



Disertación

Mestría en Construcciones Civiles

***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***

**Hugo Esteban Ortega Guaricela**

Leiria, septiembre de 2017

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*



Disertación

Mestría en Construcciones Civiles

***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***

**Hugo Esteban Ortega Guaricela**

Tesis de Maestría realizada bajo la orientación de él Doctor João Pedro Cruz da Silva, Profesor de la Escuela Superior de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria y la codirección del Magíster Jaime Guzmán Crespo, Profesor de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca.

Leiria, septiembre de 2017

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Dedicatoria

---

Este trabajo que hoy culmina, se lo dedico a mi esposa Patricia, por el apoyo constante que me ha brindado a lo largo de estar duro pero fructífero camino; sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A mis padres, mi ejemplo a seguir, por enseñarme que el esfuerzo es el camino al éxito; por todas sus palabras oportunas que han son mi guía de vida.

A mis hermanas, amigos y todas las personas que han estado cerca durante este proceso, por generar el apoyo necesario.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimientos

---

Deseo expresar un sincero agradecimiento a mis tutores, al Profesor João Pedro Cruz da Silva y al Profesor Jaime Guzmán Crespo, por su paciencia y por su conocimiento; su tutoría ha sido de vital importancia para que la investigación realizada sea un aporte significativo, con la finalidad de marcar un punto de inflexión en el diseño de rotondas en el Ecuador.

Deseo dar las gracias al GAD de la Ciudad de Cuenca, especialmente a la Secretaría de Movilidad, por la apertura y por entregar la información necesaria para la elaboración de esta investigación.

Mi sincero agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, ya que gracias al programa Globo Común Becas Cofinanciadas Senescyt-Instituto Politécnico de Leiria, incentiva a la investigación, que en muchos de los casos sirven para solucionar problemas y necesidades de implementación inmediata en el Ecuador.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumen

---

El Ecuador no dispone de una norma de diseño geométrico para rotondas acorde con la actualidad internacional. La norma vigente utiliza criterios para la generación de parámetros geométricos y para el cálculo de la capacidad que fueron descartados en Estados Unidos y Europa en los 60s. Esta situación ha generado la construcción de intersecciones heterogéneas con problemas en la operación y la seguridad.

Este documento presenta una investigación bibliográfica que tiene como principal objetivo la comparación de cinco normas o manuales de diseño geométrico para rotondas en áreas urbanas. Se analizaron los parámetros que se utilizan como medida para disminuir y homogenizar las velocidades de circulación y su impacto en el nivel de servicio y capacidad.

Las rotondas son por lo general puntos críticos para el tráfico en la ciudad de Cuenca, ya que sirven como solución para la intersección de carreteras primarias. En función de los parámetros recomendados se rediseñó 2 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 rediseños propuestos para el diseño geométrico deberían reducir el riesgo y gravedad de los accidentes sin afectar negativamente las características operacionales.

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

*Palabra Clave: rotondas, parámetros geométricos, velocidad de circulación, accidentes, nivel de servicio.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

Currently Ecuador does not have technical design guidelines for roundabouts according 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 has led to the construction of heterogeneous roundabouts that generally have operational performance and/or safety issues.

This paper presents a research work that has as main objective the comparison of five well-regarded guidelines or manuals of geometric design for roundabouts in urban areas. The 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.

Roundabouts are usually critical points for traffic in the city of Cuenca, since they are a primary solution for the intersection of major roads. Based on the analysis done regarding geometric design parameters, two of the 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 with 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.

Consequently, this work can constitute a constructive baseline point for the development of up to date geometric design guidelines for roundabouts adapted to Ecuador. This will potentially provide great benefits for the quality of future designs and road safety in the country.

*Keywords: (Roundabouts, Geometric Parameters, Circulation Speed, Accidents, Level of Service.)*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2-1: Intersección Rotativa. [3] .....   | 5  |
| Figura 2-2: Círculos de Tráfico. [3] .....   | 6  |
| Figura 2-3: Cambio de intersección tipo Rotativa en Rotonda Compacta, Kingston, New York. [3] ...                            | 6  |
| Figura 2-4: Rotonda Compacta, Camel, Indiana. [3] .....  | 7  |
| Figura 2-5: Características de Minirotondas. [3].....  | 8  |
| Figura 2-6: Características de Rotondas Simples. [3] .....   | 8  |
| Figura 2-7: Características de Rotondas Múltiples. [3].....  | 9  |
| Figura 2-8: Características geométricas de una rotonda. [8].....   | 10 |
| Figura 2-9: Posicionamiento de la isla central hacia la derecha del ramal de entrada, situación ideal. [3]<br>.....          | 13 |
| Figura 2-10: Posicionamiento de la isla central dentro del ramal de entrada, situación aceptable. [3].                       | 15 |
| Figura 2-11: Posicionamiento de la isla central hacia la izquierda del ramal de entrada, situación no<br>aceptada. [3] ..... | 15 |
| Figura 2-12: Ancho de la entrada. [16] .....   | 18 |
| Figura 2-13: Longitud de cola. [6] .....   | 20 |
| Figura 2-14: Ángulo de entrada. [17].....  | 20 |
| Figura 2-15: Salida de la intersección [3].....  | 22 |
| Figura 2-16: Distancia de parada en la aproximación. [17] .....  | 24 |
| Figura 2-17: Distancia de para en la aproximación criterio de U,K. [16] .....  | 25 |
| Figura 2-18: Distancia de parada en el anillo de circulación. [6].....   | 25 |
| Figura 2-19: Distancia de parada para pasos peatonales de salida. [3] .....  | 25 |
| Figura 2-20: Distancia de inserción a la rotonda. [3] .....  | 26 |
| Figura 2-21: Trayectoria posibles para evaluar la CCV. [3] .....   | 27 |
| Figura 2-22: Isla separadora. [3] .....  | 30 |
| Figura 2-23: Longitud de Entrecruzamiento. [8].....  | 32 |
| Figura 2-24: Elementos contenidos en la fórmula de Wardrop. [21] .....   | 34 |
| Figura 2-25: Parámetros Geométricos del Método TRL. [6] .....  | 38 |
| Figura 2-26: Parámetros Geométricos del Método SETRA. [6] .....  | 39 |
| Figura 2-27: Funcionamiento de una rotonda con la teoría de aceptación de intervalos. [27].....                              | 40 |
| Figura 2-28: Reducción de puntos de conflicto. [3] .....   | 45 |
| Figura 2-29: Perfil medio de velocidades de un corredor con dos rotondas contiguas. [32].....                                | 46 |
| Figura 2-30: Relación entre el desplazamiento lateral y la velocidad de entrada en una rotonda. [32]                         | 46 |
| Figura 2-31: Capacidad de Diferentes Tipos de Intersecciones [6].....  | 47 |
| Figura 2-32: Área de ocupación de una rotonda comparada con una intersección semaforizada. [3] ..                            | 48 |
| Figura 2-33: Trayectoria errática de los vehículos en rotondas dobles. [33].....   | 49 |
| Figura 2-34: Puntos de conflicto en rotondas doble: Correcta conducción y conducción erráticas. [33]<br>.....                | 49 |
| Figura 3-1: Parámetros geométricos. [7] .....  | 51 |
| Figura 3-2: Tipos de accidentes. [7].....  | 52 |
| Figura 3-3: Rotondas reemplazadas en Vaxjo. [32] .....   | 53 |
| Figura 3-4: Longitud de zona de influencia. [33].....  | 54 |
| Figura 3-5: Ángulo de entrada defectuoso. [32].....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3-6: Relación entre el cambio de la velocidad media y el riesgo de accidentes en rotondas. [32] | 56 |
| Figura 4-1: Trazado de la ciudad de 1563. [43]   | 61 |
| Figura 4-2: Plan Regulador de la Ciudad de Cuenca 1949. [43]   | 62 |
| Figura 4-3: Plano de la ciudad de Cuenca 1967. [43]  | 63 |
| Figura 4-4: Redondeles actuales en la zona urbana de Cuenca  | 65 |
| Figura 4-5: Número de entradas de rotondas en Cuenca   | 66 |
| Figura 4-6: Ancho del carril de circulación  | 66 |
| Figura 4-7: Jerarquía vial actual de la ciudad. [43]   | 67 |
| Figura 4-8: Intensidad Media Diaria de la ciudad. [43]   | 68 |
| Figura 4-9: Saturación Vial de la ciudad. [43]   | 69 |
| Figura 5-1: Ubicación de las intersecciones en estudio   | 71 |
| Figura 5-2: Ubicación Intersección 1   | 72 |
| Figura 5-3: Movimientos de la Intersección 1   | 74 |
| Figura 5-4: Clasificación Vehicular Intersección 1   | 76 |
| Figura 5-5: TPDA 2017 Intersección 1   | 77 |
| Figura 5-6: Hora de Máxima Demanda Intersección 1  | 78 |
| Figura 5-7: Ubicación Intersección 2   | 79 |
| Figura 5-8: Movimientos de la Intersección 2   | 80 |
| Figura 5-9: Clasificación Vehicular Intersección 2   | 83 |
| Figura 5-10: TPDA 2017 Intersección 2  | 84 |
| Figura 5-11: Hora de Máxima Demanda Intersección 2   | 85 |
| Figura 6-1: Características del Vehículo de Diseño   | 87 |
| Figura 6-2: Trayectoria del vehículo de diseño con giro a 180°   | 88 |
| Figura 6-3: Comparación de Intersección 1 expresada en porcentajes                                     | 93 |
| Figura 6-4: Comparación de Intersección 1 expresada en porcentajes                                     | 95 |
| Figura 6-5: Comparación de la Capacidad Intersección 1   | 97 |
| Figura 6-6: Comparación de la Capacidad Intersección 2   | 98 |

# Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2-1: Comprobación del Vehículo de diseño .....   | 12 |
| Tabla 2-2: Comprobación de la Isla Central.....  | 14 |
| Tabla 2-3: Ancho de la calzada anular. [6].....  | 16 |
| Tabla 2-4: Hipótesis de paso. [6].....   | 17 |
| Tabla 2-5: Ancho de la calzada anular con dos carriles. [17].....                              | 17 |
| Tabla 2-6: Comprobación de la Entrada.....   | 19 |
| Tabla 2-7: Comparación de Salida .....   | 21 |
| Tabla 2-8: Comparación de Visibilidad .....  | 23 |
| Tabla 2-9: Otros parámetros .....  | 28 |
| Tabla 2-10: Ancho de las bermas. [17] .....  | 29 |
| Tabla 2-11: Factor de ejes equivalentes. [23].....   | 35 |
| Tabla 2-12: Factor de ejes equivalentes para Portugal. [6] .....                               | 35 |
| Tabla 2-13: Factor de ejes equivalentes para U.S.A. [24].....                                  | 35 |
| Tabla 2-14: Intervalo crítico y tiempo de seguimiento. [27].....                               | 41 |
| Tabla 2-15: Fórmulas de capacidad para distintas configuraciones. [27] .....                   | 42 |
| Tabla 2-16: Intervalos críticos y de seguimiento para Córdoba, Argentina. [27] .....           | 42 |
| Tabla 2-17: Intervalos críticos y de seguimiento para Córdoba, Argentina. [28] .....           | 43 |
| Tabla 3-1: Parámetros recomendados para el Anillo de Circulación .....                         | 57 |
| Tabla 3-2: Parámetros recomendados para la Entrada .....                                       | 58 |
| Tabla 3-3: Parámetros recomendados para la Salida.....   | 58 |
| Tabla 3-4: Parámetros recomendados para la Visibilidad .....                                   | 58 |
| Tabla 3-5: Otros Parámetros para la Norma Ecuatoriana.....                                     | 59 |
| Tabla 4-1: Resumen del número de carriles. [43] .....  | 65 |
| Tabla 4-2: Accidentes de tránsito por período según tipo de accidentes (2013-2015). [44] ..... | 69 |
| Tabla 5-1: Buses en Intersección 1.....  | 73 |
| Tabla 5-2: Total Conteo 2013 en Intersección 1 .....   | 73 |
| Tabla 5-3: Factor de expansión para Intersección 1 .....                                       | 74 |
| Tabla 5-4: TPDA 2013 Intersección 1.....   | 75 |
| Tabla 5-5: Tasas de Crecimiento.....   | 75 |
| Tabla 5-6: Tráfico proyectado Intersección 1 .....   | 75 |
| Tabla 5-7: Tráfico por cada Flujo Intersección 1 .....   | 76 |
| Tabla 5-8: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 1.....                              | 77 |
| Tabla 5-9: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 1.....                              | 79 |
| Tabla 5-10: Buses en Intersección 2.....   | 80 |
| Tabla 5-11: Total Conteo 2013 en Intersección 2 .....  | 81 |
| Tabla 5-12: Factor de expansión Intersección 2.....  | 81 |
| Tabla 5-13: TPDA 2013 Intersección 2.....  | 82 |
| Tabla 5-14: Tráfico proyectado Intersección 2 .....  | 82 |
| Tabla 5-15: Tráfico por cada Flujo Intersección 2 .....  | 83 |
| Tabla 5-16: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 2.....                             | 85 |
| Tabla 5-17: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 2.....                             | 85 |
| Tabla 6-1: Valores de ponderación en el Anillo de Circulación .....                            | 89 |
| Tabla 6-2: Valores de ponderación en la Entrada .....  | 89 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 6-3: Valores de ponderación en la Salida .....               | 90 |
| Tabla 6-4: Valores de ponderación de Visibilidad .....             | 90 |
| Tabla 6-5: Valores de ponderación para Otros Factores .....        | 91 |
| Tabla 6-6: Análisis Geométrico de la Intersección 1 .....          | 92 |
| Tabla 6-7: Análisis Geométrico de la Intersección 2 .....          | 94 |
| Tabla 6-8: Nivel de servicio en función de la relación v/c .....   | 95 |
| Tabla 6-8: Comparación de la capacidad Intersección 1 .....        | 96 |
| Tabla 6-9: Comparación del nivel de servicio Intersección 1 .....  | 97 |
| Tabla 6-10: Comparación de la capacidad Intersección 2 .....       | 98 |
| Tabla 6-11: Comparación del nivel de servicio Intersección 2 ..... | 99 |

