



Artículo de investigación

Propuesta de radios de giro para el diseño vial urbano en Colombia, caso camiones articulados

Proposed turning radii for urban road design in Colombia, case of articulated trucks

Elkin Darío Cañón Buitrago¹, Wilson Ernesto Vargas Vargas² y Adriana Marcela Benavidez Zambrano³

Para citar este artículo: Cañón-Buitrago, E.D., Vargas-Vargas, W.E. & Benavidez-Zambrano, A.M. (2021). Propuesta de radios de giro para el diseño vial urbano en Colombia, caso camiones articulados. Revista de Topografía Azimut Vol. 11 Núm. 1. pp XX-XX.

Fecha de Recepción: 01 de marzo de 2020 – Fecha de Aceptación: 30 de diciembre de 2020.

Resumen

Actualmente Colombia no cuenta con una normativa propia que permita establecer los radios de giro de los vehículos articulados existentes que circulan a nivel nacional y más específicamente a nivel urbano, para elaboración de diseños. Los radios empleados actualmente son los contemplados por la normativa AASHTO 2004, los cuales presentan cierta diferencia con respecto al parque automotor propio de Colombia. Por otro lado, se debe garantizar el espacio necesario para la maniobra de giro de estos vehículos, sin tener

¹ Tecnólogo en Topografía e ingeniero topográfico; especialista en Diseño de Vías Urbanas, Tránsito y Transporte; Msc. Infraestructura Vial. Docente cátedra Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente hora cátedra Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: elkpop2433@gmail.com.

² Tecnólogo en Topografía e ingeniero topográfico; especialista en Gerencia de Recursos Naturales; Msc. Ingeniería-Transporte. Docente planta Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente hora cátedra Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Estudiante Doctorado Universitat Politècnica de València. Correo electrónico: wvargas@udistrital.edu.co

³ Tecnóloga en Construcciones Civiles e Ingeniera Civil; especialista en Gerencia de Integral de Obras. Docente hora cátedra Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: juana.ing@gmail.com

que recurrir a maniobras adicionales, garantizando operaciones constantes y reduciendo en proporciones importantes las congestiones vehiculares.

El presente artículo plantea una metodología que permita dar solución a una de las principales problemáticas en cuanto a operación vehicular que a nivel urbano se presenta, los radios de giro requeridos y las dimensiones de los vehículos articulados C3-S2 y C3-S3, que circulan a nivel urbano. A partir de dichas dimensiones, y con estudios de campo, se determinan los respectivos radios de giro y sus plantillas correspondientes, con el fin de complementar el parque automotor existente en Colombia, para optimizar y mejorar algunos diseños viales en el país.

Palabras clave: diseño geométrico, Inviás, radios de giro, tractocamión, vehículos articulados, *off-tracking*.

Abstract

Currently, Colombia does not have its own regulations that allow establishing the radios of the existing articulated vehicles that circulate at the national level and more specifically at the urban level, for the elaboration of designs. The radios currently used are those covered by the AASHTO 2004 regulations, which present a certain difference with respect to the Colombian automotive fleet, on the other hand, the necessary space must be guaranteed for the turning maneuver of these vehicles, without having to resort to additional maneuvers, guaranteeing constant operations and reducing vehicle congestions in significant proportions. This article proposes a methodology that allows to solve one of the main problems in terms of vehicular operation at urban level, the required radii of rotation and the dimensions of articulated vehicles C3-S2 and C3-S3, which circulate at the urban level, based on these dimensions and with field studies, determine the respective radii of rotation and their corresponding templates, in order to complement the existing automotive fleet in Colombia, to optimize and improve some road designs in the country.

Keywords: geometric design, Inviás, turning radii, tractor, articulated vehicles, off-tracking.

Introducción

Actualmente en Colombia se ha ido intensificando el uso de los vehículos articulados para el transporte de mercancía y carga pesada, a diferentes centros de distribución desde y hacia el centro de la capital, dada su configuración de semirremolque. Las velocidades manejadas por estos generan movimientos y operaciones en algunos casos no seguros, incluso llegando a alterar la operación normal de las vías a nivel urbano, con movimientos no permitidos e invasivos, ocasionando atascos y disminuyendo los niveles de servicio de las vías, no solo puntualmente sino localmente.

Los radios de giro necesarios para la operación óptima de estos vehículos articulados dependen de elementos geométricos propios de la vía, los ángulos de incidencia y las dimensiones entre ejes; factores que deben ser estudiados para mejorar en cierto modo la operación y maniobra de los vehículos en las calles de nuestras ciudades.

