

APLICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS HIDRO-CLIMÁTICAS DEL ENTORNO ASOCIADAS CON LA FRICCIÓN LONGITUDINAL A LAS NORMAS DE DISEÑO DE CARRETERAS

John Jairo Posada Henao, Universidad Nacional de Colombia, jjposada@unal.edu.co
Luis Alberto Sánchez Muñoz, Universidad Nacional de Colombia, luasanchezmu@unal.edu.co

RESUMEN

Los parámetros de diseño utilizados, asociados con la fricción, han sido implementados por décadas para la ejecución de proyectos viales, por este motivo y en vista de la necesidad de ejemplificar de manera más aproximada las características hidro-climatológicas del entorno, partiendo del concepto de SN (Skid Number), ensayos aplicables a la oferta y demanda de fricción y una metodología de cuantificación hidrológica para la determinación del coeficiente de fricción, es posible ajustar las ecuaciones de diseño asociadas a este parámetro de manera más aproximada de acuerdo a las características hidro-climáticas del entorno especialmente asociadas con pluviosidad.

Palabras clave: Hidro-climatología, factor de fricción, vías.

ABSTRACT

The parameters of design used, associated with friction, have been implemented for decades to implement road projects, for this reason and in view of the need to illustrate more approximated hydro- climatic characteristics of the environment , based on the concept of SN (Skid Number), tests applicable to the supply and demand of friction and hydrological quantification methodology for determining the coefficient of friction, It is possible to adjust the design equations associated with this parameter in a more approximated way according to the hydro -climatic characteristics of the environment, especially associated with rainfall.

Keywords: Hydro-climatology, Friction factor, Highways.

1 INTRODUCCIÓN

Las características hidro-climáticas no son representadas de manera precisa en las ecuaciones de diseño debido a múltiples factores, de acuerdo a lo planteado en Posada et al. (2014), algunas de las afectaciones se presentan por las condiciones desfavorables de resistencia al deslizamiento en la vía producto de eventos extremos de lluvia, granizo, heladas y humedad; estas características generan impactos relacionados con la resistencia al deslizamiento, que son el resultado de la acción de la fuerza de fricción de Coulomb aplicada al contacto entre el área del neumático y el pavimento. La variable responsable de los cambios en la resistencia al derrape es la fuerza de resistencia horizontal que a su vez tiene dos componentes, y se complementa con la fuerza de la interacción neumático-líquido, según Fwa y Ong (2008).

Cuando la resistencia al deslizamiento entre pavimento y llanta en condiciones húmedas se hace cero se crea el fenómeno del hidroplaneo, este tiene lugar cuando el neumático se eleva sobre la superficie del pavimento debido a la presión creada por el agua bajo la llanta como menciona Li Et al (2003), se origina debido a la disminución de resistencia y la presencia de fluidos en la superficie.

La contribución de estos componentes y sus variaciones al cambiar la velocidad merecen un análisis más profundo, existen diferencias en el entorno respecto a los modelos adaptados al medio.

Este trabajo se concentra en la relación del diseño geométrico de vías y las condiciones hidro-climatológicas, especialmente en la condición de resistencia al deslizamiento y su interacción con la lluvia, el planeamiento de estudios para una mejor representación de las condiciones adversas y la modificación de parámetros de diseño relacionados directamente con esas condiciones.

2 LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Y EL SKID NUMBER (SN)

Al hablar de agua en la superficie de las vías inmediatamente debe hablarse del número de resistencia al deslizamiento, pues este relaciona las fuerzas que interactúan cuando el pavimento se encuentra húmedo debido a un evento hidro-climático y se tienen velocidades altas. Se debe hablar de la razón entre la aceleración que el vehículo experimenta y la gravedad, alterando el valor de la gravedad con el coeficiente de fricción. Ju et al. (2013) afirma que la tasa de desaceleración del vehículo longitudinalmente presentada también en Posada et al. (2014) está dada por:

$$a(t) = [\mu_k + G] * g \quad (1)$$

Donde: $a(t)$ es la tasa de desaceleración del vehículo [m/s^2], μ_k es el coeficiente de fricción cinética [adimensional], G es la pendiente [adimensional] y g es la aceleración de gravedad [m/s^2]; El concepto anterior puede asociarse también al número de resistencia al deslizamiento, según Fwa y Ong (2008) la resistencia al deslizamiento se cuantifica mediante la expresión:

$$SN = \frac{F_x}{F_z} * 100 \quad (2)$$

Donde: SN es la resistencia al deslizamiento (Skid Number) [%], F_x es la fuerza longitudinal [KN], F_z es la carga que actúa sobre el eje del neumático y equivale a la suma de la fuerza de contacto normal y las fuerzas de levantamiento del fluido. [KN].

Según Ju et al. (2013) el coeficiente de fricción está directamente relacionado con el SN así:

$$\mu_k = 0.01 * SN \quad (3)$$

Donde: μ_k es el coeficiente de fricción cinética [adimensional] y SN es la resistencia al deslizamiento (Skid Number) [%], mostrando que la cuantificación del SN es de vital importancia para el estudio de la fricción en las vías, sin embargo su conocimiento requiere la ejecución de ensayos y la implementación de metodologías para la consecución de factores de resistencia.