# Lista de siglas

---

**CCV:** Criterio de Consistencia de Velocidades.

**DCI:** Diámetro de Círculo Inscrito.

**DMQ:** Distrito Metropolitano de Quito.

**FHMD:** Factor en la Hora de Máxima Demanda.

**fve:** Factor de Vehículo Equivalente.

**GAD:** Gobierno Autónomo Descentralizado.

**IMD:** Intensidad Media Diaria.

**NDGC:** Norma de Diseño Geométrico de Carreteras.

**PMEP:** Plan de Movilidad y Espacios Públicos.

**tc:** Tiempo Crítico.

**tr:** Tiempo de Seguimiento.

**U.K:** Reino Unido.

**U.S.A:** Estados Unidos.

**veq:** Vehículos Equivalentes.

**VHMD:** Volumen en la Hora de Máxima Demanda.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Índice

---

|  |             |
|--|-------------|
| <b>DEDICATORIA.....</b>                | <b>III</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS.....</b>            | <b>V</b>    |
| <b>RESUMEN.....</b>                    | <b>VII</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                   | <b>IX</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>           | <b>XI</b>   |
| <b>LISTA DE TABLAS.....</b>            | <b>XIII</b> |
| <b>LISTA DE SIGLAS.....</b>            | <b>XV</b>   |
| <b>ÍNDICE.....</b>                     | <b>XVII</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>            | <b>1</b>    |
| <b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>         | <b>5</b>    |
| <b>2.1 Reseña Histórica.....</b>       | <b>5</b>    |
| <b>2.2 Tipos de Rotondas.....</b>      | <b>7</b>    |
| 2.2.1 Minirotondas.....                | 7           |
| 2.2.2 Rotondas Simples.....            | 8           |
| 2.2.3 Rotondas Múltiples.....          | 9           |
| <b>2.3 Parámetros Geométricos.....</b> | <b>9</b>    |
| 2.3.1 Reseña Histórica.....            | 9           |
| 2.3.2 Comparación de Normas.....       | 11          |
| 2.3.3 Conclusiones.....                | 30          |
| <b>2.4 Capacidad.....</b>              | <b>31</b>   |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.4.1      | Reseña Histórica .....   | 31        |
| 2.4.2      | Comparación de Métodos de Cálculo .....                        | 34        |
| 2.4.3      | Conclusiones.....  | 43        |
| <b>2.5</b> | <b>Análisis Comparativo.....</b>                               | <b>45</b> |
| 2.5.1      | Ventajas.....  | 45        |
| 2.5.2      | DESVENTAJAS .....  | 47        |
| <b>3.</b>  | <b>PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PROPUESTOS .....</b>                 | <b>51</b> |
| <b>3.1</b> | <b>ACCIDENTALIDAD EN ROTONDAS .....</b>                        | <b>51</b> |
| 3.1.1      | REDUCCIÓN DE ACCIDENTES .....                                  | 54        |
| 3.1.2      | AUMENTO DE ACCIDENTES .....                                    | 54        |
| 3.1.3      | PARÁMETROS GENERADORES DE ACCIDENTES.....                      | 55        |
| <b>3.2</b> | <b>PARÁMETROS PROPUESTOS.....</b>                              | <b>57</b> |
| <b>4.</b>  | <b>ROTONDAS EN CUENCA.....</b>                                 | <b>61</b> |
| <b>4.1</b> | <b>EVOLUCIÓN .....</b>   | <b>61</b> |
| <b>4.2</b> | <b>ESTADO ACTUAL.....</b>                                      | <b>64</b> |
| <b>4.3</b> | <b>IMPORTANCIA DE ROTONDAS .....</b>                           | <b>67</b> |
| <b>4.4</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>                    | <b>70</b> |
| <b>5.</b>  | <b>CASO DE ESTUDIO.....</b>                                    | <b>71</b> |
| <b>5.1</b> | <b>ESTUDIO DE INTERSECCIÓN 1 .....</b>                         | <b>72</b> |
| 5.1.1      | CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INTERSECCIÓN 1.....                | 72        |
| 5.1.2      | CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO INTERSECCIÓN 1 .....                | 73        |
| <b>5.2</b> | <b>ESTUDIO DE INTERSECCIÓN 2 .....</b>                         | <b>79</b> |
| 5.2.1      | CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INTERSECCIÓN 2.....                | 79        |
| 5.2.2      | CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO INTERSECCIÓN 2 .....                | 80        |
| <b>6.</b>  | <b>COMPARACIÓN ENTRE EL ESTADO ACTUAL Y EL PROPUESTO. ....</b> | <b>87</b> |
| <b>6.1</b> | <b>COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS .....</b>        | <b>87</b> |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 6.1.1      | COMPARACIÓN GEOMÉTRICA INTERSECCIÓN 1 .....           | 91         |
| 6.1.2      | COMPARACIÓN GEOMÉTRICA INTERSECCIÓN 2 .....           | 93         |
| <b>6.2</b> | <b>COMPARACIÓN DE CAPACIDAD.....</b>                  | <b>95</b>  |
| 6.2.1      | COMPARACIÓN DE CAPACIDAD PARA LA INTERSECCIÓN 1 ..... | 96         |
| 6.2.2      | COMPARACIÓN DE CAPACIDAD PARA LA INTERSECCIÓN 2 ..... | 97         |
| <b>7.</b>  | <b>CONCLUSIONES. ....</b>                             | <b>101</b> |
| <b>8.</b>  | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                              | <b>103</b> |
| <b>9.</b>  | <b>ANEXOS.....</b>                                    | <b>107</b> |

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 1. Introducción

---

Las vías de comunicación han sido de vital importancia para el crecimiento económico de los países, pero con el paso de los años y debido a la alta tasa de crecimiento vehicular se han evidenciado problemas referentes a congestionamientos y a un alto índice de accidentes. Los puntos conocidos como más críticos de esta red son las intersecciones [1]. Estas intersecciones corresponden a tan solo a una pequeña parte del total del sistema vial, más son los lugares en donde se evidencia mayor número de accidentes de tránsito [2].

Las rotondas han servido como solución en puntos de alta accidentalidad. Estas se caracterizan por ser de tipo circular en donde los vehículos se desplazan en sentido de las manecillas del reloj (excepto en los países en donde se circula por el carril izquierdo). La característica fundamental de una rotonda es que los vehículos que se encuentran dentro del anillo de circulación tienen prioridad sobre los vehículos que se encuentran en las diferentes entradas [3]. Debido a las grandes ventajas que poseen las mismas, estas se han incrementado de manera acelerada en todo el mundo.

Una rotonda puede disminuir considerablemente la velocidad a la vez que disminuye también los puntos de conflictos de una intersección [4]. En Australia se han implementado en los últimos años 230 rotondas dando como resultados una disminución total de accidentes del 41%, un 45% en la reducción de accidentes con lesiones y una reducción del 65% de accidentes con consecuencias fatales [5]. Las rotondas se enfocan principalmente en la disminución de los puntos de conflicto a 90 grados, los cuales son los causantes de accidentes graves [6]. 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 [5].

A pesar de las grandes ventajas que tienen este tipo de intersecciones, se ha podido observar como dentro del diseño de las rotondas se encuentran inmersos diferentes factores los cuales contribuyen de manera significativa a la generación y severidad de los accidentes, dentro de esos se destacan los factores geométricos, los cuales son

generadores del 60% de los accidentes [7]. Con el paso del tiempo han sido estudiados estos tipos de factores generando así la conformación de diferentes normas y manuales de diseño establecidos en cada país. Con la implementación de normas y de controles más estrictos en los diseños se ha podido evidenciar que en las rotondas implementadas en la actualidad ocurren menos accidentes que en rotondas antiguas [6].

El Ecuador en el año 2003 emite las “Normas de Diseño Geométrico de Carreteras” (NDGC) [8]. Esta norma utiliza como criterio fundamental de diseño la llamada longitud entrecruzamiento, la cual dejó de utilizarse desde la década de los 60s, estableciendo criterios básicos de diseño. Posteriormente se realizó una actualización de la NDGC, generando la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 [9], que se encuentra en revisión actualmente, dicho documento no presenta información acerca de las intersecciones a nivel tipo rotondas; es por tal motivo que en el país se presentan intersecciones heterogéneas generando graves problemas en la operación y seguridad [10] . Es fundamental estudiar los parámetros geométricos que actualmente son utilizados en diferentes países, con la finalidad de establecer parámetros de diseño apegados que puedan ser utilizados en el Ecuador.

Un punto fundamental que determina el desempeño de una rotonda es la capacidad. A partir del análisis de la capacidad es posible medir la calidad de operación establecida a través del nivel de servicio. La norma vigente NDGC, no dispone de una sección para determinar la capacidad de las rotondas, por lo que es necesario generar una evaluación de las últimas metodologías de cálculo de capacidad utilizadas a nivel mundial, con el fin de establecer la metodología que refleje de mejor manera el impacto que tienen los parámetros geométricos en la capacidad.

Lo que busca esta investigación, es recomendar parámetros geométricos para el diseño de rotondas simples y múltiples en las zonas urbanas, que permitan establecer intersecciones que disminuyan la velocidad de circulación, las cuales mantengan o mejoren la capacidad y nivel de servicio, con lo cual se beneficiará directamente a todos los usuarios que diariamente transitan por este tipo de intersecciones.

El resto de la investigación se encuentra organizada de la siguiente manera: En el capítulo 2 se presenta el estado del arte, en donde se ha realizado un análisis histórico de la evolución de las rotondas, seguido por la descripción de los diferentes tipos, así como también se presenta una comparación de los parámetros geométricos vigentes en normas de diseño de diferentes países, se realiza también un análisis de las metodologías del cálculo de capacidad, finalmente en este capítulo se presenta un estudio de las ventajas y desventajas que tienen las rotondas en comparación con otro tipo de intersecciones. En el capítulo 3 se genera un análisis de la accidentalidad producida en las rotondas, en donde se identifica los parámetros que influyen en mayor medida a la generación de accidentes, los cuales son tomados en cuenta para la recomendación de parámetros geométricos que puedan ser aplicados en el Ecuador. El capítulo 4 genera una descripción de la importancia que tienen las rotondas en la ciudad de Cuenca. En el capítulo 5 se presenta las principales características geométricas y de tráfico de las dos intersecciones en estudio, en donde a la vez se determinan los flujos existentes para el año 2017. En el capítulo 6 se presenta la comparación entre el estado actual y el rediseño efectuado a partir de los parámetros establecidos, en donde se genera una comparación de los parámetros geométricos, así como también de la capacidad y de los niveles de servicio. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 2. Estado del Arte

---

### 2.1 Reseña Histórica

---

El primer concepto de intersecciones giratorias se implementó en el año de 1903 por el diseñador francés Eugene Hernald [11], a este tipo de intersecciones se las llamó “círculos de tráfico” y se popularizaron en Europa como solución a intersecciones congestionadas con más de cuatro aproximaciones. Paralelamente en Estados Unidos, el diseñador William Phelps en el año de 1905 genera la primera intersección giratoria implementada en New York y llamada “Columbus” [3]. A partir de la creación de la primera intersección giratoria se produjo una rápida popularización de estas soluciones de tráfico las cuales adquirieron el nombre de “rotativas”. Tanto las intersecciones implementadas en Europa (círculos de tráfico) como en Estados Unidos (rotativas) utilizaban la regla de prioridad a la derecha, es decir que los vehículos que circulan dentro del anillo deben ceder al paso a los vehículos que desean ingresar a la intersección. En la Figura 2-1 se puede observar un ejemplo de una intersección rotativa implementada en Texas, Estados Unidos y en la Figura 2-2 se presenta una intersección conocida como círculos de tráfico implementada en Francia.



*Figura 2-1: Intersección Rotativa. [3]*

En el año de 1936 aparece el nombre de “Roundabout” o rotonda el cual fue introducido por el Ministerio de Transporte de Estados Unidos. Para el año de 1942 se crea la primera guía de diseño para rotondas llamada “rotary” elaborada por la AASTHO [11]. Durante este tiempo las intersecciones construidas poseían grandes dimensiones, ya que, la capacidad de la misma se medía en función de la capacidad del anillo de circulación a

partir de una longitud de entrecruzamiento que permita el cruce de los vehículos. Este tipo de intersecciones generaban flujos discontinuos debido a la vigencia de la regla de prioridad de la derecha, en ocasiones el flujo de la entrada era predominante, produciendo colas de vehículos dentro del anillo de circulación que podían bloquear la intersección por completo, también generaba altas velocidades de circulación y por ende altos índices de accidentes. En la década de los sesenta muchos países abandonaron el uso de estas intersecciones [6].



*Figura 2-2: Círculos de Tráfico. [3]*

En Reino Unido en 1996 [12] se desarrolla un nuevo concepto en intersecciones giratorias a las cuales se las llama “rotondas compactas”, su principal característica es que los vehículos que transitan por el anillo de circulación tienen prioridad por sobre los que desean ingresar, esto provocó que se cambie el método de cálculo de la capacidad, el cual se calcula en función de la capacidad de cada entrada de la intersección. Con este nuevo concepto se construyeron rotondas más pequeñas que son capaces de disminuir la velocidad mediante el aumento de las deflexiones en las entradas y por ende se produjo una reducción de accidentes. En la Figura 2-3 se presenta la reconstrucción de una rotonda tipo rotativa en una rotonda compacta.



*Figura 2-3: Cambio de intersección tipo Rotativa en Rotonda Compacta, Kingston, New York. [3]*

Actualmente en la mayoría de países se utilizan las rotondas compactas, que son de tipo circular en donde los vehículos se desplazan en sentido de las manecillas del reloj

(excepto en los países en donde se circula por el carril izquierdo). La característica fundamental de una rotonda compacta es que los vehículos que se encuentran dentro del anillo de circulación. Producto del cambio de la regla de prioridad, las rotondas poseen menores dimensiones, generando una disminución en la velocidad de circulación, tal como se muestra en la Figura 2-4 [3].



