14) despejada de los principios de la cinemática:

$$h_{ti} = \frac{V_{80}^2 - V_{0,ti}^2}{2g} \quad (14)$$

Donde

h_{ti} = desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h en el tramo i (mi),

V_{80} = velocidad final del tramo i igual a 80 mi/h - (mi/h),

$V_{0,ti}$ = velocidad de operación inicial del tramo i (mi/h),

g = aceleración de la gravedad igual a 78919,11 (mi/h²).

Entonces, la longitud en donde se alcanza la velocidad de 80 mi/h se calcula de con la ecuación (15):

$$L_{80,ti} = (L_{ti} - L_{500,ti}) \left(\frac{h_{ti}}{i_{ti}} \right) \quad (15)$$

Donde

$L_{80,ti}$ = longitud para alcanzar la velocidad de 80 mi/h (mi),

L_{ti} = longitud total del tramo i (mi),

$L_{500,ti}$ = longitud del tramo i en donde se alcanza la temperatura de 500° F (mi),

h_{ti} = desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h (mi), y,

i_{ti} = pendiente del tramo i (decimal).

Caso 2: la longitud del tramo en donde se excede los 500 °F no es suficientemente larga para alcanzar la velocidad de 80 mi/h. En esta situación, la longitud, restante del tramo, no es suficiente para alcanzar la velocidad de 80 mi/h, por lo que se alcanzará en el siguiente o siguientes tramos. Entonces, lo primero que hay que determinar es la velocidad que el camión alcanzará al final de tramo, para ello se utiliza la misma ecuación (14) en donde se despeja la velocidad final, tal como se ve en la ecuación (16).

$$V_{f,ti} = \sqrt{V_{0,ti}^2 + 2gh_{ti}} \quad (16)$$

Donde

$V_{f,ti}$ = velocidad al final del tramo i (mi/h),

$V_{0,ti}$ = velocidad de operación inicial del tramo i (mi/h),

g = aceleración de la gravedad igual a 78919,11 (mi/h²), y,

h_{ti} = desnivel en el tramo i (mi), que se calcula mediante la ecuación (17).

$$h_{ti} = i_{ti} (L_{ti}) \quad (17)$$

Donde

i_{ti} = pendiente del tramo i (decimal), y

L_{ti} = longitud total del tramo i (mi).

Si en el próximo tramo aún no es posible de alcanzar la velocidad de 80 mi/h, entonces se debe repetir el cálculo con la ecuación (16) hasta encontrar un tramo en donde se alcance esa velocidad. Cuando suceda esto, en ese tramo, se debe seguir el procedimiento descrito en el caso 1.

3.5 Paso 5: determinar la localización de la rampa de escape

En los dos pasos anteriores, se estimaron los puntos de la pendiente en descenso en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F y el punto en donde el vehículo sin control alcanza la velocidad de 80 mi/h. La rampa de escape para camiones se deberá colocar entre esos dos puntos. La ubicación exacta dependerá de si existen algunas curvas complicadas de maniobrar, alguna población cercana o la topografía permite colocar la rampa, tal como se menciona en las recomendaciones de la AASHTO (2011).

3.6 Paso 6: estimar las dimensiones del lecho de frenado

Para la estimación de las dimensiones de la rampa de escape (AASHTO, 2011), se utiliza una velocidad de ingreso a la rampa de 80 mi/h (preferentemente 90 mi/h). También se toma en cuenta, el material que se va a colocar en la rampa, lo cual determina la resistencia al rodamiento (R). Hay que también considerar si el lecho de frenado tiene una sola pendiente o es compuesta, lo cual afecta a la dimensión del lecho.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Analizar la necesidad y ubicación de una rampa de escape en una carretera rural si la pendiente en descenso está compuesta por tres tramos: 9,5 % (1,05-mi), 5,5 % (2,34-mi) y 3,0 % (7,75-mi). Considerar un camión de 45 toneladas de peso bruto, como vehículo de diseño.