3 ENSAYOS APLICABLES EN EL ANALISIS DE LA FRICCIÓN EN EL ENTORNO

Las pruebas de fricción incluyen prueba de fricción de campo y de laboratorio, hay muchos tipos de equipos disponibles comercialmente, todos los dispositivos se desarrollan sobre la base del mecanismo fundamental de la fricción; a continuación se enunciará algunos dispositivos que pueden aportar al desarrollo del coeficiente de fricción, con base en el estudio del SN y la cuantificación hidro-climatológica.

3.1 ASTM E 670, Medidor de fuerza latera [Prueba de campo]

Mide La fuerza lateral perpendicular al plano de rotación y este valor se promedia para calcular el número Mu o el coeficiente de fuerza lateral (SFC), tiene aplicación en la medición de fricción en secciones de pruebas de campo, rectas, curvas, pendientes pronunciadas; los datos de diferentes aplicaciones se recogen separadamente, es comúnmente usado en Europa y en los aeropuertos de los estados unidos, es muy sensible a las irregularidades de la carretera (baches, grietas, etc.), las mediciones son continuas a lo largo de una sección de ensayo de pavimento, (Hall et al., 2009).

3.2 ASTM E 1859, Dispositivos variables antideslizantes [Prueba de campo]

Miden la fricción como una función de deslizamiento (de 0 a 100 por ciento) entre la rueda y la superficie de la carretera, el agua se aplica a la superficie del pavimento y se permite que la rueda gire libremente, poco a poco la velocidad de la llanta de ensayo se reduce y la velocidad del vehículo; la distancia de viaje, velocidad de rotación del neumático, carga de la rueda y la fuerza de fricción se recogen en intervalos, los datos se registran para después realizar una selección.

Cuando se usa para las mediciones de variable de deslizamiento, el sistema proporciona un gráfico de la relación entre el número de fricción de deslizamiento y la velocidad de deslizamiento; los índices resultantes son el número de fricción de deslizamiento longitudinal, el número pico de fricción de deslizamiento, la relación de deslizamiento crítica, la relación de deslizamiento, el número estimado de fricción y el factor de forma Rado. Cuando se usa para las mediciones de ruedas bloqueado, el sistema proporciona valores de SN, es comúnmente usado en pruebas de campo y en el monitoreo de fricción, puede proporcionar continuamente valores de fricción dinámica, sin embargo es un equipo con altos costos de mantenimiento, el procesamiento de datos se hace mediante análisis complejos y utiliza grandes cantidades de agua (Hall et al., 2009).

3.3 ASTM E 274, Dispositivo de bloqueo de rueda [Prueba de campo]

Consiste en un remolque arrastrado por un vehículo y mide la fuerza de fricción estacionaria en una rueda bloqueada; la rueda se desliza sobre una superficie de pavimento mojado, bajo una carga y a una velocidad constantes (Li et al., 2003). Cuando la rueda se bloquea este dispositivo produce una condición de deslizamiento y se miden los datos, la presión de inflado de las llantas de prueba se fija en 165 kPa y en el curso de la prueba el vehículo alcanza la velocidad deseada, entonces, el agua se dispone sobre la superficie de rodadura y el freno de prueba se bloquea 0,5 segundos después del inicio de la entrega de agua; el sistema de riego para este dispositivo debe proporcionar una película de agua de 0,5 mm, cuando la rueda de prueba está bloqueada; allí se produce una condición de deslizamiento completa, la velocidad relativa entre la superficie del neumático y la superficie del pavimento (velocidad de deslizamiento) es igual a la velocidad del vehículo, la rueda debe permanecer bloqueada durante aproximadamente 1 segundo, los datos se miden y promedian; el resultado de la prueba se presenta en términos de la ley de fricción estática.

La velocidad de la prueba estándar es de 64 km/h, los resultados de las pruebas de fricción en otras velocidades deben convertirse a los correspondientes a la velocidad de 64 km/h usando curvas de gradiente de velocidad. Este dispositivo puede detectar la fuerza de fricción pico debido a que la medición de datos es continua cuando la rueda de ensayo permanece bloqueada, sin embargo, es difícil ajustar el suministro de agua (Hall et al., 2009)..

3.4 ASTM E 1911, Probador de fricción dinámica (DFT) [Prueba de campo]

Este dispositivo es portátil, consiste en un disco giratorio horizontal equipado con tres deslizadores de goma, durante las pruebas, el disco se baja de manera que los tres deslizadores están en contacto con la superficie de ensayo bajo una fuerza constante perpendicular a la superficie, el agua se suministra y la fuerza horizontal necesaria para superar la fricción se mide, el disco gira a una velocidad tangencial que varía de 0 a 80 km/h y se determina a partir de la velocidad de rotación del disco. Las mediciones se representan como un espectro continuo de los coeficientes de fricción; la medición y el registro se llevan a cabo simultáneamente en cortos intervalos (ASTM, 2009).. Además de una fácil instalación, el DF Tester tiene la ventaja de ser capaz de medir la fricción como una función de la velocidad en el rango de velocidades de ensayo, esto permite a los usuarios crear curvas de gradiente de velocidad rápidamente, su uso en campo requiere control de tráfico.

