

Impacto al nivel de servicio de rotondas en Cuenca, producto de cambios geométricos

Esteban Ortega^{1,2} , *Joao Silva*² , *Jaime Guzmán*¹ 

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Av. Loja, Cuenca, Ecuador.

² Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Politécnico de Leiria, R. Gen. Norton de Matos, 2411-901, Leiria, Portugal.

Autores para correspondencia: estban_ortega@hotmail.com

Fecha de recepción: 15 de julio de 2017 - Fecha de aceptación: 20 de septiembre de 2017

ABSTRACT

Ecuador still does not possess technical design guidelines for roundabouts in line with the latest international standards. The current norm uses concepts for geometric parameters and capacity calculation that were discarded in the United States and Europe in the 60s. This situation led to the construction of heterogeneous roundabouts that generally have limitations in operational performance and/or safety issues. This paper presents the comparison of five well-regarded guidelines or manuals of geometric design for roundabouts in urban areas. The geometric design parameters that are used as a measure to decrease and homogenize vehicle speeds, and their impact on the level of service and capacity are analyzed. Based on the conducted analysis two city intersections were redesigned. The new solutions provided an improvement of 60 to 90% of the geometric design parameters according to internationally accepted standards. Circulation speeds are potentially reduced through, namely the increase of deflection. In terms of capacity there should be a small increase that consequently reduced the delays, thus slightly improving the level of service. Therefore, and in resume, the geometric design proposed parameters and redesigns should reduce the risk and severity of accidents without negatively affecting the current operational characteristics.

Keywords: Roundabouts, geometric parameters, circulation speed, accidents, level of service.

RESUMEN

Ecuador no posee una guía técnica de diseño para rotondas que se encuentre en línea con los últimos estándares internacionales. La norma vigente utiliza conceptos para los parámetros geométricos y el cálculo de la capacidad que fueron descartados en Estados Unidos y Europa en los 60s. Esta situación ha generado la construcción de rotondas homogéneas las cuales generalmente tienen limitaciones en el rendimiento operacional y/o problemas de seguridad. Este artículo presenta la comparación de cinco normativas bien respetadas, o manuales de diseño geométrico, para rotondas en áreas urbanas. Se analizaron los parámetros de diseño geométrico que se utilizan como medida para disminuir y homogenizar las velocidades de los vehículos, y su impacto en el nivel de servicio y la capacidad. Con base en el análisis realizado, se rediseñaron dos intersecciones de la ciudad. Las nuevas soluciones proporcionaron una mejora del 60 al 90% de los parámetros de diseño de acuerdo con normas internacionalmente aceptadas. Las velocidades de circulación se reducen potencialmente producto del aumento en la deflexión. En términos de capacidad, se evidenció un pequeño aumento el cual redujo las demoras, mejorando levemente el nivel de servicio. Por lo tanto, y, en resumen, los parámetros y diseños propuestos para el diseño geométrico deberían reducir el riesgo y gravedad de los accidentes sin afectar negativamente las características operacionales.

Palabras clave: Rotondas, parámetros geométricos, velocidad de circulación, accidentes, nivel de servicio.

1. INTRODUCCIÓN

En las intersecciones se generan los mayores problemas de congestión y accidentalidad, convirtiéndose en sitios críticos de una red vial urbana (Nueman *et al.*, 2003; Garber & Hoel, 2009). Una solución son las rotondas, capaces de generar flujos lentos y suaves, disminuyendo la velocidad y eliminando los puntos de conflicto, especialmente a 90 grados (se elimina los giros a la izquierda) (Daniels, Brijs, Nuyts, & Wets, 2010; Bastos & Mala, 2010). Del análisis de 28 estudios en 8 diferentes países se han demostrado que las rotondas reducen entre el 30 y el 50% de las lesiones causadas por los accidentes (Hydén & Várhegyi, 2000; Elvik, 2003). Las rotondas también son capaces de reducir el 65% de accidentes con consecuencias fatales (Rodegerdts *et al.*, 2010). En lo que respecta a la movilidad, producen mayor capacidad que las intersecciones señalizadas e incluso iguala o supera la capacidad de las intersecciones semaforizadas (Rodegerdts *et al.*, 2010).

Por las ventajas que presentan se han popularizado, es así como en Francia, en los últimos 20 años, han pasado de 500 a 25,000 rotondas (Guichet, 2005), en Estados Unidos han pasado de 100 en el año 1997 a 1,000 en el año 2007 (Montella, Truner, Chiaradonna, & Albridge, 2012). Situación similar se presenta en la ciudad de Cuenca, se determinó con la ayuda del Plan de Movilidad y Espacios Públicos (GAD de Cuenca, 2015) que en el año de 1967 la ciudad contaba con 4 rotondas, actualmente están construidas 40, de las cuales todas son categorizadas como rotondas múltiples¹; estas se han colocado en la unión de vías importantes como: expresas, arteriales y colectoras; al analizar la Intensidad Media Diaria² (IMD) se observa que por las rotondas circulan la mayor cantidad de vehículos en la red, presentándose niveles de saturación (volumen/capacidad) entre el 80 y 100% (GAD de Cuenca, 2015). Al evaluar los lugares de mayor incidencia de accidentes en los años 2014 (Consejo de Seguridad Ciudadana, 2014) y 2015 (Consejo de Seguridad Ciudadana, 2015), se tiene que el 62% de los lugares de mayor incidencia de choques y el 33% de los lugares de mayor incidencia de atropellos se presentan en rotondas, convirtiéndose en lugares relevantes para la seguridad y operación vehicular de la ciudad.

Los factores geométricos influyen en el 60% de los accidentes generados en las rotondas (Montella, 2011); el objetivo de estos factores es garantizar la disminución de la velocidad de circulación, para ello, en los últimos años se han emitido normas o manuales en donde se presentan valores geométricos que han logrado disminuir los accidentes (Bastos & Mala, 2010); en Chile se ha demostrado que una falta de normas o parámetros genera graves problemas en la operación y seguridad, produciendo intersecciones heterogéneas (Thenoux & Villasante, 2003).

El Ecuador en el año 2003 emite las “Normas de Diseño Geométrico de Carreteras” (MOP, 2003); el fundamento de diseño que utiliza es la “longitud de entrecruzamiento”; el cual fue introducido en la primera guía de diseño de rotondas llamada “rotary”, elaborada en 1942 y publicada por la AASTHO (Wang & Yang, 2012). El concepto es que grandes Diámetros del Círculo Inscrito (DCI) dan largas secciones de entrecruzamiento y por lo tanto mantienen altas velocidades y capacidad (Wang & Yang, 2012); pero este tipo de intersecciones generaban flujos discontinuos debido a la vigencia de la regla de prioridad de la derecha³, cuando el flujo en la entrada era predominante, se producían colas en los vehículos dentro del anillo de circulación que bloqueaban la intersección por completo, también generaban altas velocidades de circulación y por ende altos índices de accidentes; es así que en la década de los sesenta muchos países abandonaron el uso de estas intersecciones (Bastos & Mala, 2010).