A lo largo de este artículo, se detallan las dimensiones propias de estos vehículos y, a partir de estas, se determinan los radios de giro mínimo requeridos para la elaboración, mantenimiento o cualquier tipo de intervención o mejora que a futuro se tenga contemplado realizar, con el fin de mejorar la operación vial y garantizar la óptima circulación de los vehículos articulados en vías urbanas.

Definición de *off-tracking*

Es el fenómeno que ocurre cuando los ejes de arrastre de un vehículo en movimiento migran cada vez más hacia el centro de la curva hasta que, finalmente, alcanzan un desplazamiento máximo en estado estable de la ruta de alineación de la dirección. El seguimiento de estado estable se logra cuando las extensiones proyectadas de los ejes pasan

a través del centro de la curva. Para giros de 120 grados o menos, la desviación máxima observada rara vez alcanzará por completo la del estado estable; sin embargo, las relaciones geométricas que existen en la condición de estado estable hacen posible cuantificar fácilmente y utilizar este rendimiento en el peor de los casos como base de comparación para diversas configuraciones de vehículos (Deligiannis *et al.*, 2006). La fórmula de desvío del Western Highway Institute (WHI) proporciona un método relativamente sencillo de aproximar las expectativas de estado estacionario para cualquier vehículo o combinación. Sin embargo, las dimensiones del vehículo requeridas y las implicaciones de su uso en la fórmula deben entenderse completamente para garantizar que los cálculos se realicen e interpreten correctamente (Alt, n.d.).

El desvío es la trayectoria del exterior del neumático exterior en un eje trasero o posterior que se desvía hacia adentro hacia el centro de un giro desde el recorrido circular del lado exterior del neumático delantero exterior, mientras que la combinación del vehículo o remolque está girando (Erkert, Sessions y Layton, 1989).

Fórmula WHI de desvío

El desvío es la diferencia en los radios desde el centro de giro hasta la línea central del vehículo en los ejes más delantero y trasero de un vehículo, y representa el aumento más allá de la pista tangente ocasionada por un giro.

Como se aprecia en la figura 1, la línea central del vehículo tomada en combinación con las líneas de radio adyacentes desde el centro de giro forma una serie de tres ángulos rectos. La fórmula de seguimiento SAE, a menudo referenciada, se basa en el teorema de Pitágoras, donde el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. Aunque simple en teoría, las fórmulas específicas del vehículo proceden de una base que es menos que obvia para un vehículo de dos ejes y se vuelve cada vez más compleja a medida que se consideran ejes adicionales.

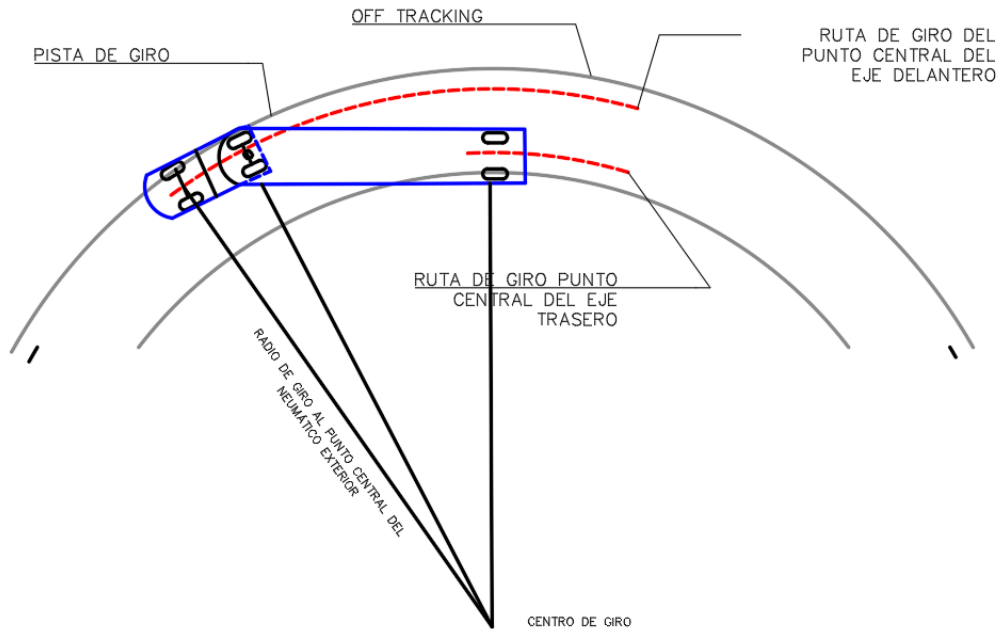


Figura 1. Geometría típica de desvío

La fórmula SAE para el seguimiento de un solo vehículo de dos ejes es:

$$OT = \left(WB^2 + \left\{ \left[(TR^2 - WB^2)^{\frac{1}{2}} - HT \right]^2 \right\}^{1/2} - \left[(TR^2 - WB^2)^{\frac{1}{2}} \right] + HT \right)$$

Donde

OT = *off-tracking*.