3.5 Dispositivos fijos deslizantes (Fixed-Slip) [Prueba de campo]

Estos dispositivos miden la resistencia a la rotación de las llantas lisas en deslizamiento a una velocidad constante, el agua se aplica delante de un neumático que puede recogerse, montado en un remolque o vehículo normalmente viajando a 64 km/h, la rotación de las llantas de prueba se inhibe a un porcentaje de la velocidad del vehículo por un mecanismo de cadena, correa o un sistema de frenado hidráulico; las cargas de las ruedas y fuerzas de fricción se miden por transductores de fuerza o dispositivos de medición de tensión y torsión, los datos se recogen típicamente en intervalos de distancia que varían entre 25 y 125 mm y se promedian en intervalos de 1 m según (Hall et al., 2009). La medida tomada de la fuerza de arrastre resistiva y la carga, se

utiliza para calcular el coeficiente de fricción μ , recolecta datos de alta resolución continuamente, solo puede realizar lecturas a una velocidad de deslizamiento especificado, Sus velocidades de deslizamiento no siempre coinciden con el valor crítico de velocidad de derrape, utiliza grandes cantidades de agua y requiere pericia a la hora de seleccionar los datos (Hall et al., 2009).

4 PARAMETROS DE DISEÑO ASOCIADOS CON LA FRICCIÓN

4.1 Distancia de visibilidad de parada

Se define como la distancia necesaria para que un vehículo pueda realizar la maniobra de frenado al circular a la velocidad específica del elemento, esta distancia se debe evaluar en las condiciones más críticas posibles para ese elemento (INVIAS, 2008), la ecuación usada para calcular la visibilidad de parada según AASHTO (2011) es:

$$D_p = (0.278 * V * t) + (0.039 * \frac{V^2}{a}) \quad (4)$$

Donde: D_p es la distancia de visibilidad de parada [m], V es la velocidad del elemento sobre el cual se ejerce la maniobra de frenado [km/h], t es el tiempo de percepción – reacción, igual a 2.5 [s], y a es la tasa de desaceleración, igual a 3.4 [m/s²].

Para carreteras con pendientes de rasante superiores a tres por ciento (3%), tanto en ascenso (+p) como en descenso (-p), se deberá realizar la corrección necesaria a las distancias de visibilidad de parada, utilizando la siguiente ecuación según AASHTO (2011):

$$d = \frac{V^2}{254 * \left(\frac{a}{9.81} \pm \frac{p}{100} \right)} \quad (5)$$

$$D_p = (0.695 * V) + d \quad (6)$$

Donde: d es la distancia recorrida durante el frenado [m] y p es la pendiente de la rampa [%].

4.2 Distancia de visibilidad de cruce

Se define como la distancia necesaria para que un vehículo que se dirige a una intersección pueda realizar la maniobra de frenado al circular a la velocidad del elemento, esta distancia se debe evaluar en las condiciones más críticas posibles para ese elemento. Las relaciones entre el espacio, el tiempo y la velocidad, definen el triángulo de visibilidad requerido, libre de obstrucciones, o el establecimiento de las modificaciones necesarias en la velocidad de aproximación a los accesos cuando se usa un triángulo de visibilidad de dimensiones menores a la requerida. (INVIAS, 2008)

La distancia mínima de visibilidad de cruce necesaria a lo largo de la calzada principal se debe calcular mediante la siguiente expresión (INVIAS, 2008):

$$d = 0.278 * V_e * (t_1 + t_2) \quad (7)$$

Donde: d es la distancia mínima de visibilidad lateral requerida a lo largo de la calzada principal, medida desde la intersección, correspondiente a la distancia que existe entre el que circula por la vía principal y el punto de intersección con el vehículo que circula por la vía contraria en [m], V_e es la velocidad específica de la calzada principal [km/h] que corresponde a la velocidad específica del elemento de la calzada principal inmediatamente antes del sitio de cruce [m/s], t_1 es el tiempo de percepción–reacción del conductor que cruza [2.5 s] y t_2 es el tiempo para acelerar por quien conduce por la calzada secundaria, y recorrer la distancia entre el punto de inicio de la interacción con la otra calzada y el punto seguro al cruzar la calzada principal [s].

En t_1 está incluido el tiempo necesario para que el conductor de un vehículo detenido por el "PARE" sobre la vía secundaria vea en ambas direcciones sobre la vía principal y deduzca si dispone del intervalo suficiente para cruzarla con seguridad y para que engrane su velocidad, previamente al arranque (INVIAS, 2008), pero el tiempo t_2 necesario para recorrer la distancia S depende de la aceleración de cada vehículo. La distancia S se calcula como la suma de:

$$S = D + W + L \quad (8)$$

Donde: S es la distancia recorrida por quien conduce por la calzada secundaria entre el punto de inicio de la interacción con la otra calzada y el punto seguro al cruzar la calzada principal, D es la distancia entre el vehículo parado y la orilla de la calzada principal [3.0 m], W es el ancho de la calzada principal [m] y L es la longitud total del vehículo [m]; así el valor de t_2 se obtiene de:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 * (D + W + L)}{9.8 * a}} \quad (9)$$

Donde: D es la distancia entre el vehículo parado y la orilla de la calzada principal [3.0 m], W es el ancho de la calzada principal [m], L depende del tipo de vehículo, siendo 20.89 m para vehículos articulados (tracto camión con semirremolque), 11.00 m para camión de dos ejes y 5.00 m para vehículos livianos y a es la aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce [m/s^2], siendo 0.055 para vehículos articulados, 0.075 para camiones de dos ejes y 0.150 para vehículos livianos.