El trabajo descrito en este documento estudia los parámetros geométricos establecidos en normas o manuales vigentes en diferentes países, para el diseño de rotondas simples y múltiples, inmersas en zonas urbanas, con el objetivo de recomendar parámetros que puedan ser utilizados en el diseño de rotondas para el Ecuador. Estos parámetros pretenden disminuir la velocidad de circulación y por lo

¹ Las rotondas múltiples poseen dos o más carriles de circulación y por lo menos una de las entradas con dos o más carriles de aproximación (Rodegerdts *et al.*, 2010).

² El número total de vehículos que atraviesa durante un año una determinada sección, dividido por 365 días, expresado en unidades de vehículos equivalentes. (GAD de Cuenca, 2015).

³ Los vehículos que circulan dentro del anillo deben ceder al paso a los vehículos que desean ingresar a la intersección. (Rodegerdts *et al.*, 2010).

tanto disminuir el número y severidad de los accidentes. Para determinar la efectividad de los parámetros propuestos, se utilizó como medida el Nivel de Servicio conocido por sus siglas en inglés LOS (Level of Service), ya que este es capaz de reflejar la calidad de operación vehicular en función de la percepción de los conductores (Cal, Reyes, & Cárdenas, 2007), para determinar el LOS es necesario también identificar una metodología de cálculo de la capacidad que refleje el impacto que generan los cambios geométricos en las rotondas, con lo cual se podrá determinar si los parámetros recomendados son aceptados por los usuarios.

2. METODOLOGÍA

Para evaluar el impacto que tienen los cambios geométricos en nivel de servicio de las rotondas, los siguientes pasos han sido considerados en este trabajo.

2.1. Parámetros geométricos

Se ha realizado un estudio bibliográfico de 5 diferentes normas o guías de diseño vigentes en países representativos, a las cuales se las comparó los valores referentes a rotondas simples⁴ y múltiples en zonas urbanas. Como principal documento se estableció el “Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária” (Bastos & Mala, 2010) el cual en el capítulo 6 hace énfasis en el diseño geométrico de rotondas para Portugal; como segundo documento se utilizó al vigente en Estados Unidos llamado “Roundabout: An Information Guide” (Rodegerdts *et al.*, 2010); el tercer documento seleccionado debido a la experiencia en rotondas es el manual de Reino Unido llamado “Design Manual for Roads and Bridges” (The Highways Agency *et al.*, 2007); el cuarto documento utilizado es el vigente en España llamado “Guía de Nudos Varios” elaborado a partir de la Orden Circular 32/2012 (Subsecretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, 2012); finalmente al no tener el Ecuador una norma actualizada de diseño para rotondas, se utilizó la normativa municipal conocida como “Normas Arquitectónicas y Urbanísticas”, aplicada para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) (Consejo Metropolitano de Quito, 2012).

Los documentos evaluados poseen diferentes estructuras de organización, para realizar una comparación correcta se agruparon los parámetros en 6 categorías: vehículo de diseño, anillo de circulación, entrada, salida, visibilidad y otros parámetros. La categoría de vehículo de diseño es la base de generación de los diferentes parámetros geométricos (Rodegerdts *et al.*, 2010), mientras que la visibilidad se encuentra directamente relacionada con la seguridad; en la categoría otros parámetros se presentan los factores de ajuste y optimización de la rotonda. En un análisis de 274 accidentes producidos entre los años 2003-2008, el 54% se produjo en la entrada de la rotonda, el 19% en el anillo de circulación y el 20% se produjo en la salida de esta (Montella, 2011). La mayor cantidad de accidentes en la entrada se presentan en rotondas simples, mientras que la mayor cantidad de accidentes en la salida y anillo de circulación se presentan en rotondas múltiples; por lo que es indispensable tratar estos parámetros de forma independiente, agrupándolos en las categorías de entrada, salida y anillo de circulación con lo cual se tendrán disposiciones geométricas más detalladas.

A continuación, se explican cada categoría evaluada y se exponen los parámetros geométricos recomendados para el Ecuador, cada uno de los parámetros resultó del análisis comparativo de los documentos referidos (exceptuando la normativa del DMQ ya que posee valores que difieren significativamente del resto de documentos), así como de la sensibilidad que los autores tienen de la realidad de la infraestructura y condiciones de circulación ecuatoriana; en este sentido los valores propuestos pueden ser ajustados con base en estudios posteriores focalizados; las tablas que sirvieron para la obtención de estos parámetros se encuentran en la tesis que ha servido de base para la elaboración de este documento (Ortega, 2017).

⁴ Su característica principal es que posee un carril de aproximación y un carril de circulación, se diferencia de las minirotondas ya que estas poseen DCI mayores entre 27-55 m, los cuales se colocan en función del vehículo de diseño; los diámetros de la isla central son superiores a los 4 metros, en donde esta es materializada de tal forma que impide el paso de cualquier tipo de vehículo (Rodegerdts *et al.*, 2010).

- Vehículo de diseño: Los documentos estudiados muestran valores semejantes entre los 15-16.5 m de longitud para el vehículo de diseño; cuando exista incertidumbre acerca del tipo de vehículo se recomienda realizar un análisis de tráfico. El vehículo de diseño debe ser capaz de atravesar la intersección sin ningún inconveniente.
- Isla Central: El objetivo es brindar una adecuada trayectoria de las aproximaciones generando movimientos homogéneos en todas las entradas; un correcto posicionamiento de la isla evita que los vehículos realicen trayectorias rectas las cuales producen pérdida de la percepción del conductor del derecho de paso (Bastos & Mala, 2010). Un adecuado dimensionamiento del radio de la isla central y del DCI permite acomodar los vehículos largos manteniendo a la vez velocidades bajas en los vehículos livianos (Rodegerdts *et al.*, 2010). Un valor del DCI insuficiente genera un aumento de la velocidad en la entrada por la incapacidad de los conductores de identificar la rotonda (Bastos, Santos, Vasconcelos, Seco & Silva, 2014), pero un valor elevado produce una intersección tipo giratoria⁵ con un aumento en la velocidad dentro del anillo de circulación y un incremento en la severidad de los accidentes (Daniels *et al.*, 2010). En la Tabla 1 se presentan los valores recomendados a utilizar en el Ecuador.