WB = distancia entre ejes.

TR = radio de giro de la rueda delantera exterior.

HT = trazado de la rueda delantera /2.

La complejidad de la fórmula SAE se deriva de la necesidad de tratar con centros de giro ubicados en la línea central del vehículo, en lugar de en la trayectoria del radio de giro (Alt, n.d.).

Etapas y materiales

El desarrollo del estudio partió de las siguientes etapas: a) determinación de los vehículos de diseño; b) detalle del dimensionamiento de los vehículos articulados C3S2 y C3S3; c) medición y control de velocidades; d) pruebas en plataformas adecuadas; e) demarcación de trayectorias de giro; f) levantamiento topográfico de las trayectorias realizadas; g) cálculo de los radios de giro a partir de las mediciones, y h) simulación de radios mediante el *software Autodesk®Vehicle Tracking*.

Determinación de los vehículos de diseño

Para determinar el vehículo de diseño, se tuvo en cuenta el parque automotor que circula actualmente por el país; sin embargo, dado que el ingeniero Mario Arturo Rincón Villalba en su tesis *Determinación de radios de giro para diseños viales urbanos en Colombia*, realizó el estudio pertinente para establecer las dimensiones propias de los vehículos livianos, busetas y camiones C2, propios de nuestro país y a su vez determinó los radios de giro y sus respectivas plantillas para velocidades máximas de 15 km/h a diferentes ángulos de giro, se procedió a establecer los vehículos articulados C3S2 y C3S3 como vehículos de diseño, para así completar dicho estudio y conocer los radios mínimos requeridos, para una mejor operación a nivel urbano.

Dimensionamiento de los vehículos C3S2 y C3S3

La Resolución 004100 de 28 de diciembre de 2004, emitida por el Ministerio de Transporte, define el vehículo C3S2 como un tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes, y al vehículo C3S3 como un tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes, estableciendo una longitud máxima de 18,5 metros, una altura máxima de

4,4 metros y un ancho máximo de 2,6 metros, para ambos vehículos. Sin embargo, mediante este estudio, se determinaron dimensiones de estos vehículos teniendo en cuenta medidas directas sobre los mismos.

Medición y control de velocidades

Durante esta etapa fue necesario establecer la velocidad máxima a la que los vehículos giraron a ángulo de 180° , ya que este es el movimiento más crítico a nivel de intersecciones. Para dicho ejercicio, se empleó un radar que arrojaba las velocidades puntuales de dichos movimientos, mediante el principio Doppler, el cual consiste en el reflejo de una onda de radio sobre un objeto en movimiento y la variación en la frecuencia que esta experimenta, debido a la velocidad del objeto. La velocidad media de los vehículos analizados fue de 13 km/h, la velocidad máxima fue de 15 km/h.

Zona de prueba

Las medidas a los giros realizados con el tractocamión C3S3 fueron tomadas en el municipio de Sopó (Cundinamarca), en las instalaciones de la planta de Baldosines San Lorenzo, ubicada en la vía Tocancipá-Sopó, a la altura de la vereda Centro Alto. Esta plataforma cumplía con condiciones mínimas requeridas para el giro de 180° a una velocidad máxima de 15 km/h. De igual manera, la superficie de rodadura era en concreto, garantizando el óptimo desarrollo durante el recorrido del tractocamión y sin obstáculos o condiciones estéticas que impidieran su marcha normal. Finalmente, y uno de los factores más importantes, dicha zona corresponde a una zona privada, sin constante tráfico vehicular, lo que un estudio ágil y preciso.

Demarcación de trayectorias de giro

Para garantizar la demarcación sobre las plataformas, fue necesario extender, a medida que los vehículos realizaban las maniobras, óxido de calcio en los ejes externos e internos,

asegurando las trayectorias recorridas. En las figuras 2 y 3, se observa la demarcación de las trayectorias realizadas por el vehículo C3S3 y C3S2, respectivamente.