4.3 Distancia de visibilidad de adelantamiento

Se dice que un tramo de carretera tiene distancia de visibilidad de adelantamiento, cuando la distancia de visibilidad en ese tramo es suficiente para que, en condiciones de seguridad, el conductor de un vehículo pueda adelantar a otro que circula por el mismo carril a una velocidad menor, sin peligro de interferir con un tercer vehículo que venga en sentido contrario y se haga visible al iniciarse la maniobra de adelantamiento. Debe considerarse únicamente para las carreteras de dos carriles con tránsito en las dos direcciones, donde el adelantamiento se realiza en el carril del sentido opuesto (INVIAS, 2008), se determina como la suma de cuatro distancias, así:

$$D_a = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \quad (10)$$

Donde: D_1 es la distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción [m], D_2 es la distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril [m], D_3 es la distancia de seguridad, una vez

terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta [m] y D_4 es la distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en $2/3$ de D_2) [m]

Por seguridad, la maniobra de adelantamiento se calcula con la velocidad específica de la entretangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra (INVIAS, 2008), acorde a lo siguiente:

$$D_1 = 0.278 * t_1 * \left(V - m + \frac{a * t_1}{2} \right) \quad (11)$$

Donde: t_1 es el tiempo de la maniobra inicial [s], V es la velocidad del vehículo que adelanta [km/h], a es el promedio de aceleración que el vehículo necesita para iniciar el adelantamiento [km/h/s] y m es la diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado [15 km/h] en todos los casos, así el valor para D_2 es como sigue:

$$D_2 = 0.278 * V * t^2 \quad (12)$$

Donde: V es la velocidad del vehículo que adelanta [km/h] y t_2 : es el tiempo empleado por el vehículo al realizar la maniobra para volver a su carril [s]; Por último, la distancia D_3 varía entre 30 y 90 m de acuerdo a la velocidad y D_4 es $\frac{2}{3} * D_2$

4.4 Distancia de visibilidad de encuentro

En las carreteras terciarias de una calzada y sin diferenciación de carriles, la distancia de visibilidad de encuentro es la longitud mínima disponible de carretera, visible para los conductores que circulan en sentidos opuestos, obligados a llevar a cabo la maniobra para esquivarse. Esta longitud debe ser lo suficientemente larga, para permitirle a los vehículos que viajan a la velocidad de diseño en sentidos contrarios, esquivarse y cruzarse con seguridad a una velocidad de 10 Km/h (INVIAS,1998).; se debe determinar con base a un tiempo de percepción-reacción de un segundo y una desaceleración similar a la de frenado hasta esquivarse y cruzarse a una velocidad de 10 Km/h, mediante la siguiente relación, Donde: V_d es la velocidad de diseño [km/h], f_l es el coeficiente de fricción longitudinal llanta-pavimento y p es la pendiente de la rasante [tanto por uno], + ascenso, - descenso así:

$$D_e = 2 * (0.278 * V_d) + \left[\frac{V_d^2 - 100}{254 * (f_l + p)} \right] + \left[\frac{V_d^2 - 100}{254 * (f_l - p)} \right] \quad (13)$$

4.5 Radio de curvatura

El radio de curvatura está directamente relacionado con la ecuación de equilibrio, esta ecuación permite definir la relación entre el radio R_c de la curva horizontal, la Velocidad Específica (V_{ch}), el peralte (e) y la fricción transversal (f_t), con la cual se tiene el equilibrio de las fuerzas que participan en la circulación del vehículo en la curva evitando el deslizamiento hacia la parte externa de la curva (INVIAS, 2008). La ecuación que asocia estas variables es la siguiente:

$$R_c = \frac{V_{ch}^2}{127 * (e + f_t)} \quad (14)$$

El coeficiente f_t está determinada por numerosos factores, entre los cuales se encuentra el estado de la superficie de rodadura, la velocidad del vehículo, el tipo y condiciones de las llantas de los vehículos. Se adoptan los valores del coeficiente de fricción transversal máxima indicados por los estudios recientes de la AASHTO, los cuales se indican en la Tabla siguiente.

Tabla 1 coeficiente de fricción transversal máximo respecto a velocidades específicas

Velocidad específica	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Coeficiente de fricción transversal máxima Ft(max)	0,35	0,28	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08

Fuente:(INVIAS, 2008)

5 METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN HIDROLÓGICA

A partir de los ensayos y ecuaciones mostradas anteriormente se presenta a continuación una metodología para la integración de la hidro-climatología, los ensayos sugeridos y las ecuaciones de diseño influenciadas por el factor de fricción.

Al hablar de hidro-climatología, es necesario hablar de la principal variable del ciclo, la precipitación; que no es más que cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre, este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no neblina ni rocío que son formas de condensación y no de precipitación, esta es la entrada principal de agua al sistema hidrológico y controla la hidrología de una región, se mide mediante la siguiente ecuación, suponiendo un área rectangular y un volumen correspondiente al área así:

$$L = \frac{V}{A} \quad (15)$$

Donde: L es la lámina de agua [mm], V es el volumen [mm³] y A es el área [mm²]

Gracias a los pluviómetros se puede cuantificar la distribución de la lluvia en el tiempo, con estos se puede realizar una interpolación a escalas de espacio o tiempo diferentes mediante curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración comúnmente conocidas como IDF's.