Tabla 1. Parámetros geométricos para el anillo de circulación.

Posicionamiento de la isla central	Condición 1: El centro de la isla central debe estar en el polígono formado por los ejes de los ramales. Condición 2: Los ramales pueden estar desfasados a la izquierda del centro de la isla central.	
Distancia entre ramales de aproximación	El ángulo entre los ramales debe ser cercano a 90° y máximo 105°.	
Número de carriles	> al número máximo de carriles en la entrada.	
Ancho de carriles	El ancho de los carriles debe garantizar los movimientos asociados al vehículo de diseño.	
	# de carriles circulación	(m)
Diámetro del Círculo Inscrito	1	30-40
	2	40-50
	múltiples	60-80
Radio de la isla central	>4m	

- Entrada: El nivel de desempeño de una rotonda se define principalmente por las características de las entradas. El ancho y el número de carriles son parámetros fundamentales para el cálculo de la capacidad, se recomienda añadir hasta un carril en la entrada para incrementar la capacidad, controlando que el ancho no provoque aumento en la velocidad (The Highways Agency *et al.*, 2007). El ángulo de entrada, el radio y la velocidad de ingreso, se encuentran directamente relacionados entre sí y son de vital importancia en el diseño, un ángulo de entrada pequeño no genera una desviación en la circulación, aumentando hasta en un 200% el riesgo de sufrir accidentes con lesiones del tipo angulares-angulares (Hydén & Várhegyi, 2000); cuando este ángulo es cercano a 90 grados genera movimientos bruscos que producen choques de tipo lateral-frontal y por pérdida de pista (Spacek, 2004). Un radio de entrada excesivo genera velocidades altas de circulación, provocando movimientos erráticos de los conductores (Gallellia, Vaianaa & Iuelea, 2014), en la Tabla 2 se presentan los valores recomendados.
- Salida: La geometría en la salida no produce un efecto directo en la capacidad, lo que busca es establecer condiciones geométricas que generen movimientos rápidos de los vehículos, garantizando a la vez la seguridad de todos los usuarios. El ancho total debe ser tal que evite el congestionamiento por un bloqueo en el caso que un vehículo se encuentra averiado en estos sitios. En la Tabla 3 se presentan los parámetros recomendados.

⁵ Intersecciones en donde gobierna la regla de prioridad a la derecha, se caracterizan por sus grandes dimensiones.

Tabla 2. Parámetros geométricos para la entrada.

Número de carriles de aproximación	1 para rotondas simples y 2 o más para rotondas múltiples, dependiendo de la demanda de tráfico.	
Número de carriles en la entrada	Si es necesario aumentar la capacidad se recomienda incrementar un carril en la entrada	
	# de carriles circulación	(m)
Ancho total de entrada	1	4.2-5.5
	2	7.3-9.1
	3	11.1-13.7
Ancho por carril de aproximación	>2.5 m y <3.65m	
Longitud de Cola	>5 m	
Ángulo de entrada	Condición recomendable: 20-60°	
Radio de entrada	rotondas simples 15-30m, rotondas múltiples >20m	
	# de carriles circulación	(km/h)
Velocidad a la entrada	1	32-40
	múltiples	40-48

Tabla 3. Parámetros geométricos para la salida.

Número de carriles	Depende el análisis de tráfico; se recomienda 2 o 1 carril con el ancho suficiente para que en caso de que se quede un carro averiado no bloquee la intersección.	
	# de carriles circulación	(m)
Ancho total de salida	1	>6, recomendado entre 7-7.5
	2	>8, recomendado entre 10-11
Radio de salida	>20 m, <100m	

Tabla 4. Parámetros geométricos para la visibilidad.

	Velocidad de tráfico (km/h)	Distancia(m)
Distancia de parada en la aproximación	40	40
	50	60
	60	80
	DCI (m)	Distancia (m)
Distancia de parada en el carril de circulación	≤40	Todo el cruce
	40-60	40
	60-100	50
Distancia de parada en zonas peatonales en la entrada y salida	Iguales valores de la distancia de parada en la aproximación	
Distancia de visibilidad para el ingreso de los vehículos	Iguales valores de la distancia de parada en el carril de circulación	

- Visibilidad: La visibilidad garantiza el tiempo de reacción necesario para que un conductor pueda frenar o realizar una maniobra evasiva cuando exista un evento fortuito. Una correcta visibilidad establece buena percepción a los conductores del ambiente en el que se ven envueltos, así como de todos los usuarios que comparten el espacio público; tanto un exceso como un déficit de visibilidad se encuentran asociadas a la generación de accidentes ocurridos en la entrada por vehículos aislados (Bastos & Mala, 2010). Es necesario cumplir con la distancia de visibilidad de parada la cual debe ser verificada en: el ramal de aproximación, dentro del anillo de circulación y en las zonas peatonales; también es relevante el cumplimiento de la visibilidad de ingreso de los

vehículos, ya que permite a los conductores que se aproximan a la intersección tener la capacidad de observar el tráfico del carril circular y del ramal de entrada izquierdo, para tomar la decisión si se ingresa en el tráfico o si se frenan hasta encontrar una brecha segura. En la Tabla 4 se presentan los parámetros recomendados.

- Otros Factores: Existen muchos parámetros de diseño los cuales pueden influenciar en mayor o menor medida la seguridad y capacidad de la intersección. En la Tabla 5 se presentan los valores recomendados de los parámetros que se han considerado más relevantes.

Tabla 5. Parámetros geométricos para los otros factores.

Consistencia de velocidades	La máxima diferencia de velocidades entre las trayectorias libres de los vehículos deber ser de 25 km/h
Bermas	Máximo 1 m, pueden ser suprimidas
Inclinación longitudinal	Se recomienda que no exceda el 6%, pero puede llegar hasta el 10%
Peralte	(+/-)2-2.5%
Isla Separadora	Longitud > Radio externo (DCI/2) o a 15m Ancho inicial > Radio externo/4 o a 2.5m Ancho en zona de paso peatonal >1.2 m

Es importante el cumplimiento del criterio de consistencia de velocidad en la disminución de la severidad de los accidentes; este criterio introducido en el manual de Estados Unidos (Rodegerdts *et al.*, 2010) tiene el objetivo de producir una circulación homogénea durante todas las trayectorias. Esta homogenización limita a que la diferencia de velocidades en todas las trayectorias posibles no supere los 25 km/h.