Figura 2-4: Rotonda Compacta, Camel, Indiana. [3]

## 2.2 Tipos de Rotondas

---

Los manuales o normas de diseño geométrico presentan diferentes tipos de clasificaciones para las rotondas, las cuales se encuentran enfocadas principalmente: en el medio en donde se emplazan, las características físicas que poseen, la existencia o no de semáforos, si son elevadas o deprimidas, etc. A continuación, se explicará los tipos de rotondas basados en la categorización realizada en las normas vigentes de Estados Unidos [3], en donde esta clasificación se encuentra enfocada principalmente en las dimensiones y el número de carriles.

### 2.2.1 Minirotondas

---

Este tipo de intersecciones se encuentran ampliamente utilizadas, pero en el Ecuador su implementación es casi nula. Se localizan en zonas urbanas con vías de baja velocidad (menos de 50 km/h). Son las rotondas más pequeñas con un diámetro del círculo inscrito (DCI) entre 13-27m y un diámetro máximo de la isla central de 4m, el cual está pintado o materializado con pavimento. La principal característica es que su isla central puede ser atravesada por los vehículos largos. Estas rotondas generan un menor derecho de vía y por lo tanto menores costos en la construcción. Es recomendable que la máxima velocidad de diseño en las entradas se encuentre entre los 25-30 km/h con un carril de aproximación, lo cual genera que los peatones y ciclistas tengan mayores facilidades para atravesarla.

La desventaja es que por su diseño compacto no son capaces de generar suficiente deflexión en las entradas, lo cual incrementa la velocidad de circulación. Según las investigaciones realizadas este tipo de rotondas poseen una capacidad en sus cuatro

ramales de 15.000 veh/día. En la Figura 2-5 se puede observar las principales características geométricas.

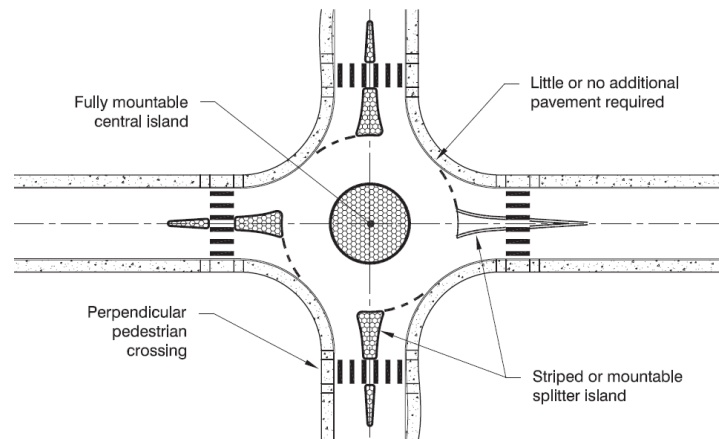


Figura 2-5: Características de Minirotondas. [3]

## 2.2.2 Rotondas Simples

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 27-55m, 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 vehículos. Las rotondas al poseer mayores dimensiones son capaces de ofrecer mayor capacidad vial, la cual se encuentra sobre los 25.000 veh/día. Este tipo de intersecciones posee islas separadoras en las entradas, con lo cual es posible generar mayores deflexiones al ingreso que disminuyen la velocidad a la vez que sirven de refugio para que los peatones puedan completar el cruce. Es recomendable que la velocidad de diseño en la entrada se encuentre entre 30-40 km/h. En la Figura 2-6 se presenta una rotonda simple con sus principales características.

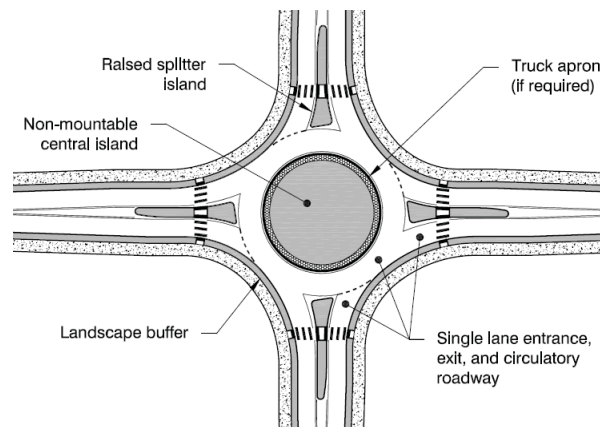


Figura 2-6: Características de Rotondas Simples. [3]

## 2.2.3 Rotondas Múltiples

Este tipo de rotondas poseen por lo menos una de las entradas con dos o más carriles de aproximación y con dos o más carriles de circulación. Son capaces de soportar el paso de 45.000 veh/día, semejante a la capacidad de una intersección semaforizada. El DCI varía entre 46-91m. Al igual que las rotondas simples, estas poseen islas separadoras que ayudan a generar deflexiones en la entrada para poder disminuir la velocidad, esta velocidad se debe encontrar entre los 40-50 km/h. Las islas separadoras también ayudan a generar un refugio para el paso de peatones. A continuación, en la Figura 2-7 se muestra las características geométricas de las rotondas múltiples.

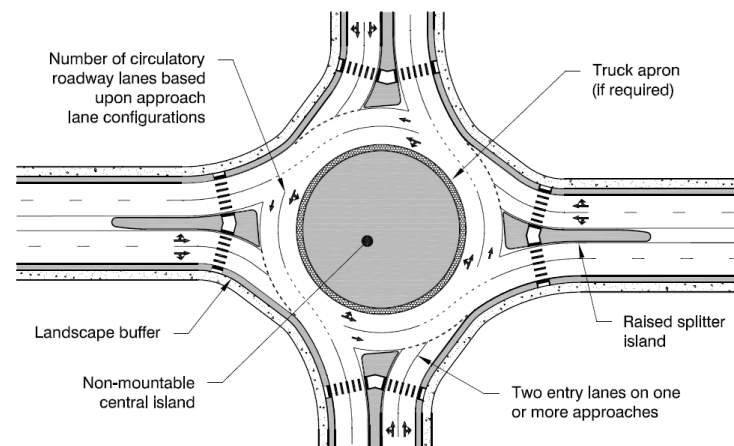


Figura 2-7: Características de Rotondas Múltiples. [3]

Las rotondas múltiples tienen serios problemas especialmente para los ciclistas y peatones, es por ello que en Alemania se prohíbe que los ciclistas ingresen al anillo de circulación en las rotondas múltiples, recomendando que estos realicen el mismo recorrido que los peatones. No se recomienda la construcción o colocación de ningún elemento sobre la isla central con lo cual se genera una mayor visibilidad aumentando la seguridad [13].

## 2.3 Parámetros Geométricos

### 2.3.1 Reseña Histórica

En el año 2003 el Ecuador emitió las “Normas de Diseño Geométrico de Carreteras” [8], para lo cual se realizó una revisión y actualización de las “Normas de Diseño Geométrico” elaborado por "T.A.M.S- ASTEC" y revisado por el consorcio de Consultores "LOUIS BERGER INTERNATIONAL, INC. (New Jersey, USA)- PROTECVIA CIA. LTDA. (Quito- Ecuador)". Estas normas se crearon con la finalidad de considerar la topografía especial sobre las que se asienta el país. En lo referente al diseño geométrico de rotondas, se presenta en el Anexo 1 una descripción básica en donde entre otras cosas se menciona que “su utilización está cayendo en desuso por los bajos volúmenes de tráfico que puede

mover y por las velocidades bajas de intercambio que son necesarias para que su aplicación sea exitosa” [8]. Esta norma como principio fundamental de diseño utiliza la “longitud de entrecruzamiento”, este criterio fue introducido en la primera guía de diseño de rotondas llamada “rotary”, la cual se elaboró en el año de 1942 y fue publicada por la AASTHO. El concepto general es que los grandes radios dan largas secciones de entrecruzamiento y por lo tanto se podría mantener altas velocidades y capacidad [11], eso genera que las rotondas abarquen áreas demasiado extensas en comparación con otro tipo e intersecciones a nivel. Una consecuencia de utilizar largos diámetros (rotondas antiguas), es que estas son capaces de generar un aumento de la velocidad y puede causar malos movimientos por parte de los conductores, los que consecuentemente generan mayores lesiones en los accidentes [14]. A continuación, se presenta en la Figura 2-8 las principales características geométricas consideradas en la norma vigente en el Ecuador.

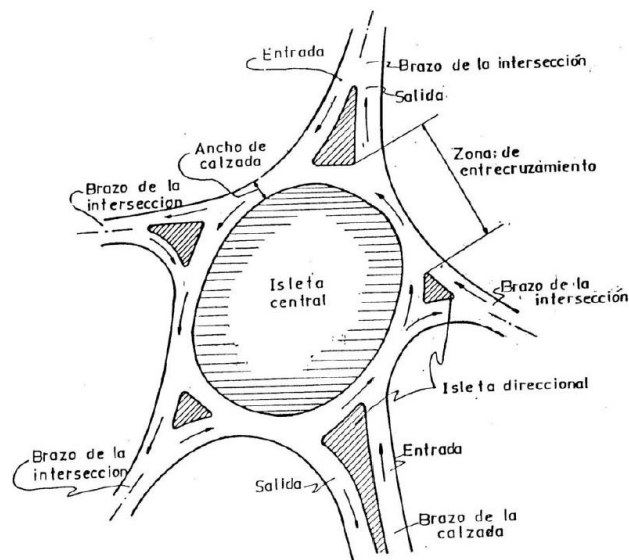


Figura 2-8: Características geométricas de una rotonda. [8]

Es importante mencionar que esta norma recomienda consultar para diseños complementarios o detalles las siguientes publicaciones: ASSHTO, “A Policy in Geometric Design of Rural Highways”, del “Highway Research Board”, “Highway Capacity Manual” y el libro “Camino en el Ecuador, Estudio y Diseño—1989”, las cuales poseen criterios a la vez muy básicos para el diseño de intersecciones tipo rotondas.

Posteriormente se realizó una actualización, revisión y complementación por Coordinadores Técnicos del MTOP y un equipo técnico conformado por INDEPRO & COA – CONSULTORA ASOCIADOS a partir de NDGC, generado así la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 que se encuentra actualmente en revisión. La norma NEVI-12 en el volumen 2A referente a la Norma para Estudios y Diseño Viales, no presenta información acerca de las intersecciones a nivel tipo rotondas, aunque en el capítulo 2 menciona que “En la presente Norma no se restringen los tipos de solución para una intersección dada. Los ingenieros, con su creatividad y buen juicio, podrán proponer las alternativas que consideren adecuadas para las condiciones particulares del proyecto”

[9]; es decir deja abierto la posibilidad al diseñador de establecer parámetros para la generación en este caso de rotondas, lo que evidentemente se traducirá en la creación de intersecciones heterogéneas que generan confusión a los usuarios provocando un posible aumento de accidentes.

El Gobierno Central de la República del Ecuador, otorgó las competencias sobre las vías urbanas a cada Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD), es por ello que se ha realizado una investigación de las normas vigentes en referencia al diseño de intersecciones urbanas de las tres ciudades más importantes del Ecuador: Quito, Guayaquil, y Cuenca; en donde solo para el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se ha generado la ordenanza 3746 llamada “Normas Arquitectónicas y Urbanísticas”, la misma que en el capítulo 3, parágrafo 3° “Elementos de Sistema Vial” en su art 35 “Facilidades de tránsito”, presenta criterios básicos para el diseño de Rotondas [15], evidenciándose de esta forma la falta de un criterio claro para el diseño de este tipo de intersecciones en el país.

### **2.3.2 Comparación de Normas**

---

Con la finalidad de tener una visión global de los parámetros necesarios desde el punto de vista geométrico para un correcto diseño de una rotonda en función de su seguridad y capacidad, se han escogido las normas vigentes de 5 países representativos, a las cuales se las comparará los parámetros geométricos para las denominadas rotondas normales y múltiples implantadas en zonas urbanas.

Como principal documento se estableció el “Manual de Planeamiento das Acessibilidades e da Gestão Viária” [6] 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 (U.S.A) llamado “Roundabout: An Information Guide” [3]; el tercer documento seleccionado debido a la experiencia en rotondas es el manual de Reino Unido (U.K) llamado “Design Manual for Roads and Bridges” [16]; el cuarto documento utilizado es el vigente en España llamado “Guía de Nudos Varios” elaborado a partir de la Orden Circular 32/2012 [17]; 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) [15].

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 [3], 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 la misma [7]; 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.

### 2.3.2.1 Vehículo de Proyecto

Uno de los parámetros más importantes en el diseño de rotondas es el vehículo de proyecto, ya que de él dependerán muchas otras dimensiones de la intersección [3]. Una de las características principales de las rotondas es la baja velocidad de circulación que generan en los vehículos, esto si bien es beneficioso desde el punto de vista de la seguridad, desde el punto de vista geométrico es una desventaja ya que, dependiendo del vehículo a utilizar para el diseño, este deberá tener determinados radios de giro para que pueda realizar todos los movimientos permitidos. En la Tabla 2-1 se presenta la comparación del vehículo de diseño utilizado en las distintas normas en estudio.