Figura 2. Trayectoria de giro tractocamión C3S3



Figura 3. Trayectoria de giro tractocamión C3S2

Determinación de radios de giro

Una vez generadas las coordenadas del levantamiento topográfico de cada una de las maniobras realizadas, se exportaron en formato .CSV, para posteriormente cargarlo en el *software AutoCAD Civil 3D* versión 2018, como cartera de puntos, y se unieron mediante polilíneas, recreando las trayectorias realizadas en campo. Se trazaron los radios que corresponden a la trayectoria descrita por la rueda delantera derecha si el vehículo gira en sentido opuesto a las manecillas del reloj, o en caso contrario, representa la rueda delantera izquierda, este radio se determinó a partir de círculos inscritos en la trayectoria, ajustando el más próximo y basado en el levantamiento topográfico hecho en campo.

Modelación software Vehicle Tracking

Este *software*, relacionado con el transporte, incluye funciones de predicción de ruta y trayectorias de vehículos rígidos y articulados entre otras de diseño, como parqueaderos y glorietas. Permite a los profesionales, diseñadores y planificadores modelar las trayectorias y evaluar los movimientos de los vehículos a emplear en diseños geométricos de vías, a

partir de las dimensiones que estos tengan. Una vez definidas las características y dimensiones de los tractocamiones, fue necesario el uso de este *software* para definir y comparar la plantilla de giro y los posibles ángulos de giro (30°, 60° 90° 120°, 150° y 180°), comunes en intersecciones urbanas.

Una vez creados los vehículos de diseño en este *software*, se procedió a generar las plantillas de giro a partir de las dimensiones ingresadas.

Resultados

Una vez concluido el estudio, se elaboraron las tablas resumen de los radios de giro a 90° y 180°, a partir de las cuales se realizaron las plantillas propuestas para los vehículos articulados C3S2 y C3S3, existentes en Colombia para velocidades máximas de 15 km/h (tabla 1).

Tabla 1. Resultados giro 180° tractocamión C3S2

Tractocamión	Radio externo	Radio interno
C3S2-1	13.276	7.442
C3S2-2	13.362	7.369
C3S2-3	13.297	7.386
C3S2-4	13.365	7.325
C3S2-5	13.286	7.408
Estadística descriptiva		
Media	13.317	7.386
Mediana	13.297	7.386
Varianza de la muestra	0.002	0.002
Desviación estándar	0.043	0.044
Tamaño de la muestra		
Desviación estándar	0.043	0.044
Error máx. tolerable "d"	0.050	0.050
Constante "Z"	1.960	1.960
Tamaño muestral "n"	2.83	2.95

De igual manera se muestran los resultados obtenidos para giros de 90° con su respectiva estadística descriptiva (tabla 2).

Tabla 1. Resultados giro 90° tractocamión C3S2

Tractocamión	Radio externo	Radio interno
C3S2-1	12.480	7.119
C3S2-2	12.550	7.168
C3S2-3	12.543	7.175
C3S2-4	12.513	7.222
C3S2-5	12.464	7.235
Estadística descriptiva		
Media	12.510	7.184
Mediana	12.513	7.175
Varianza de la muestra	0.001	0.002
Desviación estándar	0.038	0.046
Tamaño de la muestra		
Desviación estándar	0.038	0.046
Error máx. tolerable "d"	0.050	0.050
Constante "Z"	1.960	1.960
Tamaño muestral "n"	2.20	3.31

Tabla 2. Resultados giro 180° Tractocamión C3S3

Tractocamión	Radio externo	Radio interno
C3S3-1	11.265	5.383
C3S3-2	11.257	5.335
C3S3-3	11.333	5.406
C3S3-4	11.264	5.383
C3S3-5	11.292	5.361
Estadística descriptiva		
Media	11.282	5.374
Mediana	11.265	5.383
Varianza de la	0.001	0.001

muestra		
Desviación estándar	0.031	0.027
Tamaño de la muestra		
Desviación estándar	0.031	0.027
Error máx. tolerable "d"	0.050	0.050
Constante "Z"	1.960	1.960
Tamaño muestral "n"	1.52	1.12

Tabla 3. Resultados giro 90° tractocamión C3S3

Tractocamión	Radio externo	Radio interno
C3S3-1	11.093	5.254
C3S3-2	11.085	5.206
C3S3-3	11.161	5.277
C3S3-4	11.092	5.254
C3S3-5	11.124	5.233
Estadística descriptiva		
Media	11.111	5.245
Mediana	11.093	5.254
Varianza de la muestra	0.001	0.001
Desviación estándar	0.032	0.027
Tamaño de la muestra		
Desviación estándar	0.032	0.027
Error máx. tolerable "d"	0.050	0.050
Constante "Z"	1.960	1.960
Tamaño muestral "n"	1.557	1.112