2.2. Nivel de servicio

Para comprobar la calidad de operación vehicular en una rotonda es necesario determinar del nivel de servicio; para lo cual se ha utilizado la metodología propuesta por el Highway Capacity Manual (HCM) (HCM, 2010), en donde el nivel de servicio se encuentra determinado a partir de la demora (s/veh) que tienen los vehículos para ingresar al anillo de circulación. Esta demora es calculada a partir de la capacidad en cada una de las entradas a la intersección. En la Tabla 6 se presenta la relación entre la demora y el nivel de servicio.

Tabla 6. Nivel de servicio en función de la relación v/c (HCM, 2010).

Demora (s/veh)	v/c<1	v/c>1
0-10	A	F
10-15	B	F
15-25	C	F
25-35	D	F
>50	E	F

La capacidad de una entrada es el máximo valor del flujo de tráfico de una corriente secundaria (entrada en estudio) que puede insertarse de forma continua en una corriente principal (anillo de circulación) a lo largo de un determinado periodo de tiempo (Bastos & Mala, 2010); siendo la capacidad total de la rotonda la suma de las capacidades de cada una de las entradas. Para el cálculo de la capacidad se efectuó un análisis bibliográfico de las metodologías existentes, el que sirvió para identificar cuál de estas refleja directamente el impacto en la capacidad producto de cambios geométricos. Existen 3 metodologías de cálculo: métodos probabilísticos, métodos empíricos y métodos de simulación.

Los métodos probabilísticos se basan en la conjugación de la distribución de los vehículos de la corriente prioritaria con el proceso de llegada de las vías secundarias, asumiendo que ambas

distribuciones obedecen a leyes de aleatoriedad y asumiendo una determinada “ley de aceptación de intervalos entre vehículos” (Wang & Yang, 2012), este método es utilizado en países como Alemania, Suiza y Estados Unidos. La ecuación para el cálculo de la capacidad en Estados Unidos se encuentra en el HCM (HCM, 2010), esta ecuación posee diferentes factores de entre los cuales destacan el tiempo crítico (t_c)⁶ y el tiempo de seguimiento (t_r)⁷. Estos valores dependen del comportamiento de los conductores y de parámetros geométricos como: el ancho de los carriles de aproximación, el DCI, el número de carriles de aproximación y circulación. La capacidad y la eficiencia de una rotonda son muy sensibles a los valores del t_c y del t_r (Caimi & Galarraga, 2007), por lo que estos deben ajustarse a las características locales. El Ecuador no posee investigaciones profundas acerca del comportamiento de los conductores, que permita establecer valores del t_c y t_r acordes a la realidad, descartando la utilización de esta metodología.

Los métodos de simulación se basan en la modelación, vehículo a vehículo, de las interacciones entre el flujo de entrada y el flujo del anillo de circulación, los cuales se presentan en sofisticados programas computacionales, debiendo ser calibrados para cada intersección. Debido a que el objetivo es evaluar la capacidad al realizar cambios geométricos, se descarta la utilización de este tipo de métodos.

Los métodos empíricos según el manual de Portugal (Bastos & Mala, 2010), son los que más se aproximan a la capacidad real de sus rotondas a la vez que tienen la ventaja de que su aplicación es mediante fórmulas relativamente fáciles. Entre los métodos utilizados se presenta el método desarrollo en Francia por el Departamento de Transporte, Carreteras y Desarrollo, por sus siglas en francés (SETRA) y el método desarrollado en Reino Unido por el Transport and Road Research Laboratory (TRL).

El método SETRA considera una función lineal que relaciona la capacidad de la entrada con sus características geométricas y el flujo de conflicto. El flujo de conflicto considera al flujo que se encuentra en el anillo de circulación antes de la entrada en estudio y el tráfico en la salida inmediatamente anterior a la entrada analizada (Bastos & Mala, 2010). Dentro de los parámetros geométricos utilizados en este método se destacan: el ancho en la entrada, el ancho del anillo de circulación y el ancho de la isla separadora, este método presenta la desventaja que tiende a subdimensionar la capacidad.

El método TRL mantiene la misma función lineal que el método SETRA, este método es considerado como el más afinado debido a la gran experiencia que tiene los ingleses en rotondas. Para Portugal este modelo es el que más se aproxima a la capacidad geométrica observada, pero una de sus desventajas es que tiende a sobredimensionar la capacidad en un 25% en promedio (Bastos & Mala, 2010). Debido a que lo que se pretende en esta investigación es el de evaluar la influencia de los parámetros geométricos en la capacidad de las rotondas, se utilizará el método TRL para el cálculo de la capacidad.

2.3. Caso de estudio

Para determinar el estado geométrico y la capacidad de las rotondas en Cuenca, se estudiaron 2 intersecciones de la ciudad. La información geométrica necesaria, se obtuvo a partir de la consultoría llamada “Servicios de Inventario Vial en la Zona Urbana del Cantón Cuenca” (GAD Cuenca, 2014); mientras que para la información del tránsito se utilizaron los datos generados en la consultoría “Estudio de Volúmenes de Tránsito de Diferentes Intersecciones de la Ciudad de Cuenca” (GAD Cuenca, 2013). La intersección 1 conocida también como “Rotonda del CREA” representa la unión de la Av. Unidad Nacional, Av. México y Av. 10 de agosto y se encuentra ubicada en coordenadas UTM WGS84 Z17S 719.533E y 9’678.821N. Esta rotonda está compuesta por tres ramales con 2 carriles de aproximación en cada uno y 2 carriles dentro del anillo de circulación, cada ramal permite realizar 3 movimientos (ver Fig. 1). Esta intersección se caracteriza por tener un anillo de circulación que no es

⁶ El tiempo crítico (t_c): Es el intervalo de tiempo necesario para que el vehículo que esta por ingresar a la rotonda tome la decisión de ingreso (Rodegerdts *et al.*, 2010).

⁷ El tiempo de seguimiento (t_r): Es el tiempo entre vehículos en cola que se encuentran en la entrada, que ingresan en la rotonda en un mismo intervalo crítico de la corriente conflictiva o circulante (Rodegerdts *et al.*, 2010).

capaz de permitir de manera segura los movimientos de los vehículos, especialmente de los pesados; los ramales de aproximación tienen elevados ángulos de entrada generando altas velocidades.