Tabla 2-1: Comprobación del Vehículo de diseño

| MANUAL PORTUGUES |              | MANUAL U.S.A     |              | MANUAL U.K                         |              | MANUAL ESPAÑOL                     |              | MANUAL DE DMQ   |              |
|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|---|--------------|
| Tipo de vehículo | Longitud (m) | Tipo de vehículo | Longitud (m) | Tipo de vehículo                   | Longitud (m) | Tipo de vehículo                   | Longitud (m) | Tipo de vehículo  | Longitud (m) |
| Semi-remolque    | 16.5 m       | WB-50 (WB-15)    | 15.24        | Vehículo articulado con eje simple | 15.5         | Vehículo articulado con eje simple | 16.5         | <i>Se debe realizar un estudio de tráfico en las entradas, escogiendo el más desfavorable</i> |              |

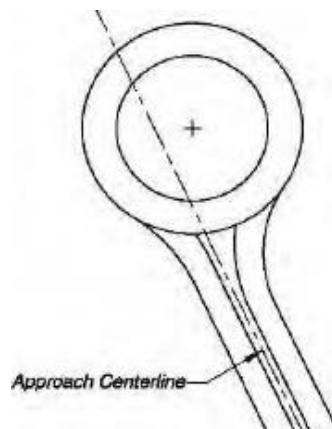
Los valores presentados, exceptuando la norma vigente para el DMQ, muestran valores semejantes entre los 15-16.5 m de longitud. En el caso en donde se posea incertidumbre acerca del tipo de vehículos, se recomienda que se realice un análisis de tráfico; por ejemplo en la norma española debido a la gran presencia de sistemas BRT (Bus Rapid Transit) recomienda que en las intersecciones por donde pasen los buses biarticulados, se tome como longitud del vehículo de diseño 18.5m. Es importante mencionar que para la norma de U.S.A se recomienda que el vehículo de diseño sea capaz de atravesar la intersección sin ningún inconveniente, en el caso de que la intersección no pueda garantizar su correcto movimiento se propone la adición de los llamados “Truck Apron”, el cual se describe en la sección 2.3.2.6.

### 2.3.2.2 Isla Central

El objetivo principal de la isla central es el de brindar una adecuada trayectoria a los ramos afluentes generando movimientos homogéneos en todas las entradas. Un correcto posicionamiento y dimensionamiento de la isla central, evita que los vehículos realicen

trayectorias rectas al cruzar la intersección, con lo cual se perdería la percepción del conductor del derecho de paso [6]. Con un correcto diseño del anillo de circulación y del DCI, es posible establecer dimensiones que puedan acomodar los vehículos largos, manteniendo a la vez velocidades bajas en los vehículos livianos [3]. Los resultados de la comparación se muestran en la Tabla 2-2.

Lo que se pretende en todas las normas expuestas es el de generar una situación equilibrada de la acción que posee la isla central para cada uno de los ramales de ingreso. Para el posicionamiento de la isla central se recomienda que como condición ideal se genere un desfase hacia la izquierda entre los ejes de los ramales de entrada y el centro de la isla, debido a que se puede garantizar velocidades más bajas de ingreso producto de radios de giro más pequeños, disminuyendo accidentes por pérdida de control en la entrada de la intersección [3], este desfase genera a la vez una mayor facilidad en la salida. En la Figura 2- 9, 2-10 y 2-11 se presentan la ubicación de la isla central a la derecha del ramal de entrada, dentro del ramal de entrada y a la izquierda del ramal de entrada respectivamente.



*Figura 2-9: Posicionamiento de la isla central hacia la derecha del ramal de entrada, situación ideal.*

[3]

Tabla 2-2: Comprobación de la Isla Central

| PARÁMETROS                              | MANUAL PORTUGUES  | MANUAL U.S.A  | MANUAL U.K  | MANUAL ESPAÑOL  | MANUAL DE DMQ  |  |     |                                |     |        |
|---|---|---|---|---|--|--|-----|--------------------------------|-----|--------|
| Posicionamiento de la isla central      | Condición 1: Los ejes de ramales deben estar en el centro de la isla central  | Condición 1: El eje de los ramales debe estar desfasado hacia la izquierda del centro.  | Condición 1: Tiene que garantizar que se forme un ángulo de deflexión en las entradas                         | Condición 1: El eje de los ramales debe estar desfasado hacia la izquierda del centro, siempre y cuando no genere un radio brusco de entrada.   | No define  |  |     |                                |     |        |
|   | Condición 2: El centro de la isla central debe estar en el polígono formado por los ejes de ramales.  | Condición 2: Los ejes de los ramales coinciden con el centro de la isla   |   | Condición 2: Los ejes de los ramales coinciden con el centro de la isla   |  |  |     |                                |     |        |
|   | Nota: es recomendable que exista un ligero descentramiento de los ramos secundarios hacia la izquierda para generar deflexiones en la entrada mejorando así la seguridad. | Condición 3: El eje de los ramales deben estar desfasados hacia la derecha del centro; esta condición es poco usada, se recomienda su utilización cuando existan DCI grandes. | Condición 2: El eje de los ramales deben estar desfasado hacia la izquierda, con una distancia entre 15-20 m. |   |  |  |     |                                |     |        |
| Distancia entre ramales de aproximación | < 20 m medidos de los extremos próximos de la isla separadora a nivel de DCI  | El ángulo entre los ramales debe ser cercano a 90° y máx. 105°  | No define   | Que no sea menor a 60° el ángulo formado a partir del centro de la isla central con dos puntos de intersección de la calzada anular: uno con la situación más desfavorable de entrada y otro con lo más desfavorable de salida. | No define  |  |     |                                |     |        |
| Número de carriles                      | ≥ al número máximo de carriles en la entrada  | ≥ al número máximo de carriles en la entrada  | ≥ al número máximo de carriles en la entrada  | igual al número máximo de carriles en la entrada  | No define  |  |     |                                |     |        |
| Ancho de carriles                       | Max valor entre 1-1.2 veces el ancho de la entrada máxima y los valores generados en la Tabla 2-3   | Número de carriles circulación  | (m)   | Entre 1-1.2 veces el ancho de la entrada máxima, excluyendo el ancho de las bermas.   | Depende de la hipótesis de paso, expresada en la Tabla2- 4 | Max valor entre 1-1.2 veces el ancho de la entrada máxima. |     |                                |     |        |
|   |   | 1   | 4.3-4.9   |   |  |  |     |                                |     |        |
|   |   | 2   | 8.5-9.8   |   |  |  |     |                                |     |        |
|   |   | 3   | 12.8-14.6   |   |  |  |     |                                |     |        |
| Diámetro del círculo inscrito           | Número de carriles circulación  | (m)   | Número de carriles circulación  | (m)   | máx.= 100m, mín.=28m                                       | Número de carriles circulación                             | (m) | Número de carriles circulación | (m) |        |
|   | 1   | 30-40   |   | 1   |  | 32-46  | 1   | 30-40                          | 1   | 50-80  |
|   | 2   | 40-50   |   | 2   |  | 46-67  | 2   | 45-55                          | 2   | 80-120 |
|   | múltiples   | 60  |   | múltiples   |  | 61-76  |     |                                |     |        |
| Radio de la isla central                | Se recomienda que se encuentre entre 8-20   | Depende del Vehículo de diseño, del DCI y del ancho de circulación  | Depende del Vehículo de diseño, del DCI y del ancho de circulación  | No define   | No define  |  |     |                                |     |        |

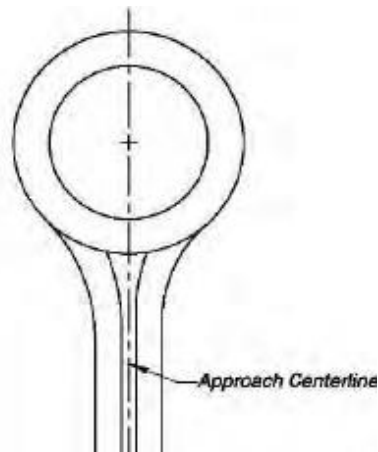


Figura 2-10: Posicionamiento de la isla central dentro del ramal de entrada, situación aceptable. [3]

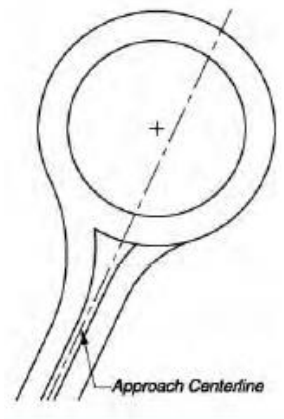


Figura 2-11: Posicionamiento de la isla central hacia la izquierda del ramal de entrada, situación no aceptada. [3]

La distancia entre ramales varía dependiendo de cada norma. En la norma de Portugal se establece una distancia mínima que deberá tener esta separación en relación de las islas separadoras, mientras en que la norma de U.S.A se exige un valor máximo para el ángulo formado por los ejes de los ramales, esto con el fin de no generar trayectorias rectas a los vehículos que se traduce en mayor velocidad en la entrada; en contraste con esto la norma de España define un ángulo mínimo formado por el centro de la isla y la intersección de la trayectoria más desfavorable a la entrada y salida, esto con el objetivo de evitar la formación de ángulos de entrada altos. Se presentan más accidentes en una rotonda que posee tres ramales de aproximación en comparación con una rotonda que posee cuatro o más ramales de aproximación, debido principalmente que en la intersección con tres ramales las velocidades de aproximación son mayores [4].

El número de carriles en todas las normas establece que debe ser mayor o igual que el número máximo de carriles en las entradas, aunque en la norma de Portugal se recomienda especialmente para las zonas urbanas, que se añada un carril más de circulación con el fin de aumentar la capacidad.

El ancho de los carriles tanto en la norma de Portugal, norma de U.K y la norma de DMQ, establecen que sea por lo menos un 20% mayor al ancho de entrada, esto con el objetivo de garantizar que los giros de los vehículos largos se produzcan de manera segura. La norma U.S.A establece valores recomendados dependiendo del número de carriles establecidos. Un caso particular se presenta en la norma de Portugal, en donde se ha generado valores del ancho de la calzada anular en función de los vehículos que puedan pasar en simultáneo con un determinado radio de la isla central, estos valores son presentados en la Tabla 2-3 en donde se incluye una berma de 1m.

Tabla 2-3: Ancho de la calzada anular. [6]

| Número de vías de circulación en el anillo       |   |         |   |         |   |         |
|--|---|---------|---|---------|---|---------|
|  | Una Vía                                       |         | Dos Vías  |         | Tres Vías   |         |
| Radio de la Isla Central, incluido berma, Ri (m) | Faja de ocupación (1 vehículo articulado) (m) | DCI (m) | Faja de ocupación (1 vehículo articulado+1 vehículo ligero) (m) | DCI (m) | Faja de ocupación (1 vehículo articulado+2 vehículos ligeros) (m) | DCI (m) |
| 3  | 10  | 28      | --  | --      | --  | --      |
| 4  | 9.4   | 28.8    | --  | --      | --  | --      |
| 5  | 8.9   | 29.8    | --  | --      | --  | --      |
| 6  | 8.4   | 30.8    | --  | --      | --  | --      |
| 7  | 8   | 32      | 1.9   | 39.8    | --  | --      |
| 8  | 7.6   | 33.2    | 1.5   | 41      | --  | --      |
| 9  | 7.3   | 34.6    | 1.2   | 42.4    | --  | --      |
| 10   | 7   | 36      | 10.9  | 43.8    | 14.8  | 51.6    |
| 11   | 6.7   | 37.4    | 10.3  | 45.2    | 14.5  | 53      |
| 13   | 6.5   | 41      | 10.3  | 48.6    | 14.2  | 56.4    |
| 15   | 6.2   | 44.4    | 10.1  | 52.2    | 14  | 60      |
| 17   | 6   | 48      | 9.9   | 55.8    | 13.8  | 63.6    |
| 19   | 5.9   | 51.8    | 9.7   | 59.4    | 13.6  | 67.2    |
| 21   | 5.7   | 55.4    | 9.6   | 63.2    | 13.5  | 71      |
| 23   | 5.6   | 59.2    | 9.5   | 67      | 13.4  | 74.8    |
| 25   | 5.5   | 63      | 9.4   | 70.8    | 13.3  | 78.6    |
| 27   | 5.4   | 66.8    | 9.3   | 74.6    | 13.2  | 82.4    |
| 29   | 5.4   | 70.8    | 9.2   | 78.4    | 13  | 86      |
| 31   | 5.3   | 74.6    | 9.1   | 82.2    | 12.9  | 89.8    |
| 51   | 5   | 114     | 8.8   | 121.6   | 12.6  | 129.2   |
| 101  | 4.6   | 213.2   | 8.4   | 220.8   | 12.2  | 228.4   |

La norma de España también establece los valores del ancho del carril de circulación en función del porcentaje de vehículos pesados que atraviesan la intersección, este principio es conocido como “Hipótesis de Paso” presentado en la Tabla 2-4.

Una vez establecido la situación que se presentará en la intersección, es posible determinar el ancho del carril para lo cual es necesario conocer también el DCI; a continuación, se presenta la Tabla 2-5 con los valores respectivos en donde no se encuentra incluido la longitud de bermas.

Tabla 2-4: Hipótesis de paso. [6]

| CIRCUNSTANCIAS DE LA EXPLOTACIÓN          |  | ORDINARIAS   | EXTRAORDINARIAS <sup>1</sup>   |
|---|--|--|--|
| Calzada anular de un carril (Situación I) | Proporción no significativa de vehículos pesados                                 | Furgón   | Vehículo articulado  |
|   | Proporción significativa de vehículos pesados, pero no de autobuses              | Camión ligero  |  |
|   | Proporción significativa de autobuses  | Autobús rígido   |  |
| Calzada anular de dos carriles            | Intensidad de vehículos pesados <sup>2</sup> $\leq$ 200 veh. p./h (Situación II) | 2 turismos simultáneamente <sup>3</sup>                  | El más desfavorable de:<br>• Vehículo articulado<br>• Turismo + furgón simultáneamente |
|   | Intensidad de vehículos pesados <sup>2</sup> > 200 veh. p./h                     | Presencia no significativa de autobuses. (Situación III) | Tren de carretera  |
|   |  | Presencia significativa de autobuses. (Situación IV)     |  |
|   |  | Camión ligero + turismo simultáneamente <sup>3</sup>     |  |
|   |  | Autobús rígido + turismo simultáneamente <sup>3</sup>    |  |

Tabla 2-5: Ancho de la calzada anular con dos carriles. [17]

| DIÁMETRO EXTERIOR (m)<br>DE LA CALZADA ANULAR | HIPÓTESIS DE PASO <sup>2</sup> |     |      |
|---|--------------------------------|-----|------|
|   | II                             | III | IV   |
| 28  | 8,0                            | 9,6 | 12,6 |
| 32  | 7,7                            | 9,1 | 11,1 |
| 36  | 7,5                            | 8,7 | 10,4 |
| 40  | 7,4                            | 8,5 | 9,9  |
| 44  | 7,3                            | 8,3 | 9,5  |
| 48  | 7,2                            | 8,1 | 9,2  |
| 52  | 7,1                            | 8,0 | 9,0  |
| 56  | 7,0                            | 7,9 | 8,8  |
| 60  | 7,0                            | 7,8 | 8,6  |

Si se realiza una comparación del ancho de calzada entre los valores generados en las normas, se puede observar como la norma de Portugal proporciona valores mucho más conservadores los cuales se asemejan en dimensión a los valores generados por la norma de España para la hipótesis de paso IV.