6 CONSTRUCCION DE CURVAS IDF

La construcción de las IDF's se realiza a partir de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, correspondientes a una misma frecuencia o periodo de retorno según Témez (1978) y para diferentes periodos de retorno; la metodología consiste en un análisis de frecuencia para cada una de las series de máximos de precipitación correspondientes a cada duración, esta serie de datos puede ser según Acevedo (2009) de valores máximos de precipitación en observaciones periódicas a través de los años de registro, de valores de excedencia,

es decir aquellos datos que sobrepasan un valor predefinido conocidos como duraciones parciales o de valores de excedencias anuales que son el número de datos que conforman la serie siendo igual al número de años de registro, debido a una selección adecuada del valor base.

La utilización de las series se determina por cada proyecto, y una vez que se ha seleccionado la serie de máximos se procede a determinar el rango de duración, este rango es establecido entre 5 minutos y 24 horas, la gran mayoría de autores sugieren estimar un par de curvas, una para las duraciones más cortas (entre 5 y 60 minutos) y otra (entre 60 y 120 minutos), pasando por varias horas o días.

6.1 Ajuste estadístico de la lluvia en el tiempo

Luego de la escogencia del rango de acuerdo a los requerimientos del proyecto y al alcance de la curva IDF a cada una de las series obtenidas se le ajusta una función de distribución, a partir de esta función se construyen familias de curvas, a partir de las cuales se determina la intensidad para diferentes duraciones con la probabilidad de ocurrencia deseada. (Acevedo, 2009); es así como para un lugar donde exista instrumentación para la medida de la precipitación, existirá una curva representativa de la distribución estadística de la lluvia en el tiempo.

6.2 Aplicación metodológica al diseño geométrico de carreteras

Luego de la obtención de la IDF, a través del concepto de flujo superficial uniforme, (Chow et. al, 1988) que se aplica cuando el agua fluye a través de una superficie muy ancha (como en una carretera), la profundidad del flujo puede ser muy pequeña en comparación con el ancho, el flujo se convierte en un flujo de canal abierto, conocido específicamente como flujo en láminas (Chow et. al, 1988). El flujo uniforme puede ser turbulento o laminar, dependiendo de factores como el caudal, la pendiente, la viscosidad y el grado de rugosidad superficial, si las velocidades y profundidades del flujo son relativamente pequeñas, la viscosidad se convierte en un factor dominante y el flujo es laminar, en este caso se aplica la ley de viscosidad de Newton, esta ley expresa la relación entre la viscosidad dinámica μ y el esfuerzo cortante a una distancia y desde la superficie límite así:

$$\tau = \mu \frac{d_v}{d_y} \quad (16)$$

Donde: τ es el esfuerzo cortante [N/m^2], μ es la viscosidad dinámica [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] y d_v/d_y es la derivada la velocidad respecto a la distancia [$1/\text{s}$]; para este caso, el tiempo de concentración (T_c) debe ser el tiempo máximo en el cual una gota de agua se elimina de la carretera, es decir, el tiempo máximo en que una gota de agua recorre la sección, de acuerdo a la dirección del bombeo de la vía y la distancia que debe recorrer la gota de agua para ser eliminada conforme incide en la vía; de acuerdo a la metodología presentada por Chow et al. (1988), el caudal por unidad de ancho y sus variables involucradas son:

$$q = c_T * y_m^{\frac{5}{3}} \quad (17)$$

$$c_t = 1.49 * \frac{S^{0.5}}{n} \quad (18)$$

Donde: q es el caudal por unidad de ancho [m^3/s], c_t es el coeficiente de pendiente y rugosidad, S es la pendiente, y_m es la lámina de agua [m] y n es el número de manning; de esta manera, teniendo en cuenta que la intensidad es una función del periodo de retorno y de la duración, sumado al echo de que la duración es una longitud recorrida con una velocidad especifica se tienen las siguientes ecuaciones tomadas y modificadas de Chow et. al (1988), donde ambas ecuaciones presentan el termino d^* en varias partes; al iterar esta variable se encuentra el valor real de d :

$$d^* = 4,83 * L * n^2 * \frac{(i * d^*)^{\frac{2}{3}}}{1,07 * 10^{-6}} \quad (19)$$

$$i = K * \frac{T_r^m}{(c + d^*)^n} \quad (20)$$

Donde: d^* es la duración, L es la longitud recorrida de la gota, i es la intensidad n es el número de manning, T_r es el periodo de retorno o diseño y K , m y n son variables referentes a la IDF. Es así como mediante la siguiente ecuación se puede obtener la lámina de agua para una intensidad y duración determinadas:

$$y_m = i * d \quad (21)$$

Donde: d^* es la duración e i es la intensidad, logrando así determinar la lámina y_m en mm para el periodo de diseño T_r , así se tienen el estudio necesario para el análisis de la fricción.