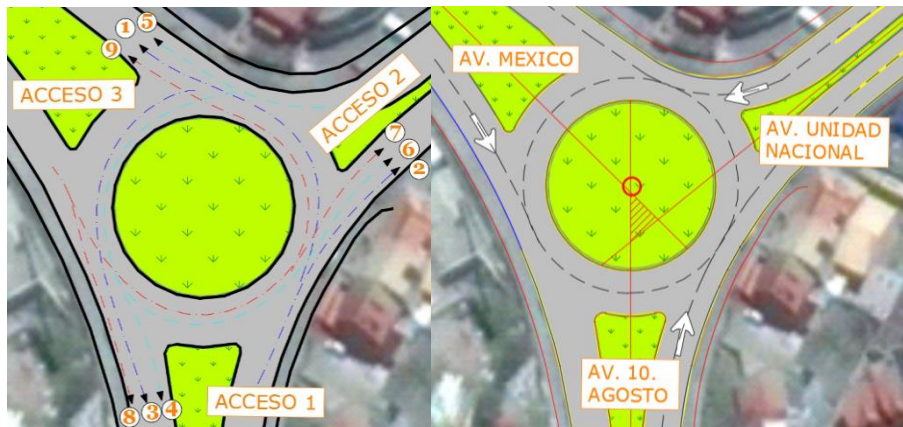


Figura 1. Esquema Intersección 1.

A partir de los datos de tráfico levantados en el año 2013, se ha realizado la proyección de estos para el año 2017 aplicando el modelo de crecimiento exponencial, para lo cual se han utilizado las tasas de crecimiento generadas por la Unidad de Factibilidad del MTOP para el Azuay. Con esto, ha sido posible obtener el tráfico para la hora de máxima demanda expresado en vehículos equivalentes, expuesto en la Tabla 7.

Tabla 7. Vehículos Equivalentes en la Hora de Máxima Demanda para Intersección 1.

	Acceso 1	Acceso 2	Acceso 3
Flujo 1	516	Flujo 4	390
Flujo 2	523	Flujo 5	634
Flujo 3	6	Flujo 6	24
		Flujo 7	366
		Flujo 8	623
		Flujo 9	4

La intersección 2, conocida también como “Rotonda de los Totems”, se encuentra formada por la unión de la Av. Unidad Nacional y Av. Remigio Crespo y está ubicada en las coordenadas UTM WGS84 Z17S 720.111E y 9’679.500N. Esta intersección posee cuatro ramales, con dos carriles por entrada y 2 carriles dentro del anillo de circulación, cada ramal permite realizar 4 movimientos (ver Fig. 2). La intersección 2 posee un anillo de circulación en forma de óvalo, generando a los ramales de aproximación de la Av. Remigio Crespo ángulos de entrada elevados que aumentan la velocidad.

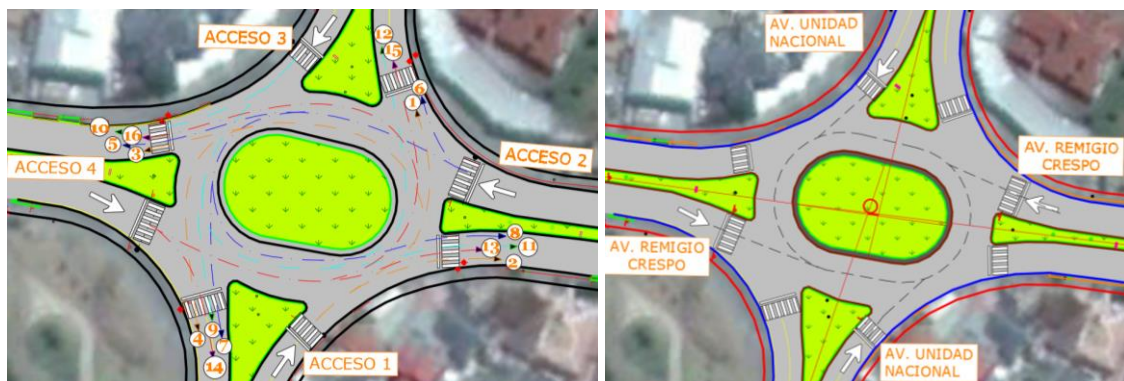


Figura 2. Esquema Intersección 2.

Al igual que para la intersección 1, se han determinado los vehículos equivalentes para la hora de máxima demanda, estos valores se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Vehículos Equivalente en la Hora de Máxima Demanda para Intersección 2.

Acceso 1		Acceso 2		Acceso 3		Acceso 4	
Flujo 1	811	Flujo 5	636	Flujo 9	660	Flujo 9	715
Flujo 2	190	Flujo 6	366	Flujo 10	96	Flujo 10	265
Flujo 3	235	Flujo 7	410	Flujo 11	254	Flujo 11	201
Flujo 4	12	Flujo 8	41	Flujo 12	7	Flujo 12	18

Con el fin de cuantificar de mejor manera las características geométricas y partiendo de la hipótesis que la longitud del vehículo de diseño es de 15 metros, se estableció un criterio de ponderación para los parámetros propuestos. Con esta ponderación es posible obtener un número que represente de manera cuantitativa el cumplimiento de las características geométricas. Se ha establecido tres situaciones de análisis: la primera en donde se cumple el valor propuesto, la segunda en donde este parámetro se encuentra próximo al valor propuesto y una tercera para el caso en que no se cumple el valor propuesto.

Para generar esta ponderación se colocaron pesos a cada parámetro de diseño, asignando un valor alto a los parámetros que influyen en la velocidad de circulación. El parámetro más importante en el diseño es la consistencia de velocidades, se considera un valor de 10 para el cumplimiento, 5 cuando se aproxima y 0 en caso de que no cumpla el valor propuesto. Para los demás parámetros que influyen en la disminución de la velocidad, se ha considerado un valor de 6 para el cumplimiento, 3 cuando se aproxima y 0 cuando no cumple; estos parámetros son: posicionamiento de la isla central, distancia entre ramales de aproximación, ancho de carriles en el anillo de circulación, DCI, radio de la isla central, ancho total de la entrada, ángulo de entrada, radio de entrada y el cumplimiento de todas las distancias de velocidad. Finalmente, los parámetros restantes no son influyentes en la generación de accidentes, por lo que se ha colocado un valor de ponderación de 2 en caso de cumplimiento, un valor de 1 cuando se aproxima y un valor de 0 cuando no cumple.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron 2 escenarios para cada intersección, el primer escenario consistió en el análisis de la situación actual y en el segundo escenario se generó un rediseño geométrico basado en los parámetros propuestos teniendo en cuenta la realidad y especificidad de cada situación. El rediseño busca también utilizar el mismo espacio físico que ocupa la situación actual, para evitar afecciones a viviendas aledañas a la zona de estudio. A todas las situaciones generadas, se realizó el cálculo de la capacidad mediante el método TRL y el cálculo del nivel de servicio siguiendo la metodología presentada en el HCM 2010.