El DCI posee valores semejantes, a los cuales por lo general se los ha dividido dependiendo del número de carriles de circulación. Es evidente que el radio de la isla central se encuentra relacionado con el DCI, por lo que al ser los valores del DCI semejantes se asume que los radios de la isla central mantienen esa relación.

En esta sección se puede observar que muchos de los parámetros no son considerados en las normas de DMQ y que los valores que si son tomados en cuenta varían considerablemente de las otras normas en estudio.



Tabla 2-6: Comprobación de la Entrada

| PARÁMETROS                       | MANUAL PORTUGUES  | MANUAL U.S.A   |                                  | MANUAL U.K  |                                     | MANUAL ESPAÑOL  | MANUAL DE DMQ       |
|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|---------------------|
| Número de carriles               | <i>≤ 3 en total, se recomienda aumentar un carril en la entrada</i>                                       | <i>1 para rotondas simples y 2 o más para múltiples rotondas, dependiendo de la demanda de tráfico</i> |                                  | <i>≤ 2 carriles, se permite aumentar hasta dos carriles en la entrada</i> |                                     | <i>≤ 3 en total; se permite aumentar un carril en la entrada</i>  | <i>No define</i>    |
| Ancho total de entrada           | <i>recomendable: 4-12m, &lt; 15m para 4 carriles de entrada, &gt; 3 m para un solo carril de entrada.</i> | <b># de carriles circulación</b>   | <b>(m)</b>                       | <b># de carriles circulación</b>  | <b>(m)</b>                          | <i>Condición 1: El ancho del carril de entrada debe ser el mismo que el ancho del carril de aproximación, el cual debe ser &gt;2.5m</i> | <i>No define</i>    |
|                                  |   | 1  | 4.2-5.5                          | 1   | >3, recomendado:4.5                 |   |                     |
|                                  |   | 2  | 7.3-9.1                          | múltiples   | 3-3.5 por carril, en total máx. 15m | <i>Condición 2: Si se añade carriles el ancho de entrada no puede ser mayor al ancho de circulación en la entrada en estudio</i>        |                     |
|                                  |   | 3  | 11.1-13.7                        |   |                                     |   |                     |
| Ancho por carril de aproximación | > 2.5 m   | <i>No define</i>   |                                  | 3-3.5 m   |                                     | > 2.5 m, preferible 3.3m  | 3-3.65 m            |
| Longitud de Cola                 | > 5 m   | <i>No define</i>   |                                  | > 5 m   |                                     | <i>No define</i>  | <i>No define</i>    |
| Ángulo de entrada                | <b>Condición recomendable: 20-60°</b>   | <b>Condición recomendable: 20-40°</b>  |                                  | <b>Condición recomendable: 20-60°</b>                                     |                                     | <b>Condición recomendable: 20-60°</b>   | <i>No define</i>    |
|                                  | <b>Condición ideal: 30-40°</b>  |  |                                  |   |                                     | <b>Condición ideal: 25°</b>   |                     |
| Radio de entrada                 | <i>&gt; 10 m, &lt; 50m, recomendable: 20-30m</i>  | <i>rotonda simple 15-30m, rotonda doble &gt; 20m</i>   |                                  | <i>&gt; 10m y &lt; 100m, recomendado: 25m</i>                             |                                     | <i>No define</i>  | <i>No define</i>    |
| Velocidad a la entrada           | <b># de carriles circulación</b>  | <b>(km/h)</b>  | <b># de carriles circulación</b> | <b>(km/h)</b>   | <i>No define</i>                    | <i>máx. 40 km/h</i>   | <i>máx. 40 km/h</i> |
|                                  | 1   | 35   | 1                                | 32-40   |                                     |   |                     |
|                                  | múltiples   | 40   | múltiples                        | 40-48   |                                     |   |                     |

Las normas no poseen una diferencia significativa para el ancho de los carriles de aproximación, a la vez que este parámetro no es relevante en el diseño. Es posible dependiendo de las disponibilidades de espacio que se adopte cualquiera de los valores propuestos en la Tabla 2-6. Para el caso de Ecuador en NDGC se establece que el ancho del carril mínimo debe ser mayor o igual a 2.5m y el ancho máximo de un carril de circulación es de 3.65m, lo que concuerda con la norma del DMQ.

La longitud mínima de cola recomendada por las normas debe ser mayor a 5 m. El cálculo de este valor en la entrada se puede determinar en función de lo expuesto en la Figura 2-13, en donde  $l'$  es la longitud de interés.

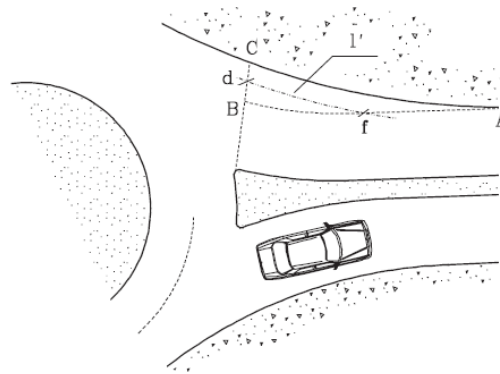


Figura 2-13: Longitud de cola. [6]

El ángulo de entrada, el radio y la velocidad de ingreso son parámetros que se encuentran directamente relacionados entre sí y son de vital importancia en el diseño. Tienen la capacidad de disminuir la diferencia entre la velocidad de circulación en el anillo y la entrada. Un ángulo de entrada pequeño genera movimientos bruscos que en muchos de los casos produce choques de tipo lateral-frontal entre los vehículos, así como choques por pérdida de pista [18]; mientras que un valor alto de este ángulo genera un ingreso de los vehículos a velocidades altas y la presencia de accidentes tipo angulares-angulares. El cálculo del ángulo de entrada es presentado en la Figura 2-14. A partir de los datos expuestos en la Tabla 2-6 se puede establecer que estos parámetros permanecen constantes para todas las normas estudiadas.

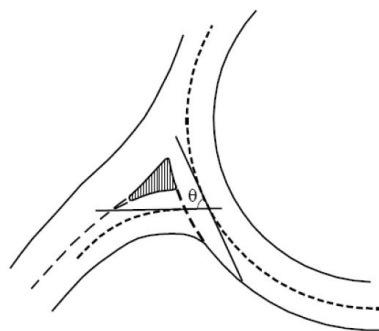


Figura 2-14: Ángulo de entrada. [17]

## 2.3.2.4 Salida

El principio de los parámetros de salida es el de garantizar la seguridad, así como evitar el congestionamiento por un bloqueo en los ramales. La geometría en las salidas no generará un efecto directo en la capacidad de una rotonda, lo que se busca es establecer condiciones geométricas que generen una salida rápida de los vehículos garantizando a la vez la seguridad de todos los usuarios. Una rotonda eficiente desde el punto de vista de la seguridad debe dificultar las entradas y facilitar las salidas [6] En la Tabla 2-7 se presentan los parámetros referidos a la zona de estudio.

Tabla 2-7: Comparación de Salida

| PARÁMETROS            | MANUAL PORTUGUES  |   | MANUAL U.S.A                            | MANUAL U.K                            |            | MANUAL ESPAÑOL   |  | MANUAL DE DMQ    |
|-----------------------|---|---|---|---------------------------------------|------------|--|--|------------------|
| Número de carriles    | <i>Recomienda 2 o 1 carril con el ancho suficiente para que en caso de que se quede un carro averiado no tape la intersección</i> |   | <i>Depende el análisis de tráfico</i>   | <i>Depende el análisis de tráfico</i> |            | <i>Por lo menos el mínimo número de carriles del ramal de salida</i> |  | <i>No define</i> |
| Ancho total de salida | <i>Número de carriles circulación</i>   | <i>(m)</i>  | <i>De acuerdo al vehículo de diseño</i> | <i>Número de carriles circulación</i> | <i>(m)</i> | <i>Número de carriles circulación</i>                                | <i>(m)</i>                               | <i>No define</i> |
|                       | 1   | <i>&gt; 4, recomendable 5 sin isla separadora y 7 con isla separadora</i> |   | 1                                     | 7-7.5      | 1  | <i>&gt; 6, recomienda do entre 7-7.5</i> |                  |
|                       | 2   | <i>mín 8</i>  |   | 2                                     | 10-11      | 2  | <i>No define</i>                         |                  |
| Radio de salida       | 20-100 m  |   | 30-60 m, > 15 m                         | > 20 m, < 100m                        |            | No define  |  | No define        |

El número de carriles de salida según las normas de U.S.A y U.K debe estar sujeto a la cantidad de tráfico que por ella circulan. La norma de Portugal sugiere tener entre 1 y 2 carriles en la salida, no se impone 3 carriles porque se asume que si se tiene 3 carriles de entrada, el primero servirá para el giro hacia la izquierda, el siguiente para el paso recto y el último para el giro a la derecha. En la norma de España se especifica que el número de carriles de salida deberá por lo menos ser igual al número de carriles que existe en el ramal de alejamiento de la intersección, es decir lo que se busca es mantener una coherencia de carriles en los ramales de salida.

Tanto la norma de Portugal como la de U.K, mencionan que el radio de salida deberá ser mayor en preferencia al radio de entrada. La norma de U.K además dice que si se diseña una rotonda compacta se recomienda que el radio sea igual que el radio de entrada. La norma de U.S.A se menciona que este radio debe trazarse a partir de la tangente del DCI, como se puede observar en la Figura 2-15.

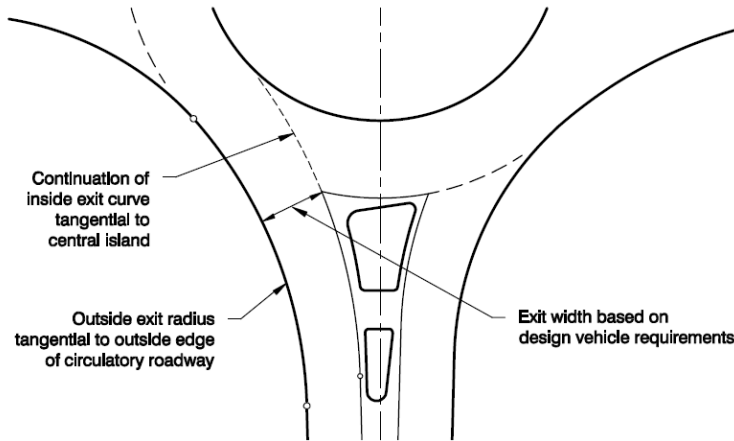


Figura 2-15: Salida de la intersección [3]

### 2.3.2.5 Visibilidad

La visibilidad es una característica fundamental que genera la seguridad en las intersecciones, debido a que 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 garantiza una buena percepción a los conductores del ambiente en el que se ven envueltos, así como de todos los usuarios que comparten el espacio público; también una correcta visibilidad garantiza que los usuarios puedan percibir de una manera clara todas las disposiciones geométricas colocadas en la intersección. Tanto un exceso de visibilidad como la falta del mismo se encuentran asociadas a la generación de accidentes [6], especialmente ocurridos en la entrada por vehículos aislados, es por ello que, se debe tener especial atención al estudio de este parámetro de diseño.

Todas las normas exceptuando la del DMQ presentan el mismo principio de distancias de visibilidad. Es relevante el cumplimiento de la visibilidad de parada, que permite al conductor percibir la presencia del algún objeto o usuario en la vía garantizándole que la acción de frenado culminé antes de golpear al objeto divisado, esta distancia se encuentra verificada en: el ramal de aproximación, dentro del anillo de circulación y hacia el cruce peatonal en el ramal de salida y entrada. Es importante el cumplimiento de la visibilidad de ingreso de los vehículos, esto quiere decir que los conductores de los vehículos cuando se aproximan a la intersección deben tener la capacidad de observar el tráfico que se encuentra dentro del carril circular y el tráfico que se encuentra ingresando por el ramal de entrada izquierdo, para tomar la decisión si realizan una inserción en el tráfico o si se frenan hasta encontrar una brecha segura. En la Tabla 2-8 se presentan todos los parámetros que garantizan una correcta visibilidad en toda la intersección.