Una vez realizada la simulación, se procedió a comparar los datos obtenidos mediante el *software*, con los alcanzados en este estudio; así, se encontraron las diferencias mostradas en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación resultados *Vehicle Tracking* vs. Estudio

Radios de giro 180°				
Vehículo	Método	Velocidad	Radio externo	Radio interno
C3S2	<i>Vehicle Tracking</i>	15 km/h	13.744	3.186
	Estudio		13.317	7.386
	Diferencias		0.427	4.2
C3S3	<i>Vehicle Tracking</i>	15 km/h	12.324	3.240
	Estudio		11.282	5.374
	Diferencias		1.042	2.134

A partir de las mediciones directas realizadas en campo, se obtuvieron las dimensiones de los vehículos de estudio que se ilustran en las figuras 4 y 5.

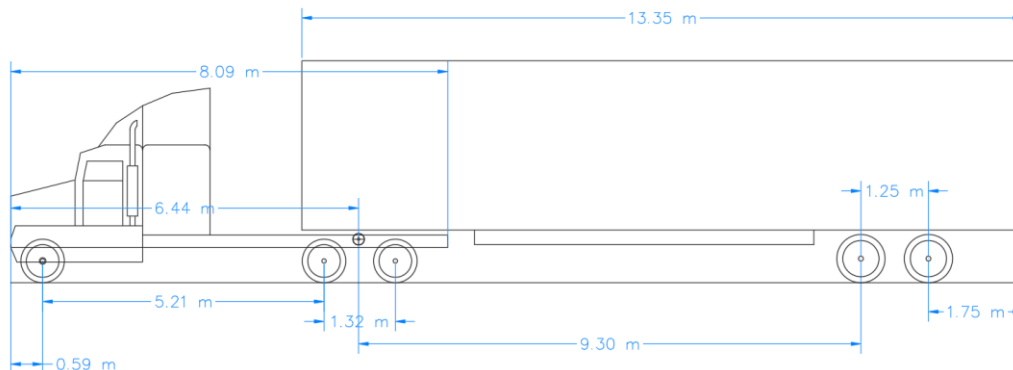


Figura 4. Dimensiones tractocamión C3S2

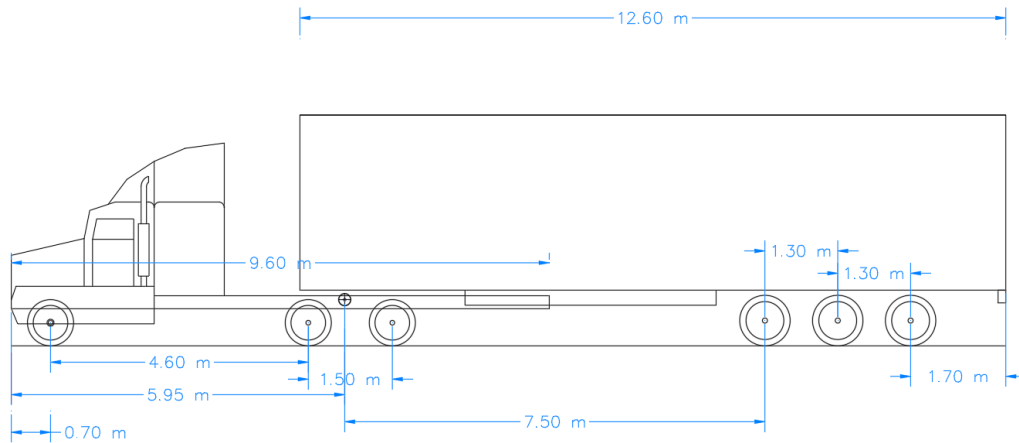


Figura 5. Dimensiones tractocamión C3S3

Se realizó una comparación entre las dimensiones obtenidas en el estudio y las contempladas en el *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008*, y se obtuvieron los resultados que se detallan en la tabla 6.

Tabla 4. Comparación dimensiones vehículos de estudio vs. Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008

Dimensiones tractocamiones			
Vehículo	Dimensiones estudio (m)	Dimensiones MDGC 2008 (m)	Diferencia (m)
C3S2	18.74	20.89	2.15
C3S3	17.75	NR	-

Nota: MDGC: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008. - NR: no registra, ya que el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008 no contempla este vehículo

Como se observa, existe una diferencia de 2,15 metros en el vehículo C3S2; esto se puede deber a la configuración que presentan los vehículos de estudio y que por supuesto están contempladas dentro del vehículo tipo que considera el *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras 2008*. Por otro lado, en este manual no se presentan las dimensiones del vehículo C3S3, a pesar de que la Resolución 004100 del 28 de diciembre de 2004, es decir, cuatro años antes de la publicación del Manual de Carreteras sí contempló la circulación de este tipo de vehículos por el territorio nacional, por lo cual no se logró establecer diferencia en las dimensiones.