4.1 Paso 1: analizar la necesidad de la rampa de escape

Para valorar la necesidad de la rampa de escape, se necesita comparar la velocidad máxima de descenso seguro con la velocidad de operación del camión de diseño. Antes de la estimación de la velocidad máxima para un descenso seguro se deben obtener algunos resultados previos. La difusividad (K_1) y el parámetro de transferencia de calor (K_2) se calcula mediante las ecuaciones (4) y (5), respectivamente. Dada la complejidad de la ecuación principal del GRSR, el cálculo de la velocidad máxima se puede realizar mediante tanteos. El primer cálculo se realizará con una velocidad de 20 mi/h.

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 V)$$

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 \times 20) = 2,771 \text{ h}^{-1}$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 V}$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 \times 20} = 3,163 \text{ }^\circ\text{F/hp}$$

También se debe calcular las fuerzas de arrastre con la ecuación (7):

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 V^2$$

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 (20)^2 = 512,150 \text{ lb}$$

Con este resultado y la ecuación (6) se calcula la potencia del sistema de frenos para cada pendiente:

$$HP_{B,t1} = (W\theta_{t1} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t1} = (99208 (0,095) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t1} = 412,039 \text{ hp}$$

$$HP_{B,t2} = (W\theta_{t2} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t2} = (99208 (0,055) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t2} = 200,395 \text{ hp}$$

$$HP_{B,t3} = (W\theta_{t3} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t3} = (99208 (0,030) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t3} = 68,118 \text{ hp}$$

Entonces, la temperatura de frenado en cada pendiente se obtiene con la ecuación (1). Para la primera pendiente, se ingresa con una temperatura inicial de 150 ° F, luego, la temperatura límite de esa pendiente (ecuación 2) sería la temperatura inicial de la siguiente pendiente, y así sucesivamente. Para el cálculo de la $T_{\text{lím}}$, se debe calcular aumento de temperatura debido a una parada de emergencia (TE) utilizando la ecuación (3):

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times W \times V^2$$

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times 99208 \times (20)^2 = 12,341 \text{ }^\circ\text{F}$$

Entonces, la temperatura límite del sistema de frenos al final del tramo 1 es:

$$T_{f,t1} = T_{0,t1} + [T_\infty - T_{0,t1} + K_2 HP_{B,t1}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t1}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t1} = 150 + [90 - 150 + 3,163 (412,039)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 1,05}{20}} \right]$$

$$T_{f,t1} = 318,292 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{lím},t1} = T_{f,t1} + T_E = 318,292 + 12,341 = 330,634 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{lím},t1} = T_{0,t2}$$

Para el tramo 2 se tiene:

$$T_{f,t2} = T_{0,t2} + [T_\infty - T_{0,t2} + K_2 HP_{B,t2}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t2}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t2} = 330,634 + [90 - 330,634 + 3,163 (200,395)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 2,34}{20}} \right] = 439,484 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{lím},t2} = T_{f,t2} + T_E = 439,484 + 12,341 = 451,826 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{lím},t2} = T_{0,t3}$$

Y para el tramo 3:

$$T_{f,t3} = T_{0,t3} + [T_\infty - T_{0,t3} + K_2 HP_{B,t3}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t3}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t3} = 451,826 + [90 - 451,826 + 3,163 (68,118)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 7,75}{20}} \right] = 355,459 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{lím},t3} = T_{f,t3} + T_E = 355,459 + 12,341 = 367,800 \text{ }^\circ\text{F}$$

El valor de $T_{\text{lím},t3}$ sería la temperatura final al terminar de descender por la pendiente con una velocidad constante de 20 mi/h. Este valor es menor que los 500 °F que se tiene como límite. Entonces, se debe realizar nuevos tanteos con velocidades más altas. En la Tabla 2, se muestran los cálculos con 25 mi/h y 30 mi/h siguiendo el procedimiento anterior. Para estos tanteos, el peso bruto del vehículo, la temperatura inicial de la primera pendiente, las pendientes y sus longitudes tienen el mismo valor que en el tanteo inicial.