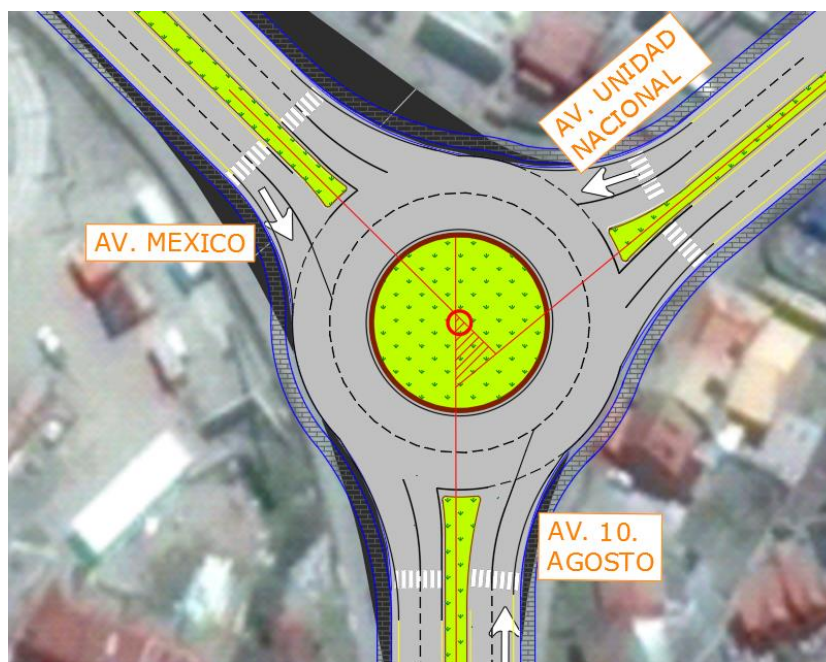
3.1. Intersección 1

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los valores de la ponderación obtenidos del análisis geométrico, en donde la columna de estado actual representa el primer escenario, la columna de estado propuesto representa el rediseño y la columna de total representa al valor máximo que puede tener la categoría en análisis.

Tabla 9. Análisis Geométrico de la Intersección 1.

Zona de análisis	Valor de la ponderación		
	Estado actual	Estado propuesto	Total
Anillo de circulación	20	35	38
Entrada	48	72	72
Salida	11	16	18
Visibilidad	30	60	60
Otros factores	30	66	66
Total	139	249	254

Existe una clara diferencia entre los dos escenarios, el estado actual cumple con el 55% (139) de todos los valores de ponderación establecidos. Esta diferencia se debe al incumplimiento de parámetros como: el posicionamiento de la isla central, el ancho de los carriles de circulación, el ángulo de entrada, el ancho de la salida, la distancia de visibilidad de parada en la aproximación, la distancia de visibilidad en las zonas peatonales y la consistencia de velocidades. Al no cumplir estos parámetros la rotonda no es capaz de disminuir la velocidad de circulación. En el estado propuesto se mejora las características geométricas estableciendo el cumplimiento del 94% (249) de los valores de ponderación; además en la Figura 3 se puede observar, como la situación propuesta ocupa un espacio físico similar al de la situación actual.

**Figura 3.** Esquema Intersección 1 Rediseñada.

En la Figura 4 se presenta un resumen de la capacidad para cada acceso, en donde la intersección en su estado actual posee menos capacidad que en la situación propuesta. Analizando cada ramal de aproximación, se puede ver que la capacidad permanece constante, salvo el acceso 2 en donde la misma aumenta en aproximadamente 500 veh/h; este aumento se debe a la ampliación en el ancho de la entrada para la situación propuesta.

A partir del cálculo de la capacidad, se ha encontrado los valores de las demoras y el nivel de servicio tanto de la situación actual como de la propuesta. En la Tabla 10 se muestra un resumen de la comparación de las demoras y nivel de servicio, en donde se puede ver globalmente que se mantiene el nivel de servicio de A en las dos situaciones, viéndose menores demoras en la situación propuesta. Analizando cada acceso, se observa una disminución de las demoras en el acceso 2, lo que hace que esta entrada pase de un nivel de servicio B a un nivel de servicio A.

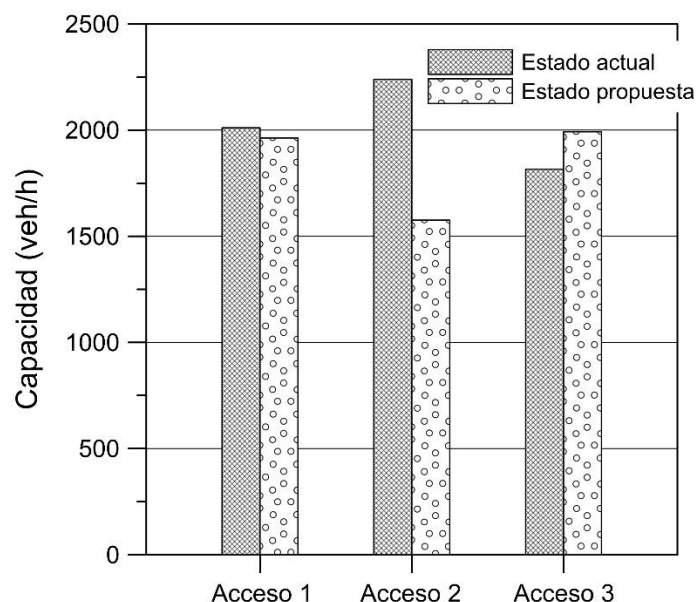


Figura 4. Comparación de la capacidad Intersección 1.

Tabla 10. Comparación del nivel de servicio Intersección 1.

	Relación Volumen/capacidad		Nivel de Servicio			
	Estado actual	Estado propuesto	Demora actual (seg/veh)	Nivel de servicio actual	Demora propuesta (seg/veh)	Nivel de servicio propuesto
Acceso 1	0.53	0.52	6.6	A	6.3	A
Acceso 2	0.66	0.47	10.1	B	5.4	A
Acceso 3	0.50	0.55	6.1	A	7.1	A
Promedio	0.85	0.51	7.7	A	6.2	A

3.2. Intersección 2

En la Tabla 11 se presenta el resultado de la evaluación geométrica, en donde la situación actual cumple el 60% (195) de los parámetros geométricos y la situación propuesta cumple con el 98% (319).

Tabla 11. Análisis Geométrico de la Intersección 2.