Concluido el estudio, se plantearon las respectivas plantillas de giro, las cuales podrán ser empleadas para determinar los radios de giro requeridos para los vehículos en estudio (C3S2 y C3S3), aclarando que son radios mínimos, ya que, en el mercado automotor, los fabricantes propenden por construir accesorios (tráiler – semirremolques) no estandarizados y sujetos a modificaciones, por lo cual no se puede hablar de un tipo de vehículo articulado genérico para los diseños viales.

Tractocamión C3S2

En las figuras 6 y 7, se observan las respectivas plantillas propuestas para giros a 90 y 180° respectivamente, para una velocidad máxima de 15 km/h.

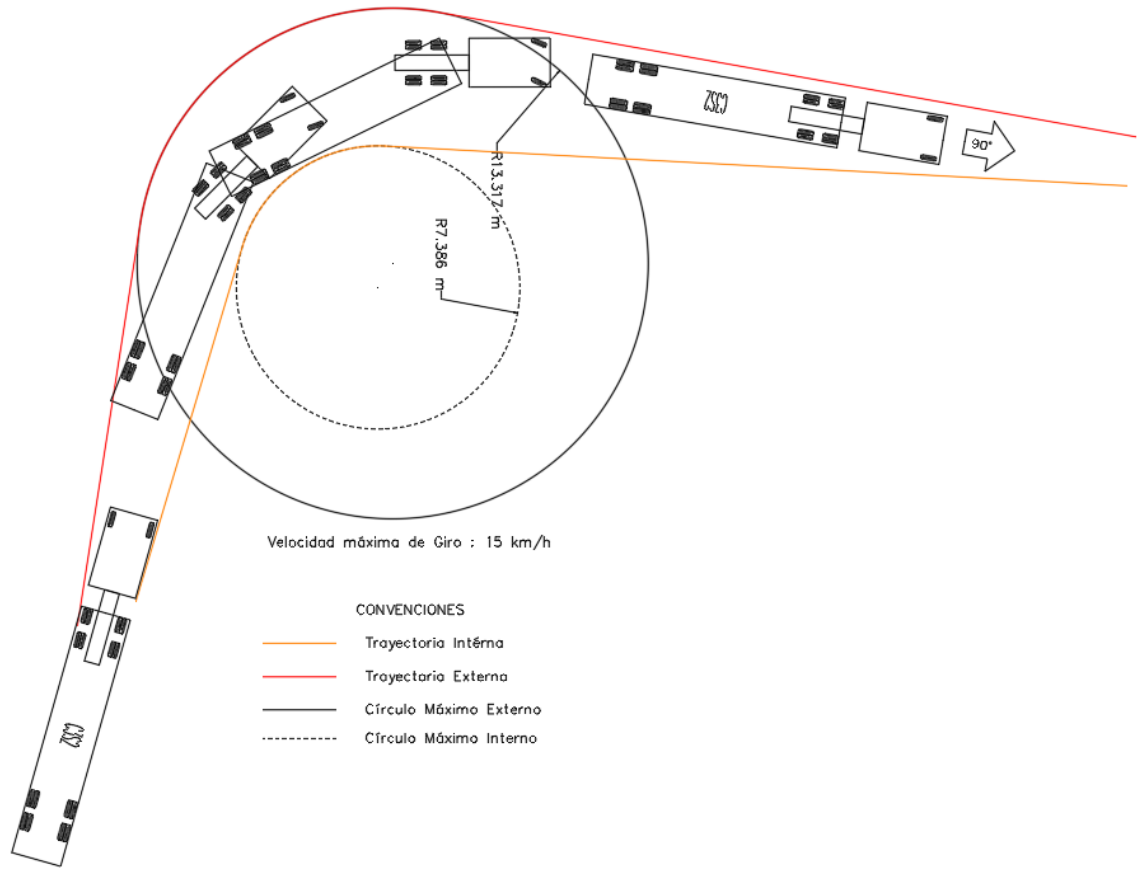


Figura 6. Especificación propuesta (C3S2 giro 90°)