ANALISIS DE RESULTADOS

Partiendo de la metodología anteriormente presentada, se recurrirá a algunos autores que han realizado estudios sobre el tema, el concepto de SN, los valores que pueden ser arrojados para el coeficiente de fricción de acuerdo a las tecnologías referenciadas e impactando las ecuaciones de diseño relacionadas con la fricción longitudinal puede analizarse el SN (skid number) de acuerdo a la Figura 1, donde se puede observar que para cada autor y cada material referenciados en la ilustración hay tendencias diferentes; Para Rose y Gallaway (1977) por ejemplo puede verse como el SN varía de acuerdo a la velocidad y a la lámina de agua presente en el ensayo; con velocidades entre 32 km/h y 80 Km/h., según este autor para pavimentos en concreto y lámina de agua de 0.1 mm (marcada con el número (1) en la gráfica) la tendencia es descendente de una manera no lineal, y la medida del SN es superior a la de las otras láminas, indicando que a menor lámina de agua mayor número de resistencia también este autor propone que para pavimentos en concreto y lámina de agua de 5 mm (marcada con el número (2) en la gráfica) la tendencia es igualmente descendente de manera no lineal y la medida del SN es inferior a la de (1) reafirmando la relación entre la capa de agua y la velocidad, para pavimentos en concreto y lámina de agua de 15 mm (marcada con el número (3) en la gráfica) la tendencia es muy similar a la de la lámina de 5 mm y podría indicar poca variabilidad en el coeficiente de fricción cuando hay altas velocidades y láminas de agua muy grandes. Según Horne (1969) para pavimentos en concreto con ranuras (marcado con el número (1) en la gráfica) y láminas de agua entre 5 y 10 mm la tendencia es similar a la mostrada por Rose y Gallaway (1977), pero el impacto de las ranuras hace que el SN sea superior; correspondiente con las velocidades de ambos estudios, esto confirma que el concreto ranurado ofrece mayor resistencia al deslizamiento y concuerda con los estudios realizados sobre el tema. Según Horne (1969) para pavimentos en Asfalto (marcado con el número (2) en la gráfica) y láminas de agua

entre 5 y 10 mm la tendencia es completamente diferente a la mostrada por el mismo para concretos ranurados y por Rose y Gallaway (1977), sugiriendo que a velocidades más altas es mucho más inestable este material al contacto con las ruedas de los vehículos, mostrando un comportamiento bastante repentino respecto a los cambios en la medición como puede verse en la gráfica. Autores como Agrawal y Henry (1977) y Horne y Tanner (1969) ratifican la tendencia para el concreto del análisis presentado sin embargo para láminas de agua entre 5mm y 10 mm tiene variaciones importantes respecto a las mostradas para concreto por Rose y Gallaway (1977) lo que sugiere metodologías diferentes de medición que pueden manipular de manera significativa los datos.

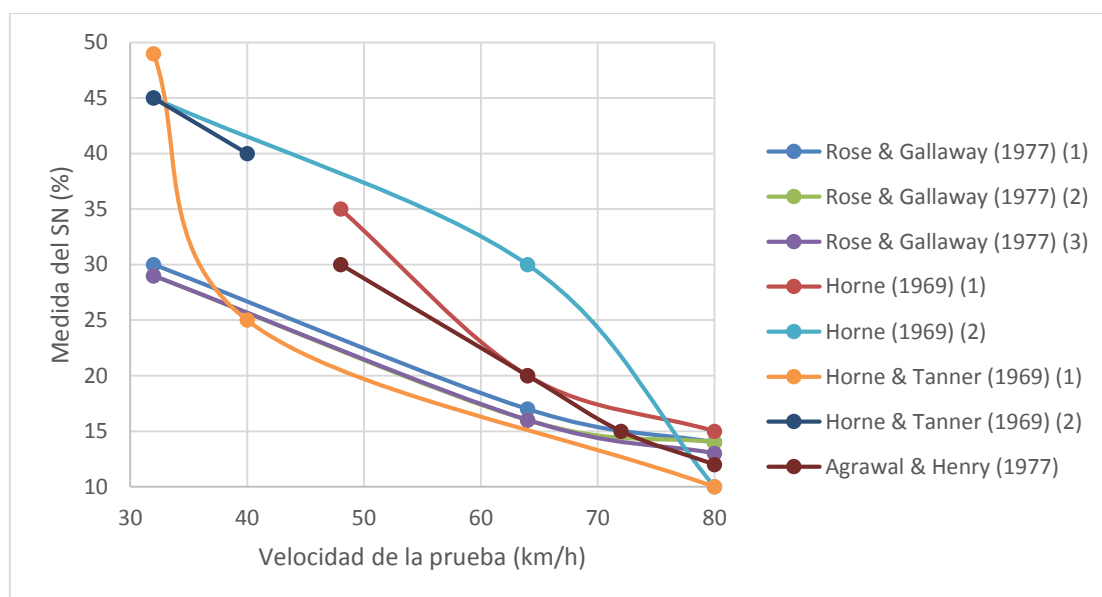


Figura 1 Velocidad de la prueba Vs Medida del SN para los valores de la tabla 4 y 5
Fuente: Elaboración propia

Al analizar la distancia de visibilidad de parada, con una velocidad de 110 Km/h, el tiempo de percepción reacción y aceleración sugerida; el valor de la Dp es de 215,2 m, con una reducción del 29% del SN el valor de la Dp aumenta a 265,2 que representa un 23.2% respecto al que cuenta con datos estándar y con el SN que debe tener el pavimento según la metodología de dispositivo de bloqueo de rueda de 50, lo que significa un aumento respecto al estándar de 43%, La Dp se reduce en un 20% respecto a la que cuenta con aceleración estándar, de esta manera, los cambios respecto al factor a tienen un gran impacto sobre la ecuación y esta comparación sugieren mejoras necesarias al tecnicismo con que se evalúa dicho parámetro de diseño, especialmente a velocidades altas