Zona de análisis	Valor de la ponderación		Total
	Estado actual	Estado propuesto	
Anillo de circulación	26	38	38
Entrada	57	96	96
Salida	18	19	24
Visibilidad	36	78	78
Otros factores	58	88	88
Total	195	319	324

En la situación actual la intersección posee un anillo de circulación de forma ovalada. Se ha determinado que al igual que para la intersección 1, los parámetros que no cumplen la norma son los que sirven para disminuir la velocidad de circulación como: el posicionamiento de la isla central, el ancho del carril de circulación, el ancho de la entrada, el ángulo de entrada, el ancho de la salida, las distancias de visibilidad; todo esto genera el incumplimiento de la consistencia de velocidades. La intersección propuesta cumple casi en su totalidad los parámetros, con lo cual se obtiene una reducción en la velocidad de circulación. En la Figura 5, se muestra como la situación propuesta disminuye el

área de ocupación de la intersección en el estado actual, con lo cual es posible realizar una reforma geométrica sin afectar o realizar indemnizaciones en las edificaciones aledañas.

El resumen del cálculo de la capacidad para la intersección 2, se presenta en la Figura 6, en donde se observa como la capacidad global entre el estado actual y propuesto se encuentra prácticamente igual, con una diferencia a favor de la situación propuesta de apenas 133 veh/hora. Se observa que en los accesos 1 y 3 se presenta un incremento de capacidad, mientras que para los accesos 2 y 4 se presenta una disminución de la capacidad, esto es debido a la configuración geométrica del anillo de circulación, ya que en los accesos 2 y 4, para la situación propuesta, se disminuye el ancho de entrada y, para los ramales 1 y 3, se aumenta este ancho, pero como se mencionó inicialmente, este incremento o decremento no es significativo en base a la capacidad global.

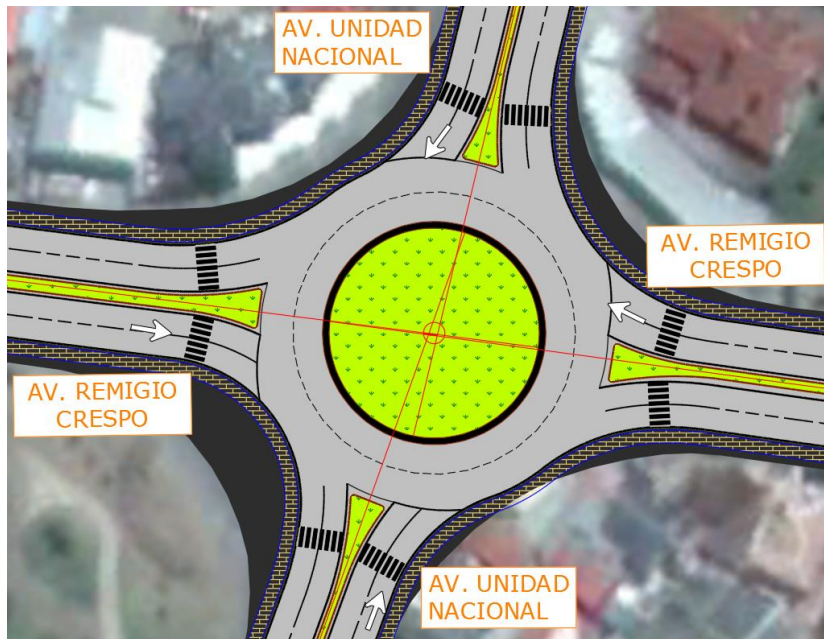


Figura 5. Esquema Intersección 2 Rediseñada.

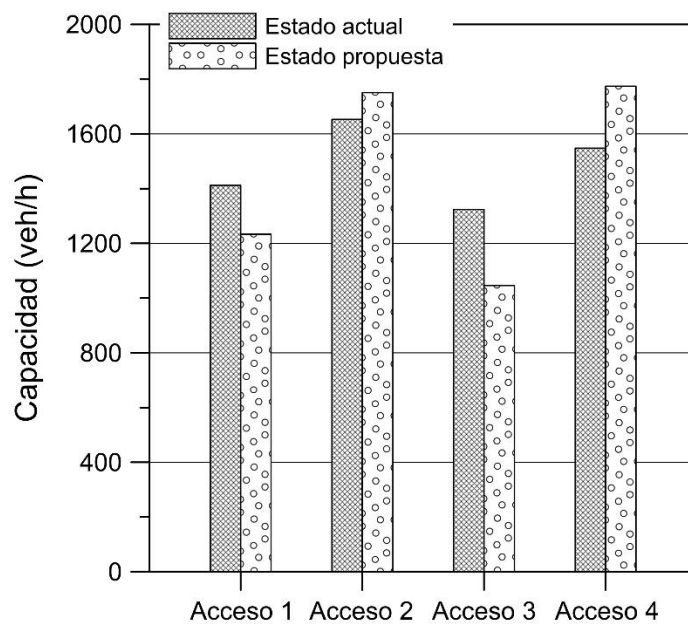


Figura 6 Comparación de la Capacidad Intersección 2.

Tabla 12. Comparación del nivel de servicio Intersección 2.

	Relación Volumen/Capacidad		Nivel de servicio			
	Estado actual	Estado propuesto	Demora actual (seg/veh)	Nivel de servicio-actual	Demora propuesta (seg/veh)	Nivel de servicio-propuesto
Acceso 1	1.01	0.88	92.6	F	24.8	C
Acceso 2	0.83	0.88	15.9	C	21.4	C
Acceso 3	0.97	0.77	64.9	F	15.4	B
Acceso 4	0.68	0.77	9.6	A	14.0	B
Promedio	0.85	0.83	43.4	E	19.0	C

El cálculo de las demoras y el nivel de servicio se presenta en la Tabla 12, en donde se puede ver como para el acceso 1 y para el acceso 3 se mejora sustancialmente el nivel de servicio, pasando de un nivel F a un nivel C y B, respectivamente, en el acceso 2 se mantiene el nivel de servicio y en el acceso 4 baja el nivel de servicio de A hasta B. Analizando globalmente la intersección se puede ver una mejoría en la calidad de operación, pasando de un nivel de servicio E en la situación actual hasta un nivel de servicio C en la situación propuesta, evidenciándose una disminución en la demora de 24 seg/veh.

4. CONCLUSIONES

En la secuencia del análisis de cinco normas/recomendaciones sobre el diseño geométrico de rotondas, se han propuesto 29 parámetros para el diseño geométrico de rotondas simples y múltiples, ubicadas en zonas urbanas, los cuales buscan disminuir la velocidad de circulación, aumentando de este modo la seguridad.