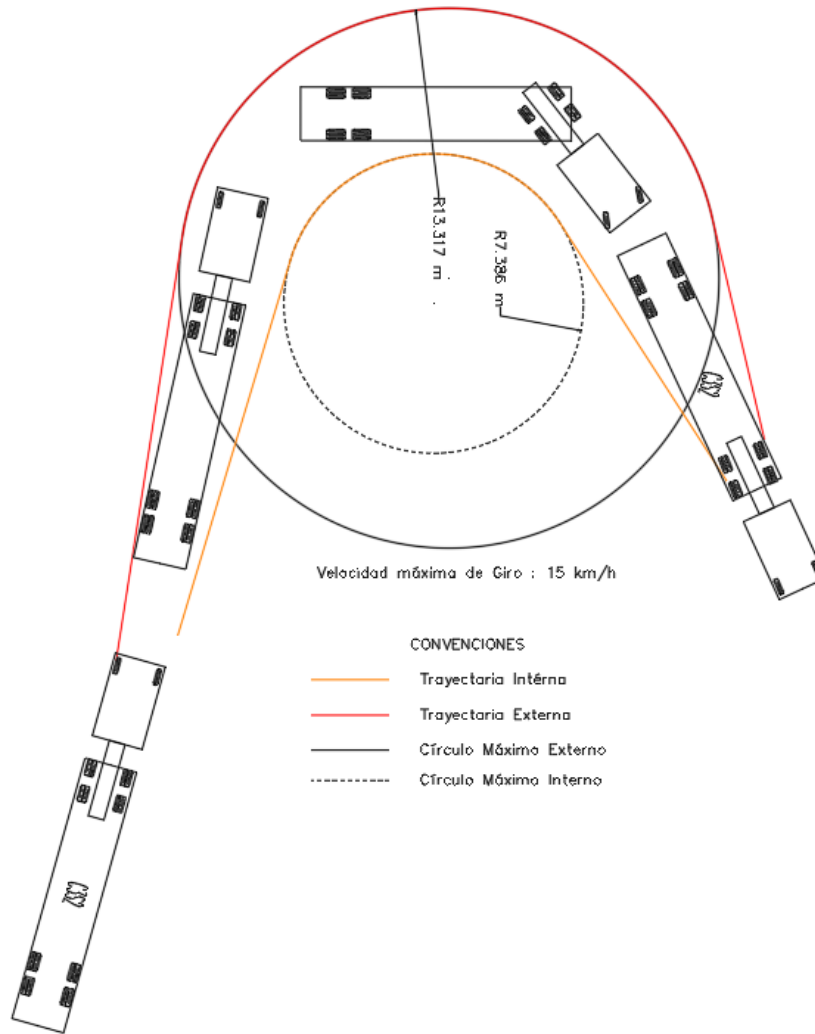


Figura 7. Especificación propuesta (C3S2 giro 180°)

Tractocamión C3S3

En las figuras 8 y 9, se presentan las plantillas propuestas para giros a 90° y 180°, para velocidades máximas de 15 km/h.

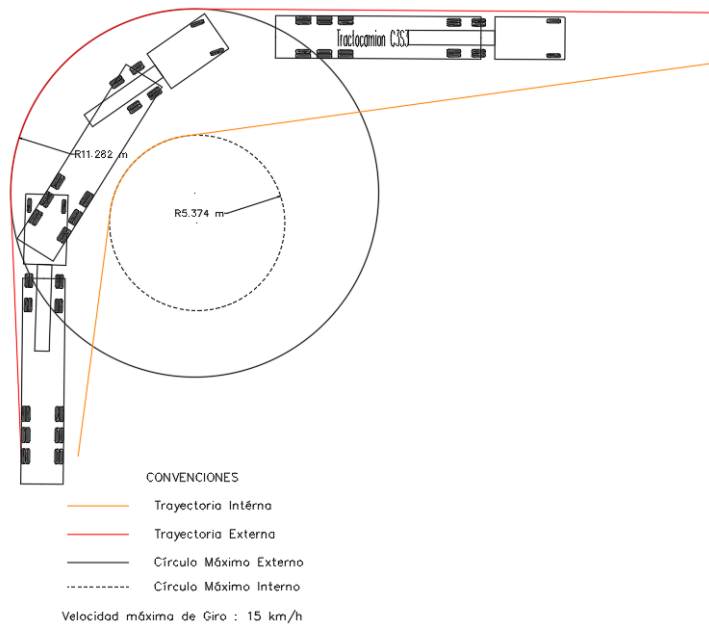


Figura 8. Especificación propuesta (C3S3 giro 90°)