Al analizar la distancia de visibilidad de parada en pendientes ascendentes respecto a los mismos elementos utilizados en el análisis para pendientes menores al 3%, se tiene que para una velocidad de 110 Km/h, una pendiente de 4%, una aceleración y un tiempo de frenando estándar su valor es de 199,7 m y su SN corresponde a 35%; para un valor 26.5% menor de SN la Dp es de 238.0 m con las mismas condiciones pero con aceleración de $2,5 \text{ (m/s}^2\text{)}$ lo que significa un aumento del 19% en la Dp y por ultimo al realizar los cálculos con el SN requerido por la ASTM respecto a la prueba con el remolque se tiene una Dp de 164,8 m representado en una reducción del 17.5% de la Dp respecto a la estándar lo que sugiere un amplio rango de variación y mejoras necesarias al tecnicismo con que se evalúa dicho parámetro de diseño, especialmente a velocidades altas

Al analizar la distancia de visibilidad de parada en pendientes descendentes respecto a los mismos elementos utilizados en el análisis para pendientes menores al 3%, se tiene que para una velocidad de 110 Km/h, una pendiente de -4%, una aceleración y un tiempo de frenando estándar su valor es de 231,8 m y su SN corresponde al 35%; para un valor 28% menor de SN la Dp es de 298.2 m con las mismas condiciones pero con aceleración de 2,5 (m/s²) lo que significa un aumento del 29% en la Dp respecto a la estándar y por ultimo al realizar los cálculos con el SN requerido por la ASTM respecto a la prueba con el remolque (SN equivalente a 50%) se tiene una Dp de 180,1 m representado en una reducción del 22% de la Dp respecto a la estándar lo que sugiere un amplio rango de variación y mejoras necesarias al tecnicismo con que se evalúa dicho parámetro de diseño, especialmente a velocidades altas.

La distancia de visibilidad de cruce tiene una clara incidencia del factor de aceleración longitudinal que puede hacer variar significativamente su valor, esto significa que la sensibilidad del valor descrito como *a* es muy alta; como puede observarse en la Ecuación 9, donde existen únicamente 3 coeficientes para la aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce, estos coeficientes no deberían ser tan generales por que no recogen el global de las características de los vehículos que circulan por la intersección.

En la distancia de visibilidad de adelantamiento, Ecuación 10, se encuentra una suma de distancias en las cuales se involucra la aceleración en cada una de manera directa, pues hay cambios de velocidad en todas las maniobras, sin embargo la aceleración en esta maniobra no es total, es decir los cambios se realizan y hay presencia de aceleración pero no se llega al frenado total ni al derrape, la ecuación presentada para la distancia recorrida durante el tiempo de percepción reacción presenta un término de aceleración *a* en unidades de Km/h/s, sin embargo para cada una de las variables de distancia involucradas, Ecuación 11, Ecuación 12, D3 Y D4, debiese existir una relación con dicha aceleración, esta relación involucra la fricción, puesto que en condiciones de velocidad elevadas e hidro-climatología adversa la asociación con esta variable es indispensable para la seguridad, a un SN mayor la seguridad en la maniobra debe verse afectada de manera positiva y en el reciproco, existen impactos que no son cuantificados de manera directa por la ecuaciones mostradas en la sección 4.3.

La distancia de visibilidad de encuentro, presenta la incidencia de un factor de aceleración longitudinal presentado en las ecuaciones de distancia de visibilidad de parada, y hace que varíe notablemente el denominador de la Ecuación 13, el análisis de acuerdo a condiciones Hidro-climáticas debe realizarse de manera diferente, pues este parámetro es aplicable a carreteras de tercer nivel (vías en pavimento afirmado o ripio generalmente), el impacto de esta superficie sumado a la condición de lluvia predominante sobre la ecuación y los vehículos de diseño que actualmente se encuentran en el mercado, merece un estudio más profundo de la fricción y su interacción con el medio.

El radio de curvatura tiene una relación directa con la fricción transversal, también es igual a la suma de la fuerza de contacto normal y las fuerzas de levantamiento del fluido, por este motivo, entre mayores sean las fuerzas de levantamiento del fluido mayor será la incidencia, esto disminuirá proporcionalmente la razón que simboliza el SN, de esta manera la afectación se produce en dos direcciones, la fricción transversal que interviene en la determinación del radio de curvatura se ve

claramente influenciada por el factor de fricción transversal y la fuerza centrípeta se ve impactada de manera directa.

CONCLUSIONES

Para la aplicación de los conceptos desarrollados en este trabajo es necesario que se realice un estudio hídrico sobre cada tramo identificado en el corredor vial para obtener parámetros cuantificables de acuerdo a la relación entre pluviosidad, altura y clima, esto dará una idea de la IDF y se podrá cuantificar la cantidad de agua que llega a la vía.

La cuantificación hidrológica mediante la metodología descrita dará pautas sobre las medidas promedio diarias de acuerdo a los periodos de retorno de cada zona, la cuantificación mediante esta metodología y la obtención de una IDF como se menciona son apropiadas para la fiabilidad de la metodología; si un análisis arroja mediante la ecuación de la lámina de agua que el máximo de la cantidad de precipitación es de 10 mm para una zona determinada está se utilizará como lámina de diseño y dentro del análisis de la fricción para el vehículo de diseño representará junto al vehículo de diseño y la velocidad de diseño las características de la fricción en ese punto de la vía, es así como la metodología contribuye al mejoramiento de la representación de la realidad mediante el SN

La lámina de agua tiene una incidencia exponencial en las ecuaciones de cuantificación de fricción, por ende es necesario que la literatura plantee de manera mucho más técnica el factor de fricción puesto que su evaluación mejorará las condiciones del diseño geométrico.