Tabla 2-8: Comparación de Visibilidad

| PARÁMETROS   | MANUAL PORTUGUES   |               | MANUAL U.S.A   |  | MANUAL U.K                  |  | MANUAL ESPAÑOL                       | MANUAL DE DMQ |
|--|--|---------------|--|--|-----------------------------|--|--------------------------------------|---------------|
|  | Velocidad de Tráfico (km/h)  | Dp (m)        | Velocidad de Tráfico (km/h)  | Dp (m)   | Velocidad de Tráfico (km/h) | Dp (m)   |                                      |               |
| Distancia de parada en la aproximación                         | 40   | 40            | 40   | 46.2   | <40                         | (V <sup>2</sup> )/R  | No define, solo explica cómo se mide | No define     |
|  | 50   | 60            | 50   | 63.4   | 50                          | 50-70  |                                      |               |
|  | 60   | 80            | 60   | 83.0   | 60                          | 70-90  |                                      |               |
| Distancia de Parada en el carril de circulación                | DCI (m)  | a (m)         | Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación                                | DCI (m)  | a (m)                       | Condición 1: Hasta la siguiente salida   | No define                            |               |
|  | ≤40  | Todo el cruce |  | ≤40  | Todo el cruce               |  |                                      |               |
|  | 40-60  | 40            |  | 40-60  | 40                          | Condición 2: mín. 40m  |                                      |               |
|  | 60-100   | 50            |  | 60-100   | 50                          |  |                                      |               |
| Distancia de parada en zonas peatonales en la entrada y salida | Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación          |               | Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación                                | Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación          |                             | Se debe ver la totalidad del paso cebra medido desde la línea de cedencia de la entrada anterior y también medida desde 15 m antes de la línea de cedencia | No define                            |               |
| Distancia de visibilidad para el ingreso de los vehículos      | Mismos valores de la distancia de parada en el carril de circulación |               | Condición 1: Distancia de la corriente de entrada d1: 1.468(V mayor, entering)*(tc)        | Mismos valores de la distancia de parada en el carril de circulación |                             | Condición 1: Hasta la entrada anterior   | No define                            |               |
|  |  |               | Condición 1: Distancia de la corriente de circulación d2: 1.468(V mayor, circulating)*(tc) |  |                             | Condición 2: mín 40m   |                                      |               |

Mediante la investigación realizada se ha podido establecer similitudes para la distancia de visibilidad de parada en la aproximación, las cuales se encuentran en función de la velocidad del tráfico. Todas las normas especifican que la distancia de visibilidad de parada debe ser medida desde el centro del vehículo ubicado en el centro del carril de aproximación, hasta la línea de cedencia de paso formando una línea recta; aparte de ello el manual de Portugal y de España añade que se debe formar un triángulo de visión que permita observar tanto el parterre como una franja del anillo de circulación, tal como se muestra en la Figura 2-16

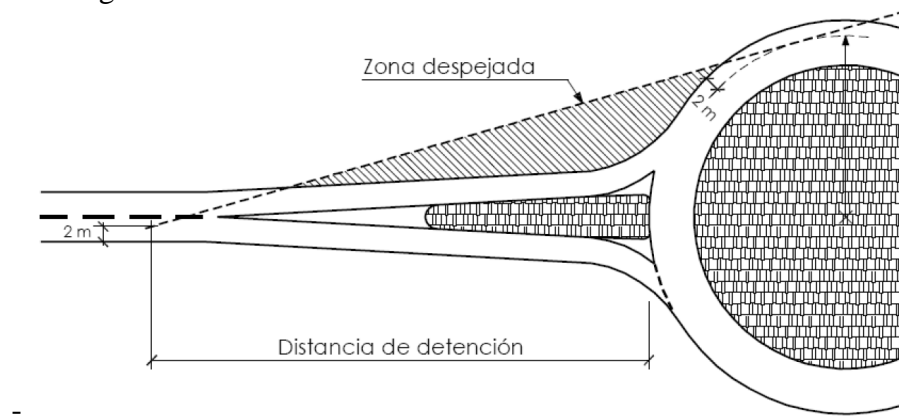


Figura 2-16: Distancia de parada en la aproximación. [17]

Una particularidad que presenta el manual de U.K, es que realiza una diferenciación del punto de visión en la línea de cedencia, la cual se encuentra en función del número de carriles de aproximación y el ancho del mismo. Si la aproximación posee dos carriles, el vehículo debe estar ubicado en el centro del carril exterior y el punto de medición se realiza a una distancia de 5.5 m de la isla separadora respectiva, si se dispone solo de un carril de aproximación y el ancho total de este (ancho de carril de entrada más salida) es de 10m, se mantiene el mismo criterio expresado anteriormente; pero si el ancho total es de 7.5 m la distancia del punto de medición en la línea de cedencia de paso desde la isla separadora será de 3.65m, ver Figura 2-17.

Se observa que la distancia de parada dentro del anillo de circulación guarda una concordancia entre todas las normas, al igual que se presentan similitudes en la forma de medición. Esta medición se realiza desde un punto dentro del anillo de circulación que se encuentra separado dos metros del borde de la isla central, hasta el punto de interés, esta distancia se la mide en forma circular tal como muestra la Figura 2-18.

En lo referente a la distancia de parada en las zonas peatonales en la entrada se utiliza el mismo criterio de medición de la distancia de parada de aproximación, solo que en vez de medir desde la línea de cedencia se mide desde el paso peatonal. En lo referente a la medición de la distancia de parada para el paso peatonal de la salida, esta es medida desde la línea de cedencia de una entrada anterior hasta el paso peatonal. La norma de Portugal y de España recomienda realizar esta comprobación siempre y cuando el paso peatonal no se encuentra desfasado más de 50 m del DCI, mientras que la norma de U.K

recomienda que se ejecute la comprobación siempre que el paso se encuentre desfasado más de 20 m del DCI, como se puede observar en la Figura 2-19.

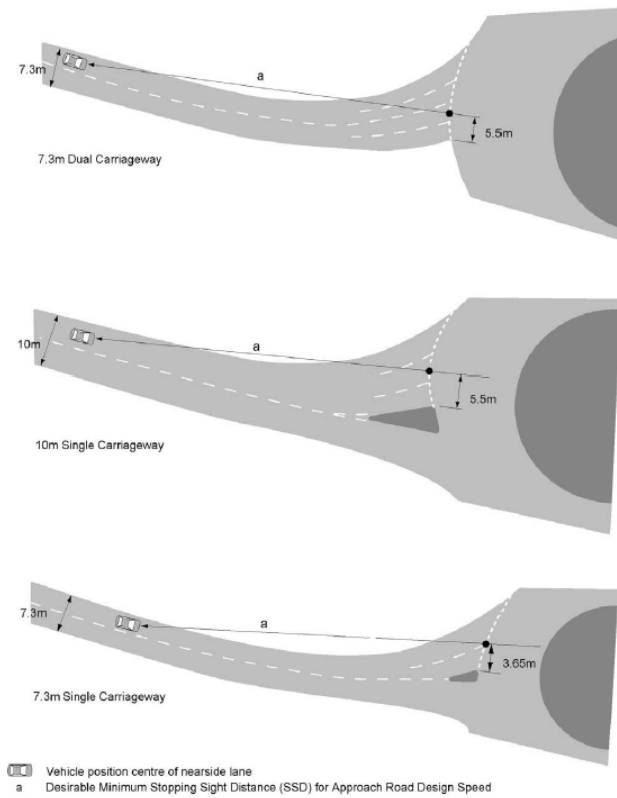


Figura 2-17: Distancia de para en la aproximación criterio de U.K. [16]

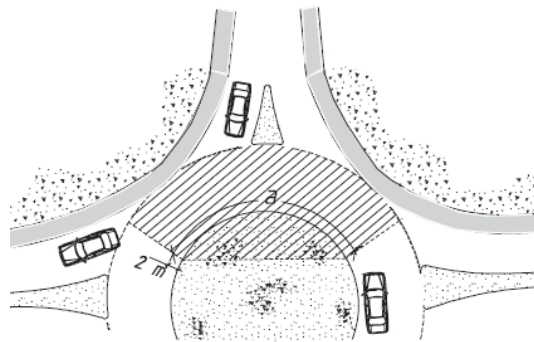


Figura 2-18: Distancia de parada en el anillo de circulación. [6]

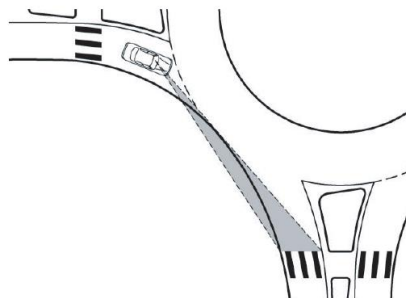


Figura 2-19: Distancia de parada para pasos peatonales de salida. [3]

La distancia de visibilidad de inserción posee una forma de medición general para todas las normas, aunque las mismas tengan diferentes valores de cálculo. La norma de Portugal y U.K calcula esta distancia en función del DCI, mientras que la norma de U.S.A calcula dicho valor en función de la velocidad de circulación y la velocidad de entrada. La medición de esa distancia se genera desde un vehículo ubicado a 15m de la línea de cedencia medido en forma circular, en donde se establece que el punto de verificación se encontrará en el centro de la calzada anular: Es importante mencionar que la norma de U.S.A genera a parte de la verificación de la distancia en función de un vehículo dentro de la calzada anular, la verificación de la distancia en función del vehículo que se encuentra ingresando por el ramal de entrada anterior al de análisis, tal como se puede observar en la Figura 2-20.

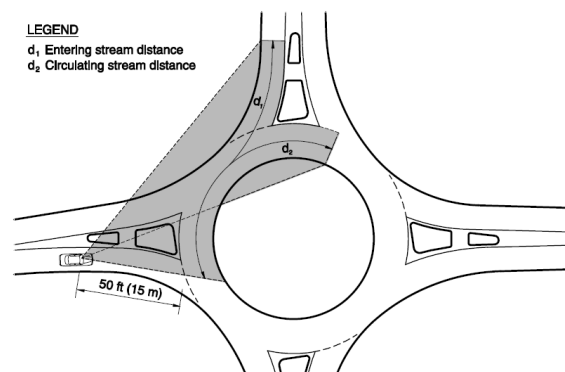


Figura 2-20: Distancia de inserción a la rotonda. [3]

A continuación, se detallan las ecuaciones establecidas para el cálculo de los valores  $d_1$  y  $d_2$ , presentes para la norma de U.S.A [3]:

$$d_1 = 1.468 * V_{\text{major,entering}} t_c \quad \text{Ecuación 1}$$

$$d_2 = 1.468 * V_{\text{major,circulating}} t_c \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$d_1$  = Distancia de inserción referente a la entrada a la izquierda.

$d_2$  = Distancia de inserción referente a la calzada anular.

$V_{\text{major,entering}}$  = Velocidad de diseño para la entrada, mph.

$V_{\text{major,circulating}}$  = Velocidad de diseño para la calzada anular, mph.

$t_c$  = Tiempo necesario para entrar a la intersección, valor asumido: 5.0seg.

### 2.3.2.6 Otros Parámetros

Existen muchos parámetros de diseño los cuales pueden influenciar en mayor o menor medida la seguridad y capacidad de la intersección. En la Tabla 2-9 se presentan los que se han considerado más relevantes.

En los últimos años el manual de U.S.A [5] introduce el concepto de consistencia de velocidades (CCV), el cual tiene el objetivo de producir una circulación homogénea (sin

cambios bruscos en la velocidad de circulación) durante toda la trayectoria, asumiendo la ausencia del tráfico y haciendo caso omiso a la señalización horizontal. Este criterio se basó en el principio de radio de trayectoria de entrada que se encuentra en el manual U.K, el cual mencionó que la evaluación de este parámetro es determinante en la seguridad de las rotondas ya que gobierna la velocidad de los vehículos al ingreso de la intersección y define si los conductores son propensos a ceder el paso de los vehículos que están en circulación [16], es decir se tomó este principio que solo estudiaba la trayectoria del vehículo en la entrada y se lo generalizó para todos los movimientos posibles en la intersección.

El CCV con el paso de los años se ha implementado en muchas normas de diseño, es por ello que se puede ver como en la norma de España y Portugal se presentan las mismas consideraciones expuestas en el manual de U.S.A del 2007 [5]. En la última actualización del manual de U.S.A [3] el criterio aprobación se ha simplificado, ya que ahora se pide que la diferencia de velocidades de las trayectorias posibles no supere los 25km/h. En la Figura 2-21 se muestran las diferentes trayectorias posibles, las cuales deben ser evaluadas para cada acceso. Para la construcción de las trayectorias se recomienda que se vea en el manual vigente en U.S.A [3].

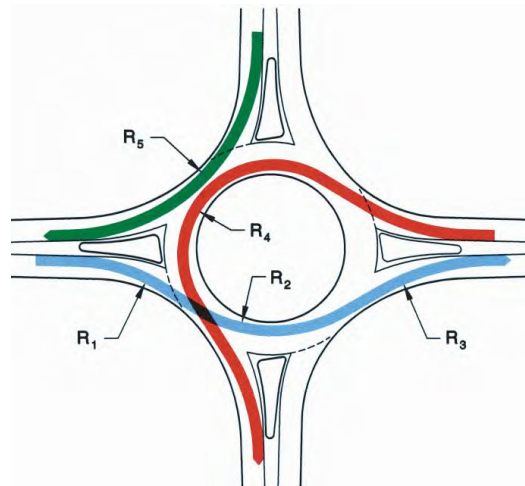


Figura 2-21: Trayectoria posibles para evaluar la CCV. [3]

En la evaluación de la distancia de las bermas, se ha visto que en las normas tanto de Portugal como U.K genera valores iguales, mientras que la norma de U.S.A posee su propio sistema de cálculo en base de ancho del carril de circulación. Para el caso de la norma de España esta mantiene para el cálculo de la berma una relación entre el DCI y el criterio de hipótesis de paso que fue explicado en el apartado 2.3.2.2; en la Tabla 2-10, se presentan los valores propuestas por la norma en mención.