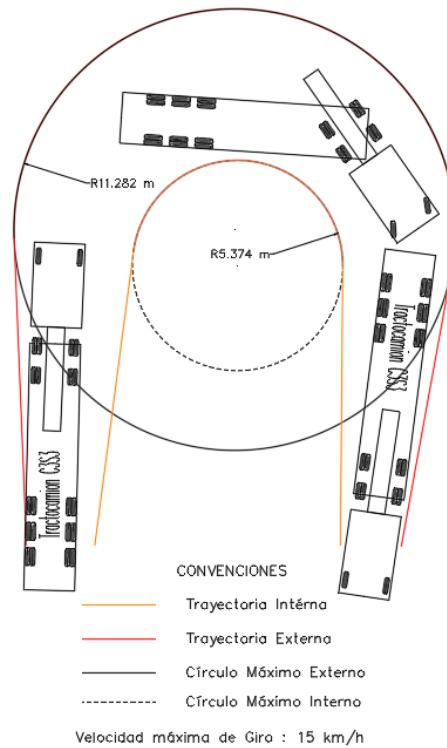


Figura 9. Especificación propuesta (C3S3 giro 180°)

Conclusiones

Se definió el concepto de *off-tracking* (desvío) para ilustrar las características únicas de la fórmula WHI, la cual produce un valor máximo con la línea central del vehículo. Es importante entender la relación existente entre el ancho de vía del eje delantero y el radio de giro, además de la velocidad con la que la maniobra de giro es ejecutada.

Se determinaron satisfactoriamente las dimensiones específicas de los tractocamiones C3S2 y C3S3, vehículos muy comunes en áreas urbanas. Actualmente, este último no se contempla en el *Manual de Diseño de Carreteras de Colombia*, ni tampoco es mencionado en la normativa AASHTO; sin embargo, en el manual colombiano se menciona el tractocamión C3S2 y como vehículo de diseño, presenta dimensiones mucho más grandes que el mismo C3S3. De igual manera, los radios contemplados son mucho más amplios, ya que es un vehículo adaptado de norma AASHTO 2004.

Dada la variedad de combinaciones y dimensiones existentes en la mayoría de los semirremolques empleados en el país, es complejo definir por estándares los vehículos articulados; sin embargo, durante el estudio, se establecieron dimensiones tipo, garantizando la óptima operabilidad y libre maniobra a nivel urbano, sin llegar a generar conflicto con otros usuarios de la vía.

Se elaboró satisfactoriamente las respectivas plantillas de radios de giro, para ángulos de incidencia a 90° y 180° para los vehículos articulados C3S2 y C3S3, objeto de este estudio, aclarando que los resultados obtenidos se garantizan a una velocidad de maniobrabilidad máxima de 15km/h, respondiendo de igual manera condiciones de seguridad y comodidad en la vía.

Al comprobar los radios de giros obtenidos mediante el *software Autodesk Vehicle Tracking*, fue posible analizar las diferencias generadas (en algunos casos mayores a 4 metros), con el estudio, diferencias que se pueden atribuir a factores propios que emplea el

software para generar estos resultados (factor de seguridad, velocidad constante, factor humano no considerado). Pero es importante aclarar que los datos capturados en campo y la metodología empleada para capturar dicha información garantiza maniobras propias del conductor, condiciones de la vía y velocidades no superiores a 15 km/h, lo cual supone que son factores aún más relevantes e importantes a tener en cuenta, a la hora de generar algún tipo de diseño, mejora o mantenimiento en las vías tanto urbanas como rurales.

Referencias bibliográficas

Alt, K. I. L. H. I. (n.d.). Use of the WHI Offtracking Formula. 45–53.

American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO). (2011). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. In ResearchGate. <https://doi.org/265571500>

Deligiannis, V., Davrazos, G., Manesis, S. y Arampatzis, T. (2006). Flatness conservation in the n-trailer system equipped with a sliding kingpin mechanism. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 46(2), 151-162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-006-9056-2>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTES. (2010). Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. 392. <https://doi.org/IPR>. Publ. 740

Erkert, T. W., Sessions, J. y Layton, R. D. (1989). A Method for Determining Offtracking of Multiple Unit Vehicle Combinations. *Journal of Forest Engineering*, 1(1), 9–16. <https://doi.org/10.1080/08435243.1989.10702610>

Highway, S. (2004). Geometric Design of Highways and Streets American Association of State Highway A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Viceministerio de Transportes, & Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013). Diseño Geométrico DG-2013. 328. <https://doi.org/ISBN No. 978-612-304-192-2>