En base al análisis anterior, se verificó que las dos intersecciones evaluadas actualmente cumplen con el 60% parámetros geométricos propuestos, generando intersecciones heterogéneas. Se verifica que estas actualmente no cumplen con parámetros fundamentales para disminuir la velocidad como: el criterio de consistencia de velocidades, ángulos y radios de entrada, anchos de carriles, etc., lo cual aumenta la severidad de las lesiones ante la ocurrencia de accidentes.

El rediseño de las intersecciones mejoró el cumplimiento de los parámetros geométricos, con lo cual es posible disminuir los accidentes; se ha visto, igualmente, que el área necesaria para este rediseño es igual o menor al área que actualmente ocupa la intersección. Los parámetros geométricos recomendados no afectan negativamente en la capacidad ni el nivel de servicio de las rotondas en comparación con su estado actual.

Se recomienda utilizar los parámetros geométricos propuestos en esta investigación, tanto para el diseño de nuevas rotondas, como para la rectificación geométrica de rotondas existentes dentro de las zonas urbanas. Al utilizar los parámetros propuestos se generan intersecciones con características homogéneas, las cuales serán de fácil percepción y aceptación por los usuarios. Este trabajo puede constituir un punto de referencia para el desarrollo de guías de diseño geométrico adaptadas para el Ecuador, esto proporcionará grandes beneficios para la calidad de los diseños futuros y la seguridad vial en el país.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro sincero agradecimiento a la SENESCYT, a la Universidad de Cuenca y al Instituto Politécnico de Leiria, por el constante apoyo que han brindado para la elaboración de este trabajo. Un agradecimiento al Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad de Cuenca, por brindar los datos necesarios para la elaboración de este documento.

REFERENCIAS

- Bastos, A., Mala, Á. (2010). *Manual de planeamento das acessibilidades e da gestão viária*. Porto: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N).
- Bastos, A., Santos, S., Vasconcelos, L., Seco, Á., Silva, J. P. (2014). Driver behavior characterization in roundabout crossings. *Transportation Research Procedia*, 3, 80-89.
- Caimi, M., Galarraga, J. (2007). *Estimación del tiempo de aceptación y del tiempo de seguimiento en rotondas en Uruguay*. XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, pp. 1-14. Disponible en <http://admin.aeurus.cl/upload/archivos/sochitran/4186/14/1461353240.pdf>
- Cal, R., Reyes, M., Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones*. (8ª ed.). México D. F., México: Alfaomega Grupo Editor S.A., 324 p.
- Consejo de Seguridad Ciudadana. (2014). *Cuenca en cifras 2014*. Cuenca, Ecuador: Centro de Estudios Estratégicos.
- Consejo de Seguridad Ciudadana. (2015). *Cuenca en cifras 2015*. Cuenca, Ecuador: Centro de Estudios Estratégicos.
- Consejo Metropolitano de Quito. (2012). *Ordenanza N° 3746: Normas arquitectónicas y urbanísticas*. Quito, Ecuador: Dirección Metropolitana de Planificación Territorial y Servicios Públicos.
- Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G. (2010). Extended prediction models for crashes at roundabouts. *Safety Science*, 49(2), 198-207.
- Elvik, R. (2003). Effects on road safety of converting intersections to roundabouts: Review of evidence from Non-U.S. studies. *Journal of the Transportation Research Board*, 1-10.
- GAD Cuenca. (2013). *Estudio de volúmenes de tránsito de diferentes intersecciones de la ciudad de Cuenca*. Cuenca, Ecuador: Municipalidad de Cuenca.
- GAD Cuenca. (2014). *Servicios de inventario vial en la zona urbana del Cantón Cuenca*. Cuenca, Ecuador: Municipalidad de Cuenca.
- GAD de Cuenca. (2015). *Plan de movilidad y espacios públicos*. Cuenca, Ecuador: Municipalidad de Cuenca.
- Gallellia, V., Vaianaa, R., Iuelea, T. (2014). Comparison between simulated and experimental crossing speed. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 111, 117-126.
- Garber, N., Hoel, L. (2009). *Traffic and highway engineering*. Toronto, Canada: Cengage Learning.
- Guichet, B. (2005). *Evolution of roundabout in France and new uses*. Washington D.C., US: Transportation Research Circular E-C083, 7 p.
- HCM. (2010). *Highway capacity manual*. Washington D.C., US: Transportation Research Board of the National Academies.
- Hydén, C., Várhegyi, A. (2000). The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study. *Accident Analysis & Prevention*, 32(1), 11-23.
- Montella, A. (2011). Identifying crash contributory factors at urban roundabout and using association rules to explore their relationships to different crash types. *Accident Analysis and Prevention*, 43(4), 1451-1463.
- Montella, A., Truner, S., Chiaradonna, S., Albridge, D. (2012). Proposals for improvement of the Italian roundabout geometric design standard. *Procedia-Social and Behavior Sciences*, 53, 189-202.
- MOP. (2003). *Nomas de diseño geométrico de carreteras*. Quito, Ecuador: Ministerio de Obras Públicas.
- Nueman, T. R., Pfefer, R., Slack, K. L., Hardy, K. K., Harwood, D. W., Potts, I. B., ... Kohlman, R. (2003). *A guide for addressing unsignalized intersection collisions*. Washington D.C., US: NCHRP Report 500.

- Ortega, E. (2017). *Evaluación de la capacidad en rotondas, en función de la optimización de su diseño geométrico basado en un aumento de la seguridad. Caso de estudio Cuenca*. Leiria, Portugal: Instituto Politécnico de Leiria. Tesis de maestría, 130 p.
- Rodegerdts, L., Bansen, J., Tiesler, C., Knudsen, J., Myers, E., Jhonson, M., ... O'Brien, A. (2010). *NCHRP REPORT 672-Roundabout: An informational guide*. Washington, D.C., US: Transportation Research Board.
- Spacek, P. (2004). Basis of the Swiss design standard for roundabout. *Transportation Research Record*, 27-35.
- Subsecretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. (2012). *Guía de nudos varios*. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- The Highways Agency, Transport Scotland, Welsh Assembly Government Llywodraeth Cymru, The Department for Regional Development Northern Ireland. (2007). *Geometry design of roundabouts*. London, UK: Design Manual for Roads and Bridges.
- Thenoux, G., Villasante, R. (2003). Estudio aplicación guía AASTHO 2000 para el diseño de rotondas en Chile. *Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción*, 403-412.
- Wang, W., Yang, X. (2012). Research on capacity of roundabouts in Beijing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, 157-168.