Tabla 2-9: Otros parámetros

| PARÁMETROS   | MANUAL PORTUGUES   | MANUAL U.S.A  | MANUAL U.K                               | MANUAL ESPAÑOL                                   | MANUAL DE DMQ    |
|--|--|---|--|--|------------------|
| Consistencia de velocidades                        | <i>R1 &lt; R2; en caso de que no se cumpla la diferencia de velocidades debe ser máx. 20km/h, recomendable 10 km/h</i> | <i>La máxima diferencia de velocidades entre las trayectorias libres de los vehículos deber ser de máximo 25 km/h</i> | <i>R1 &lt; 70m</i>                       | <i>R1 &lt; R2 &lt; R3</i>                        | <i>No define</i> |
|  | <i>R1 y R2 &lt; R3</i>   |   | <i>No define</i>                         | <i>No define</i>                                 |                  |
|  | <i>La diferencia de velocidades entre R4 y R1 debe ser menor a 20km/h</i>  |   |  |  |                  |
|  | <i>R5 &lt; R1, R2, R3 R4, además la diferencia de velocidades entre R5 y R4 no debe ser mayor a 20km/h</i>             |   |  |  |                  |
| Bermas   | <i>Máx. 1 m, pueden ser suprimidas</i>   | <i>1/3 o 1/2 del ancho de carril de circulación</i>   | <i>Máx. 1 m, pueden ser suprimidas</i>   | <i>Depende del DCI y de la hipótesis de paso</i> | <i>No define</i> |
| Inclinación longitudinal del anillo de circulación | <i>0.5- 5%</i>   | <i>Se recomienda 4%, pero puede llegar hasta 10%</i>  | <i>Se recomienda que no exceda el 6%</i> | <i>Se recomienda que no exceda el 6%</i>         | <i>No define</i> |
| Peralte  | <i>entre (+-)2-2.5%</i>  | <i>entre (+-)1.3-3%</i>   | <i>entre (+-)0.5-2.5%</i>                | <i>entre -0.5% y -2%</i>                         | <i>-2% o 4%</i>  |
| Truck Apron  | <i>No define</i>   | <i>Ancho entre 1-4.6m</i>   | <i>No define</i>                         | <i>No define</i>                                 | <i>No define</i> |
|  |  | <i>Altura entra 50-75mm</i>   |  |  |                  |
|  |  | <i>Pendiente transversal mayor 2%</i>   |  |  |                  |
| Isla Separadora                                    | <i>Longitud &gt; Radio externo (DCI/2) o a 15m</i>   | <i>Longitud &gt; 15m</i>  | <i>Longitud entre 20-50m</i>             | <i>Longitud entre 20-50m</i>                     | <i>No define</i> |
|  | <i>Ancho inicial &gt; Radio externo/4 o a 2.5m</i>   | <i>No define</i>  | <i>No define</i>                         | <i>No define</i>                                 |                  |
|  | <i>Ancho en zona de paso peatonal &gt; 1.2 m</i>   | <i>Ancho en zona de paso peatonal &gt; 1.8 m</i>  | <i>No define</i>                         | <i>No define</i>                                 |                  |

Tabla 2-10: Ancho de las bermas. [17]

| DIÁMETRO EXTERIOR (m)<br>DE LA CALZADA ANULAR | HIPÓTESIS DE PASO <sup>1</sup> |     |     |     |
|---|--------------------------------|-----|-----|-----|
|   | la                             | lb  | lc  | ll  |
| 28  | 3,8                            | 2,4 | 1,1 | 0,7 |
| 32  | 3,1                            | 1,9 | 0,8 | 0,6 |
| 36  | 2,7                            | 1,5 | 0,6 | 0,5 |
| 40  | 2,4                            | 1,3 | 0,5 | 0,5 |
| 44  | 2,2                            | 1,2 | 0,5 | 0,5 |
| 48  | 2,0                            | 1,0 | -   | 0,5 |
| 52  | 1,8                            | 0,9 | -   | 0,5 |
| 56  | 1,7                            | 0,9 | -   | 0,5 |
| 60  | 1,6                            | 0,8 | -   | -   |

La inclinación longitudinal es un parámetro importante para la seguridad, porque las pendientes de ingreso y de circulación generan un cambio en el comportamiento normal de los vehículos, es así que a pendientes longitudinales altas se presume la existencia de más accidentes, así como la reducción de la capacidad producto de que el factor de vehículo equivalente<sup>1</sup> (fve) se ve afectado,}. Los valores de inclinación del anillo de circulación y el valor del peralte de la vía guardan una concordancia lógica entre las normas en estudio.

Un parámetro singular son los denominados “Truck Apron”, el cual se presenta en la norma de U.S.A y consiste en una sección de la rotonda destinada al uso exclusivo de los vehículos pesados. En general en U.S.A el vehículo de diseño es el expuesto en la sección 2.3.2.1, pero cuando este sobrepasa dicha medida se recomienda la inclusión del truck apron con la finalidad de garantizar todos los movimientos posibles dentro de la intersección, este singular no se encuentran en las demás normas en estudio.

La isla separadora es el elemento físico que divide la dirección de la entrada y la salida de un ramal de la rotonda y que a la vez es capaz de albergar a los peatones, al mobiliario urbano y a la señalización; esta debe estar en concordancia con el radio, el ancho y ángulo en la entrada. La norma de Portugal proporciona un mayor detalle del cálculo de la longitud y ancho respectivo, mientras que la norma de U.S.A genera un mayor detalle de los valores del retranqueo y de los radios mínimos para trazar los elementos separadores, lo cual se puede observar en la Figura 2-22.

<sup>1</sup> Factor de Vehículo Equivalente, es un factor encargado de transformar los diferentes tipos de vehículos en la intersección en un solo tipo de vehículo equivalente, los cuales servirán para el cálculo de la capacidad.

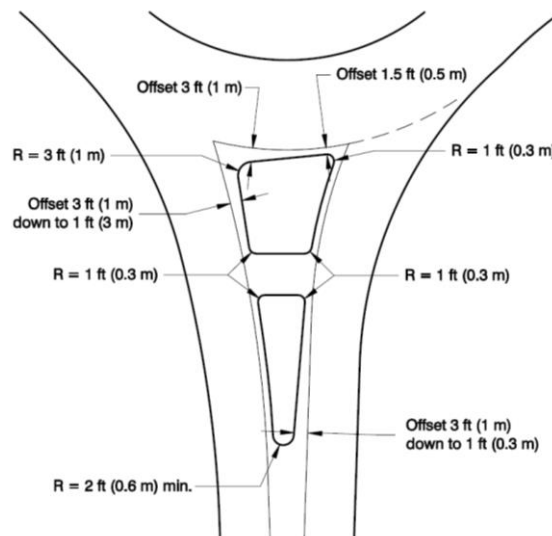


Figura 2-22: Isla separadora. [3]

### 2.3.3 Conclusiones

- Las normas vigentes para el diseño geométrico en el Ecuador actualmente no disponen de parámetros geométricos que ayuden a los ingenieros para un correcto trazado de intersecciones tipo rotondas, solo DMQ ha generado una ordenanza que presenta criterios básicos de diseño.
- Con el fin de establecer una evaluación adecuada, se han estudiado distintas normas de diseño geométrico para intersecciones tipo rotondas implementadas en el mundo, se han establecido 6 categorías de análisis: vehículo de diseño, isla central, zona de entrada a la intersección, zona de salida de la intersección, distancia de visibilidad y otros parámetros.
- Se asume que la categoría más importante de diseño es la zona de entrada, ya que es en donde se producen la mayor cantidad de accidentes.
- El vehículo de diseño para estas intersecciones se encuentra entre una longitud de 15-16.5m.
- En la mayoría de las normas comparadas, lo que se busca es que se genere una situación equilibrada de acción de la isla central para cada uno de los ramales de ingreso, es decir evitar que se generen trayectorias rectas. En las normas existe la concordancia de recomendar que el posicionamiento de la isla central se encuentre desfasado hacia la izquierda de los ramales de aproximación; así como también mantienen el principio de que el número de carriles la calzada anular sea por lo menos igual al número de máximo de carriles en las entradas.
- Tanto la norma de Portugal, España y U.K establece que se puede aumentar el número de carriles en la entrada para así generar una mayor capacidad de la intersección, es por ello que en estas normas se introduce un parámetro llamado

longitud de cola; mientras que la norma de U.S.A establece que este valor no debe ser aumentado.

- Uno de los principales parámetros de diseño es el ángulo de entrada, este parámetro es muy semejante en todas las normas, recomendándose un valor entre 20-60°.
- Para la salida, las normas adoptan el concepto básico de una rotonda, que es el de dificultar las entradas y facilitar las salidas, los valores comparados guardan concordancia entre las normas.
- Tanto el exceso como la falta de la distancia de visibilidad deben ser controlados. Todas las normas guardan el principio de analizar la visibilidad de ingreso vehicular y la visibilidad de parada (ramal de aproximación, dentro de la calzada anular y hacia los cruces peatonales).
- El cumplimiento del CCV la finalidad de reducir las velocidades de circulación entre las diferentes trayectorias posibles y con esto reducir significativamente la severidad de los accidentes.
- Al no tener una norma de diseño establecida en Ecuador, es necesario la implementación de parámetros que sirvan para un correcto diseño de la intersección, los cuales permitan realizar todos los movimientos a todos los tipos de vehículo que por ella circularán, así como el de generar la suficiente capacidad para proporcionar un correcto funcionamiento de la intersección, esto acompañada evidentemente de un alto nivel de seguridad para todos los usuarios del espacio público.
- El diseño geométrico de la rotonda se basa en la consistencia de las velocidades [10], lo cual se logra por medio de la utilización de adecuados DCI, radios de entrada y salida, de los anchos de acceso y número de vías de circulación.

## 2.4 Capacidad

### 2.4.1 Reseña Histórica

---

La capacidad determina el desempeño de una rotonda, según lo expuesto en el libro de Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones, [19] es:

*“El número máximo de vehículos que razonablemente pueden atravesar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un intervalo de tiempo dado, bajo condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control”*

A partir del análisis de la capacidad, es posible medir cual es la calidad de operación, la cual se realiza mediante el nivel de servicio o por sus siglas en inglés LOS (Level of

Service”), esta es una medida cualitativa que refleja la calidad de operación en función de la percepción de los conductores [19].

Con el fin de evaluar la evolución en términos de la metodología utilizada para el cálculo de la capacidad de este tipo de intersecciones en el Ecuador, nos remontaremos a la norma del año 2003 NDGC [8] En el Anexo 1 se identificó que, para el análisis de la capacidad, se utiliza el principio de longitud de entrecruzamiento. Esta norma no presenta ninguna guía para el cálculo, pero menciona en términos de tráfico que:

*“Una rotonda no opera satisfactoriamente cuando los volúmenes de tránsito en uno o más ramales de la intersección alcanzan su capacidad simultánea. Estiman que un valor total de 3.000 v.p.h (vehículos por hora) -llegando por todos los ramales de acceso- es la máxima capacidad práctica para rotondas de tipo superior” [8]*

Aparte de ello la norma recomienda que se evalúe la capacidad de las secciones llamadas como críticas que son en las que se produce el entrecruzamiento de los vehículos. Se ha realizado una investigación de normas geométricas que mantengan este mismo principio (longitud de entrecruzamiento), dando como resultado a la norma colombiana llamada “Manual de Diseño Geométrico de Carreteras” [20] y la norma peruana llamada “Manual de Carreteras, Diseño Geométrico DG-2013” [21]; estas presentan una metodología de cálculo para la capacidad, con lo cual al analizar las metodologías descritas nos ubicaremos muy próximos a lo que ocurre en el país en términos de cálculo de capacidad.

Según NDGC [8], se tiene que la longitud de entrecruzamiento es la zona en donde los vehículos realizan las maniobras para pasar de un carril interior hacia un exterior o viceversa con el fin de realizar la salida por los distintos ramales de la intersección. Existen dos longitudes o zonas de entrecruzamiento, las simples constituidas por dos ramales simples en la entrada y dos ramales simples en la divergencia, las compuestas que están constituidas por cuatro ramales en la entrada y cuatro en la divergencia, como se puede observar en la Figura 2-23.

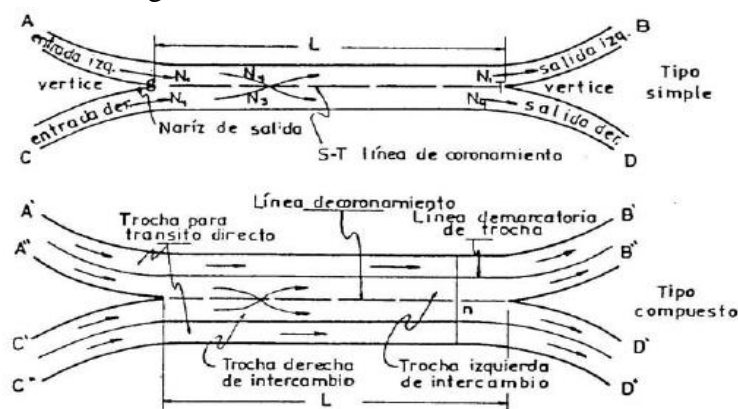


Figura 2-23: Longitud de Entrecruzamiento. [8]

Para el análisis de la capacidad con este principio, tanto la norma de Colombia como la norma de Perú, presentan la misma metodología; en donde se debe proponer una longitud de entrecruzamiento que sea compatible a la geometría de la intersección, posteriormente se debe calcular la capacidad de la sección de entrecruzamiento mediante la ecuación propuesta por Wardrop en 1973 [11] (ver ecuación 3 y Figura 2-24), esta fórmula ha quedado sin un sustento teórico a partir de que se implementó en las rotondas la regla de prioridad en el anillo de circulación, hace aproximadamente 50 años atrás.

$$Q_p = \frac{160 * W * (1 + \frac{e}{W})}{1 + \frac{W}{L}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

Q<sub>p</sub>: Capacidad de la sección de entrecruzamiento, como tránsito mixto, en vehículos/hora.

W: Ancho de la sección de entrecruzamiento, en metros.

e: Ancho promedio de las entradas a la sección de entrecruzamiento, en metros.

e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>: Ancho de cada entrada a la sección de entrecruzamiento, en metros.

L: Longitud de la sección de entrecruzamiento, en metros.

Finalmente se debe comparar la capacidad calculada con el volumen vehicular previsto para la zona de entrecruzamiento evaluada.

Como ya se mencionó anteriormente en el apartado 2.3, actualmente la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 que se encuentra en revisión [9], no dispone de una sección para determinar la capacidad de las rotondas; mientras que en la ordenanza vigente para el DMQ [15], se menciona respecto al tema que para aprobar el estudio de la capacidad de las rotondas, estas deberán exceder el nivel de servicio D propuesto por el HCM 2000 [22].

Debido a los criterios decadentes utilizados en Ecuador y en países vecinos como Colombia y Perú, para esta investigación es necesario realizar una evaluación de las últimas metodologías de cálculo de la capacidad utilizadas a nivel mundial, que permitan identificar cual metodología representa el impacto que generan el cambio de factores geométricos en la capacidad.