Tabla 2. Resultados de los tanteos para estimar la velocidad máxima de descenso segura

N°	V (mi/h)	T ₀ (°F)	HP _B (hp)	T _f (°F)	T _{lim} (°F)
1	25	150,000	528,894	320,180	339,464
2	25	339,464	264,339	461,251	480,534
3	25	480,534	98,993	412,562	431,846
1	30	150,000	644,429	320,169	347,937
2	30	347,937	326,963	476,505	504,274
3	30	504,274	128,547	454,009	481,778

Los valores que cambian son: con una velocidad de 25 mi/h, el $K_1 = 3,019 \text{ h}^{-1}$, $K_2 = 2,815 \text{ °F/hp}$, $F_{\text{drag}} = 541,850 \text{ lb}$ y $T_E = 19,284 \text{ °F}$, mientras que, con una velocidad de 30 mi/h, se tiene un $K_1 = 3,267 \text{ h}^{-1}$, $K_2 = 2,537 \text{ °F/hp}$, $F_{\text{drag}} = 578,150 \text{ lb}$ y $T_E = 27,768 \text{ °F}$.

En la Tabla 2 se puede ver, que para 25 mi/h la temperatura del sistema de frenos al final de las tres pendientes es de 431,846 °F, mientras que para 30 mi/h la temperatura es de 481,778 °F. A pesar, de que ambos tanteos no exceden con la temperatura límite al final de la pendiente en descenso, uno de los tramos intermedios con la velocidad de 30 mi/h si lo hace. En este caso, y por seguridad, la velocidad máxima para un descenso seguro será de 25 mi/h, dado que, si se elige 30 mi/h, se corre el riesgo de pérdida de control en el segundo tramo. El tiempo que el vehículo se demorará en llegar al final de la pendiente con una velocidad constante de 25 mi/h, será de 26,74 min que se obtiene de la ecuación de la cinemática: $(1,05 + 2,34 + 7,75) \times 60/25$. Cabe mencionar que si el conductor de este vehículo circula a una velocidad no mayor de 25 mi/h $\approx 40 \text{ km/h}$, no tendrá sobrecalentamiento de los frenos y evitará la pérdida del control del vehículo.

En este paso, también es necesario determinar la velocidad de operación. Para ello se debe calcular las mismas usando las ecuaciones de la Tabla 1. Al ser una pendiente en descenso, las ecuaciones que se van a utilizar son aquellas que tienen pendientes negativas. Entonces, para el primer tramo, que tiene una pendiente del 9,5%, se tiene:

$$V_{85,t1} = 0,07L + 66,09 = \left[\frac{0,07 (1,05/1,609) + 66,09}{1,609} \right] = 41 \text{ mi/h}$$

El valor de 1,609 permite transformar las unidades del SI al sistema inglés. Ahora este valor se multiplica por 0,97 y se le suma 1 mi/h:

$$V_{85,t1} = 41 \times 0,97 + 1 = 40,77 \approx 41 \text{ mi/h}$$

Para el tramo 2 (5,5%):

$$V_{85,t2} = 0,04L + 72,68 = \left[\frac{0,04 (2,34/1,609) + 72,68}{1,609} \right] = 45 \text{ mi/h}$$

$$V_{85,t2} = 45 \times 0,97 + 1 = 44,65 \approx 45 \text{ mi/h}$$

Para el tramo 3 (3%):

$$V_{85,t3} = 0,05L + 73,65 = \left[\frac{0,05 (7,75/1,609) + 73,65}{1,609} \right] = 46 \text{ mi/h}$$

$$V_{85,t3} = 46 \times 0,97 + 1 = 45,62 \approx 46 \text{ mi/h}$$

Dado que la velocidad de operación de los tres tramos es mayor a la velocidad máxima segura de 25 mi/h, entonces, es necesaria la construcción de una rampa de escape para camiones, ante la alta posibilidad de sobrecalentamiento de los frenos de los camiones.

4.2 Paso 2: estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F

Una vez que se ha justificado la construcción de la rampa, ahora es necesario determinar su ubicación. Para ello, lo primero que se requiere es estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F. Entonces, se calculan las temperaturas finales en cada tramo de la pendiente en descenso usando las velocidades de operación calculadas, tal como se muestra en la Tabla 3.