Existe una amplia gama de ensayos disponibles en el mercado, cada uno con particularidades que dependen del uso que pueda darse, como se mostró en la sección de ensayos sugeridos, se puede ver que el dispositivo ASTM 274 es un dispositivo integral, económico y práctico para la medición de la fricción, sin embargo, para cuantificar el factor de fricción de acuerdo a la lámina de agua presente es insuficiente pues la cantidad de agua que el vehículo imparte varía de acuerdo a la velocidad, existen dispositivos mucho más apropiados pero de uso mucho más complejo como el ASTM E 1859.

Actualmente es necesaria una revisión de la normatividad del medio latinoamericano para adaptarla a las nuevas investigaciones; en términos de hidro-climatología esta revisión debe hacerse partiendo de parámetros como los mencionados en esta investigación pues es necesaria una mejora a las condiciones en eventos extremos de pluviosidad en el país.

Se sugiere que respecto a la distancia de visibilidad de cruce se adecue a una gama más amplia de coeficientes de aceleración para la adecuada descripción de los vehículos de la actualidad, de acuerdo al vehículo de diseño predominante en la intersección, de igual manera se sugiere un estudio relacionado con fricción para intersecciones, pues la interacción entre vehículos es de vital importancia en el diseño de dichos elementos viales

La distancia de visibilidad de adelantamiento presenta una influencia directa de la fricción durante las maniobras de arranque y aceleración, pero dicha ecuación podría modificarse para que el planteamiento empírico del cual proviene fuese desarrollado a cabalidad.

Se sugiere la elaboración de un estudio similar al presentado para la obtención de coeficientes de fricción transversal, puesto que como se ve en la tabla 1 y la ecuación 14, estos dependen de la velocidad, de la oferta y demanda de fricción, además de la probabilidad de ocurrencia de un evento hidro-climático, dichas dependencias se generalizan, sin embargo los impactos por su presencia generan cambios importantes en la cuantificación de su valor.

ESTUDIOS FUTUROS

La presente investigación sugiere varios trabajos futuros como la implementación de vehículos que midan la oferta y demanda de fricción en países del trópico, un estudio preciso de parámetros geométricos de acuerdo a las variables presentadas en este estudio, la formulación de un modelo detallado de cuantificación hidrológica para la determinación de la “lámina de agua de diseño”, la Ejecución de pruebas a escala real o adaptación de vehículos que representen condiciones reales para el análisis y la modificación de parámetros teóricos y conceptuales en las ecuaciones de distancia de cruce, adelantamiento, encuentro y radio de curvatura.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue elaborado gracias a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, especialmente su grupo de investigación en vías y transporte (VITRA); al ingeniero de transporte Shuo Li del Departamento de Transporte de Indiana – División de Investigación y Desarrollo, y al estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, Santiago Ospina De Los Ríos; quienes aportaron para la ejecución de esta investigación, brindaron su disponibilidad, interés y amable contribución conceptual de manera puntual y generosa.

REFERENCIAS

AASHTO. (2011). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (6th Edition), American Association of State Highway and Transportation Officials, United States

Acevedo, L. (2009). Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático, Construcción Y Análisis De Curvas Intensidad-Frecuencia-Duración. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.

Agrawal, S. and Henry, J. (1977). Technique for evaluating hydroplaning potential of pavements. 633, Transportation Research Board, [en línea], 1–7

ASTM. (2009). Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester, ASTM international

- ASTM. (2011). Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire, E274/E274M, ASTM international
- ASTM. (2015). Standard Test Method for Testing Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter, ASTM international
- ASTM. (2013). Standard Test Method for Friction Coefficient Measurements Between Tire and Pavement Using a Variable Slip Technique, ASTM international
- Chow, V. Maidment D, Mays L (1994). Hidrología aplicada. Traducción a la primera edición, McGraw Hill. Bogotá, Colombia.
- Fwa, T. F., y Ong, G. P. (2008). Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Modeling. Journal of Transportation Engineering [en línea], 134(5), 182–190.
- Hall, J. Smith, K. Titus-Glover, Wambold, J., Yager, T. Rado, (2009). Guide for Pavement Friction. ational Cooperative Highway Research Program
- Horne, W. B., Yager, T. J., y Ivey, D. L. (1986). Recent studies to investigate effects of tire footprint aspect ratio on dynamic hydroplaning speed. The tire pavement interface. ASTM STP 929, M. G.
- Horne, W. y Tanner, J. (1969). Joint NASA-British Ministry of Technology skid correlation study: Results from American vehicles. NASA SP-5073, National Aeronautics and Space Administration, 325–360
- INVIAS. (2008). Manual de diseño geométrico de carreteras de Colombia, Instituto Nacional de vías, Colombia
- Ju, F., Fwa, T. F., y Ong, G. P. (2013). Evaluating Wet Weather Driving Benefits Of Grooved Pavements, , 287–293.
- Li, S., Noureldin, S., y Zhu, K. (2003). Upgrading the indot pavement friction testing program. West Lafayette, Indiana.
- Posada, J., Sánchez, L., y Zapata, J. (2014). Conceptos para la incursión de carreteras multicarril en Colombia. Actas del XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, 11-13 Junio 2014, Santander.
- Rose, J., y Gallaway, B. (1977). Water depth influence on pavement friction., 491– 506.
- Témez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección general de Carreteras, Madrid.