En la Tabla 3, se puede ver que en el segundo tramo se excede de los 500 °F. En ese segmento (tramo i), se procede calcular la distancia hasta donde se alcance esos 500 °F. Entonces, se realiza el retro-cálculo con las mismas ecuaciones del modelo GSRS. Lo primero que se debe hacer, es estimar la temperatura límite de ese tramo se calcula con la ecuación (8):

$$T_{f,t2} = 500 - T_E = 500 - 62,479 = 437,521 \text{ °F}$$

Luego, se utiliza la ecuación (10) para encontrar el valor de la longitud en donde se alcanza los 500 °F:

$$L_{500,t2} = -\frac{V_{85,t2}}{K_{1,t2}} \ln \left(1 - \frac{T_{f,t2} - T_{0,t1}}{T_{\infty} - T_{0,t1} + K_{2,t2} \text{HP}_{B,t2}} \right)$$

$$L_{500,t2} = -\frac{45}{4,012} \ln \left(1 - \frac{437,521 - 369,317}{90 - 369,317 + 1,956 (504,275)} \right)$$

$$L_{500,t2} = 1,1376 \text{ mi}$$

Por seguridad, esa longitud se puede redondear hacia abajo y quedaría 1,13-mi. Con esa longitud, la temperatura alcanzada será de 499,566 °F. Desde el inicio de la pendiente, la longitud hasta el punto en donde se alcanza los ~500 °F sería 2,18-mi.

4.3 Paso 3: estimar el punto en donde el conductor es consciente de la situación y está en capacidad de decidir el uso la rampa

Para calcular este punto es necesario utilizar la ecuación (13). Para ello, dado que se trata de una carretera rural (maniobra C), el tiempo de decisión puede tomarse como 11,2 s (máximo valor en ese rango). Entonces la distancia de decisión para el uso de la rampa de escape (DD_{re}) es:

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,t2} + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,t2})(t)$$

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) 45 + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (45)(11,2) = 0,17\text{-mi}$$

Esta distancia, a partir del segundo tramo es 1,30-mi (1,13+0,17) y con referencia el inicio de la pendiente sería 2,35-mi.

Tabla 3. Resultados de las temperaturas del sistema de frenos calculada con la velocidad de operación calculadas

N°	V ₈₅ (mi/h)	T ₀ (°F)	HP _B (hp)	T _r (°F)	T _{lim} (°F)
1	41	150,000	892,658	317,452	369,317
2	45	369,317	504,275	502,472	564,951
3	46	564,951	211,176	531,223	596,509

4.4 Paso 4: estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h

Lo siguiente es estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h. Para ello, se tiene dos casos. Dado que no es posible conocer a qué caso pertenece la situación del tramo *i*, se debe calcular ambos casos. En el primer caso, se calcula el desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h utilizando la ecuación (14).

$$h_{12} = \frac{V_{80}^2 - V_{0.12}^2}{2g} = \frac{80^2 - 45^2}{2(78919,11)} = 0,028 \text{ mi}$$

Ahora bien, la longitud en donde se alcanza esa velocidad se estima con la ecuación (15):

$$L_{80.12} = (L_{12} - L_{500.12}) \left(\frac{h_{12}}{i_{12}} \right) = (2,34 - 1,30) \left(\frac{0,028}{0,055} \right) = 0,53\text{-mi}$$

Entonces, la distancia desde el tramo 2 sería: 1,83-mi, que es el resultado de la suma de 1,30 + 0,53. Este valor no excede de la longitud total del segundo tramo, entonces, no es necesario calcular el caso 2. Por lo tanto, el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h es el tramo 2 a 1,83-mi desde su inicio. La ubicación de ese punto desde el inicio de la pendiente es: 2,88-mi que se obtiene sumando 1,05 + 1,13 + 0,17 + 0,53.

4.5 Paso 5: determinar la localización de la rampa de escape

Con los resultados de los pasos 3 y 4, se procede a determinar la localización de la rampa de escape. Entonces, ésta se debe colocar entre 2,35 hasta 2,88-mi desde el inicio de la pendiente en descenso. En ese segmento, se debe analizar la localización exacta en base a la topografía de la zona, el diseño geométrico, cercanía de poblaciones, etc. No se debe colocar la rampa antes de los 2,35-mi o después de los 2,88-mi. No se debe considerar a 2,88-mi como el sitio exacto de colocación de la rampa, dado que la AASHTO menciona que los 80-90 mi/h sólo se usan para calcular la longitud de lecho de frenado. Además, hay que considerar que maniobrar un camión cargado a velocidades cercanas a 80 o 90 mi/h es complicado de dirigir.

4.6 Paso 6: Estimar las dimensiones del lecho de frenado

No se calcula este paso, dado que no es objeto de estudio.

5. DISCUSIÓN

Este estudio muestra un procedimiento para realizar los cálculos analíticos para justificar la necesidad de la rampa de escape para camiones, así como determinar su ubicación. A pesar de mostrar el procedimiento con un ejemplo representativo, hay que considerar ciertos aspectos. En primer lugar, el método GSRs fue diseñado para determinar la velocidad máxima segura en las pendientes en descenso, por lo que es coherente que se utilice una velocidad constante a lo largo de todos los tramos en la pendiente. En la práctica, es muy difícil que el conductor mantenga una velocidad constante, considerando el diseño geométrico (planimetría y perfil) que puede existir en esos tramos. Por ello, es que se utiliza la velocidad de operación, como un valor más representativo. No obstante, esta velocidad debe ser obtenida para las condiciones locales (calibración de ecuaciones) o en recolección de datos de campo.

Por otro lado, se asume que la velocidad de 80 mi/h, es la velocidad en donde se considera el punto máximo para colocar la rampa. Este valor es bastante alto cuando se trata de dirigir un camión cargado con pérdida del sistema de frenos. Sin embargo, ante la falta de otro elemento de referencia, se puede usar este valor. Así mismo, para el cálculo de la velocidad de operación al final en cada tramo, cuando ya no se controla el vehículo, se supone una tasa de aceleración constante, lo cual también puede diferir de la realidad. La fricción, la geometría, entre otros elementos pueden afectar esa tasa de aceleración. La tasa de aceleración debería ir en aumento debido a que se trata de una pendiente en descenso, lo cual podría estudiarse a profundidad en investigaciones futuras.

Otro elemento a considerar es que si el camión utilizado en la actualización del GSRs se ajusta al parque de camiones que se dispone en un país o región. Por ejemplo, en Ecuador, en base a las dimensiones y los pesos máximos del país (*Acuerdo Ministerial N° 018*, 2016) el vehículo Kenworth T680 Series (2016) es similar al camión 3S2 cuyo peso máximo es de 47 ton (47000 kg). En ese acuerdo, también se observa que el peso máximo de todos los vehículos es de 48 ton (48000 kg). El camión Kenworth T680 tiene un peso de 36287 kg. Aparentemente, para valores superiores al del camión del estudio no sería aplicable este procedimiento o habría que utilizarlo con cautela. Sin embargo, cabe mencionar que es muy peligroso y/o costoso realizar investigaciones con vehículos tan pesados, es más, parte del estudio de actualización del GSRs se realizó con un programa computacional (Mechanical Simulation Corp., 2018), que permitió complementar los datos de campo. Hasta que no exista más estudios con vehículos de mayor peso, se debiera utilizar este procedimiento. También, hay que considerar, que el acuerdo en mención, incluye los pesos máximos legales, y no necesariamente serán los que circulen por la futura vía o los que actualmente lo estén haciendo por una vía existente en particular, lo cual se determinará en base al estudio del tránsito correspondiente.

6. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo por objetivo presentar un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y determinar su ubicación. A continuación, se presentan las siguientes conclusiones:

El procedimiento descrito permite mejorar los cálculos analíticos para justificar la necesidad y estimar la localización de la rampa. Corrige y completa lo que hasta el momento se ha desarrollado. Además, los detalles de los cálculos permitirán que los ingenieros en libre ejercicio o en las entidades de gobierno, docentes y estudiantes, tengan una mejor comprensión sobre el tema. Su uso puede aportar a la disminución de siniestros viales fatales o a la reducción de daños materiales, lo cual está alineado con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas y de los objetivos y metas de los países interesados en mejorar la calidad de vida de su población.

El GSRS debe ser explorado y adoptado por países en donde existe topografía montañosa y/o escarpada, como en los Andes, ya que existe una mayor probabilidad de que el diseño incluya pendientes largas en descenso. Además, de servir a los diseñadores, el GSRS también sirve para los conductores cuando en la señalización vertical se sugiere una velocidad máxima de descenso, por lo tanto, una adecuada capacitación para ellos permitirá una reducción en la siniestralidad asociada con el sobrecalentamiento del sistema de frenos.

La principal limitación de este estudio es que se basa en resultados de investigaciones previas que poseen sus propias limitaciones. Sin embargo, a pesar de esto, el estudio permite extender el conocimiento sobre el procedimiento analítico sobre la necesidad y ubicación de las rampas de escape, completando las normas vigentes o ampliando sus rangos de aplicación. Es aplicable para diversos pesos de vehículos, para pendientes compuestas e incluye el reciente ajuste del GSRS debido a la modernización de los camiones actuales.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bowman, B. L., & Coleman, J. A. (1990). Grade Severity Rating System. *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)*, 60(7), 19–24.
- Echaveguren, T., & Vargas, S. (2013). Evaluación de la necesidad de lechos de frenado en pendientes descendentes usando principios de confiabilidad. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(3), 221–235. https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v28n3/en_art01.pdf
- Echaveguren, T., Vargas, S., & Nancuffil, J. (2007). Metodología de análisis y diseño de lechos de frenado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(3), 175–184. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000300004>
- Espinoza, M., Altamira, A., & Marcet, J. (2016). Estudio de ubicación y necesidad de nuevos lechos de frenado en caminos de la provincia de San Juan. *XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, 1–25.

- FHWA. (1989). *Grade Severity Rating System Users Manual*. FHWA-IP-88-015.
- FHWA. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways (MUTCD)*. Federal Highway Administration.
- García-Ramírez, Y. D., & Alverca, F. (2019). Calibración de Ecuaciones de Velocidades de Operación en Carreteras Rurales Montañas de Dos Carriles: Caso de Estudio Ecuatoriano. *Revista Politécnica*, 43(2), 37–44. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.1012>
- Mechanical Simulation Corp. (2018). *TruckSim Mechanical Simulation*.
- Moomen, M., & Ksaibati, K. (2020). Updating the Grade Severity Rating System (GSRS) for Wyoming Mountain Passes: A Description of Tests and Results. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 13(1), 75–81. <https://doi.org/10.4271/02-13-01-0005>
- MOP. (2019). *Manual de Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas Chile.
- Moreira, C. (2011). *O modelo qrsp para a quantificação do risco na saída de veículos da pista em rodovias (Doctoral dissertation)*. Universidades de São Paulo.
- Acuerdo Ministerial N° 018, 18 (2016) (testimony of MTOP). https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/STT_C_AM_MT_OP_018_2016_Pesos-y-Dimensiones.pdf
- Ruhl, R. L., Inendino, L. V., Southcombe, E. J., Ruhl, R. A., & Fittanto, D. A. (2006). Usable models for free and forced cooling of commercial vehicle drum brakes. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3557>
- Valdes, R., Strong, K., & Shuler, S. (2018). *Emergency escape ramps (EER) improvements. Report CDOT-2018-20*.
- Witheyford, D. K. (1992). *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 178: Truck Escape Ramps*.
- Zanoli, P. R. (2003). *Área de escape para caminhões desgovernados (Master dissertation)*. Universidad de São Paulo.

BIOGRAFÍA



Yasmany García-Ramírez es Ingeniero Civil en la Universidad Técnica Particular de Loja - UTPL (Ecuador) en el 2006. Especialista en Ingeniería de Caminos de Montaña en la Universidad Nacional de San Juan - UNSJ (Argentina) en el 2009. Doctor en Ingeniería Civil en la UNSJ (Argentina) en el 2014. Es docente asociado de la UTPL (Ecuador) en materias de diseño de carreteras en grado y posgrado. Actualmente es director de maestría en Ingeniería Civil con mención en carreteras de montaña de la misma universidad. Posee alrededor de 40 publicaciones entre libros, revistas y conferencias relacionadas con las carreteras y educación en ingeniería civil.