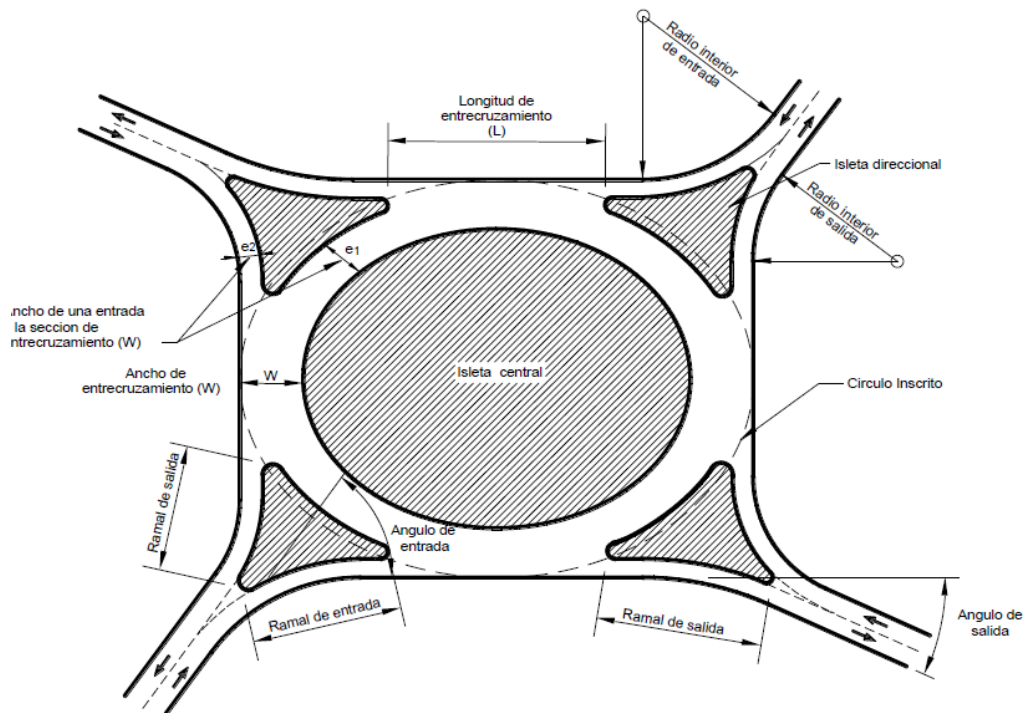


Figura 2-24: Elementos contenidos en la fórmula de Wardrop. [21]

## 2.4.2 Comparación de Métodos de Cálculo

A partir de la introducción del concepto de rotondas compactas, se desechó por completo el método del análisis de la capacidad en función de la zona de entrecruzamiento. En la mayoría de los manuales evaluados en la sección 2.3, se menciona que el desempeño total de una rotonda es evaluado en función de la capacidad que ofrece cada una de las entradas ( $Q_e$ ). 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, en el cual se garantiza la formación de una fila de espera continua en la aproximación de esa entrada, la misma que tiene que negociar su ingreso con un determinado nivel de tráfico prioritario [6]; siendo la capacidad total de la rotonda la suma de las capacidades de cada una de las entradas.

También la entrada de una rotonda posee una capacidad geométrica máxima, la cual se determina cuando el flujo prioritario es nulo y por ende la capacidad depende únicamente de las características geométricas de entrada a la intersección.

Para la determinación de la capacidad de una intersección se recomienda que esta se calcule en función de los llamados vehículos equivalentes, de tal forma que se tenga un sistema único de medición que abarque todas las clases de vehículos existentes. En la Tabla 2-11 se presenta los factores expuestos en el manual de Portugal [6], el cual ha tomado los datos generados a partir del tipo de vehículo y de la pendiente longitudinal de cada ramal presentados en el HCM 1994 [23].

Tabla 2-11: Factor de ejes equivalentes. [23]

| Clase de Veículo                        | Inclinação |     |     |     |     |
|---|------------|-----|-----|-----|-----|
|   | -4%        | -2% | 0%  | 2%  | 4%  |
| 2 rodas                                 | 0,3        | 0,4 | 0%  | 2%  | 4%  |
| ligeiros                                | 0,8        | 0,9 | 1,0 | 1,2 | 1,4 |
| Pesados <sup>(1)</sup>                  | 1,0        | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 3,0 |
| BUS e pesados combinados <sup>(2)</sup> | 1,2        | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 6,0 |
| Classificação não discriminada          | 0,9        | 1,0 | 1,1 | 1,4 | ,17 |

Veículos pesados sem reboque; <sup>(2)</sup> - Inclui conjuntos tractor-reboque

Los valores propios generados en Portugal se presentan en la Tabla 2-12:

Tabla 2-12: Factor de ejes equivalentes para Portugal. [6]

| Classes de Veículos | Descrição  | Coefficiente de equivalência |
|---------------------|--|------------------------------|
| 2W                  | (2 wheels) - Veículos de duas rodas (motos, bicicletas, scooters)  | 0,50 <sup>(*)</sup>          |
| CAR                 | (Car) - Veículos ligeiros - Carros, caracterizados por dois eixos e quatro rodas                               | 1,00                         |
| LGV                 | (Light Goods Vehicles) - Veículos ligeiros de mercadorias, caracterizados por dois eixos e quatro rodas        | 1,22                         |
| MGV                 | (Medium Goods Vehicles) - Veículos médios de mercadorias, caracterizados por dois eixos e mais de quatro rodas | 1,64                         |
| HGV                 | (Heavy Goods Vehicles) - Veículos pesados de mercadorias, caracterizados por mais de dois eixos                | 2,58                         |

En la última actualización del HCM para el año 2010 [24] presenta un resumen de los factores de vehículo equivalente que se muestra en la Tabla 2-13.

Tabla 2-13: Factor de ejes equivalentes para U.S.A. [24]

| Vehicle Type  | Passenger Car Equivalent, $E_T$ |
|---------------|---------------------------------|
| Passenger Car | 1.0                             |
| Heavy Vehicle | 2.0                             |
| Bicycle       | 0.5                             |

Como se puede observar los valores para el cálculo de los vehículos equivalentes son semejantes en las distintas normas, por lo que la utilización de estos no influenciará significativamente en el valor de la capacidad. En la Tabla 2-11 se observa que el factor de equivalencia no solo depende del tipo de vehículo si no de la pendiente en la que se evalúa, considerándose los datos más completos presentados.

Para el cálculo de la capacidad se han establecido 3 metodologías que son: métodos estadísticos, métodos probabilísticos y métodos de simulación. Según el HCM 2000 [22], para la elección del tipo de metodología se debe tener en cuenta principalmente la cantidad de datos disponibles, ya que, los modelos empíricos son generalmente métodos que requieren rotondas congestionadas para su calibración, mientras que los modelos analíticos pueden ser desarrollados a partir de rotondas sin congestión. Los métodos de simulación deben ser evaluados para el entorno en el cuál se desarrollan con el fin de generar una calibración adecuada que garantice datos más confiables.

### **2.4.2.1 Métodos Estadísticos**

---

Los métodos estadísticos son los primeros que se han inventado para el cálculo de la capacidad y son ampliamente utilizados en ciudades europeas. Según el HCM 2000 [22], los métodos empíricos o estadísticos necesitan una gran cantidad de datos para así poder establecer una relación entre las características de diseño geométrico y medidas de rendimiento como la capacidad y el retraso. Lo que buscan estos métodos es el de construir de forma empírica una curva de capacidad, para lo cual se han obtenido datos a partir de observaciones en rotondas locales efectuadas en los periodos de saturación de las diferentes entradas con características geométricas diferentes y a diferentes niveles de flujo prioritario.

En el manual de Portugal [6], se establece que estos métodos son los que más se aproximan a la capacidad real de sus rotondas a la vez que tiene la ventaja de que su aplicación es mediante fórmulas relativamente fáciles. Entre los métodos utilizados en el manual en mención se presenta el TRL y el SETRA explicados a continuación.

#### **2.4.2.1.1 MÉTODO TRL**

Este modelo estadístico, se basa en el análisis de 88 rotondas con más de 11.000 minutos de recolección de datos, en donde se han deducido las siguientes fórmulas a partir de regresiones no lineales (ver ecuación 5 y 6), en la cual se relaciona la capacidad de las entradas en base al flujo del anillo de circulación y parámetros que dependen de la geometría de la entrada.

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 [6].

$$Q_e = K * (F - f_c * Q_c) \quad \text{sí } f_c * Q_c < F \text{ Ecuación 5}$$

$$Q_e = 0 \quad \text{sí } f_c * Q_c > F \text{ Ecuación 6}$$

Donde:

$Q_e$  = Capacidad de entrada (veq/h).

$Q_c$  = Tráfico de circulación en el anillo, llamado flujo de conflicto (veq/h).

$K, F$  y  $f_c$  = Son parámetros dependientes de las características geométricas de la entrada y de la rotonda, para encontrar dichos valores se presentan las ecuaciones 7-13:

$$K = 1 - 0.00347 * (\varphi - 30) - 0.978 * \left\{ \frac{1}{r} - 0.05 \right\} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$F = 303 * X_2 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$f_c = 0.21 * t_p * (1 + 0.2 * X_2) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$t_p = 1 + \left( \frac{0.5}{1+M} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$M = \exp\left(\frac{DCI-60}{10}\right) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$X_2 = \exp\left(\frac{DCI-60}{10}\right) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$S = 1.6 * \left( \frac{e-v}{l'} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$v$  = Ancho de la vía en la aproximación de la rotonda.

$e$  = Ancho efectivo de la entrada junto a la línea de cedencia de prioridad y perpendicular a la isla separadora.

$l'$  = Longitud media efectiva de la cola.

$DCI$  = Diámetro del Círculo Inscrito.

$\varphi$  = Ángulo de entrada.

En la Figura 2-25 se presenta los parámetros geométricos utilizados en el modelo TRL.

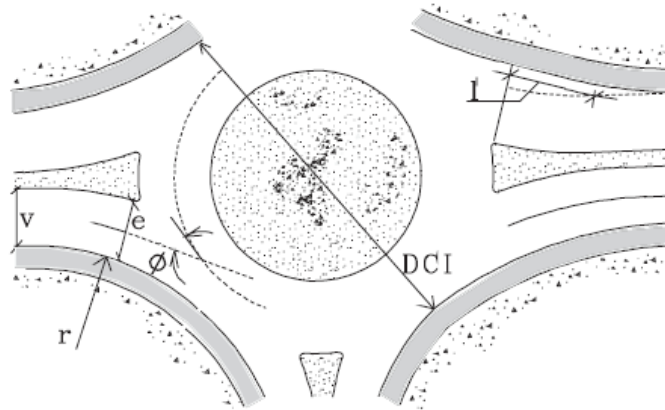


Figura 2-25: Parámetros Geométricos del Método TRL. [6]

### 2.4.2.1.2 MÉTODO SETRA

Este método estadístico se ha realizado a partir del análisis de 56 entradas en 17 rotondas diferentes ubicadas en zonas rurales y periurbanas, en donde se ha obtenido alrededor de 12.000 minutos de datos, es importante mencionar que este método se encuentra vigente desde el año 1980 y que con el paso del tiempo se ha ido modificando de manera que genere resultados más reales. El principio es similar al método de TRL pero con la principal diferencia que el tráfico de conflicto, en este caso no solo se considera al que se encuentra en el anillo de circulación antes de la entrada en estudio, si no que considera a la vez la influencia del tráfico en la salida inmediatamente anterior a la entrada analizada [6]. En las ecuaciones 14 y 15 se presentan las fórmulas y datos necesario para el cálculo de la capacidad de las entradas.

$$Q_e = (1330 - 0.70 * Q_c) * (1 + 0.1 * (ENT - 3.5)) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$$Q_c = \left( Q_t + \frac{2}{3} * Q_s \left( 1 - \frac{SEP}{15} \right) \right) * (1 - 0.085 * (AA - 8)) \quad \text{Ecuación 15}$$

$Q_e$  = Capacidad de entrada (veq/hora).

$Q_c$  = Flujo de Conflicto (veq/hora).

$Q_s$  = Flujo de Salida del ramal en análisis (veq/hora).

$Q_t$  = Flujo de Circulación y que atraviesa frontalmente la entrada en estudio (veq/hora).

$ENT$  = Ancho de entrada medido desde la parte trasera del vehículo que se encuentra parado en la línea de cedencia (m).

$ANN$  = Ancho del anillo de circulación en función de la isla central (m).

$SEP$  = Ancho de la isla separadora en la entrada en análisis (m).

En la Figura 2-26 se presenta los parámetros geométricos utilizados en el modelo SETRA.

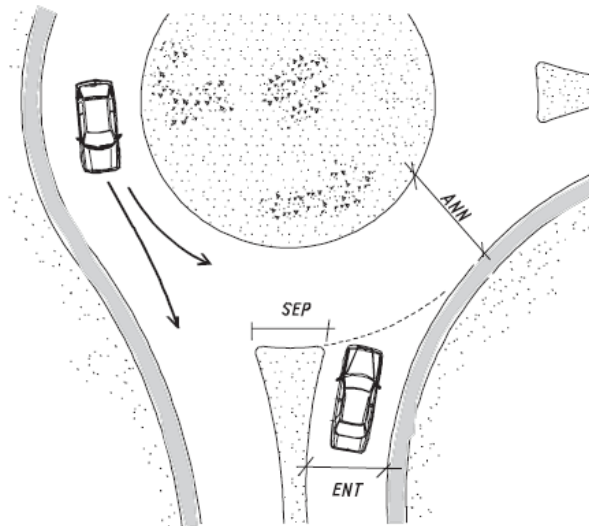


Figura 2-26: Parámetros Geométricos del Método SETRA. [6]

### 2.4.2.2 Métodos Probabilísticos

Estos métodos son basados en la conjugación de la distribución de los vehículos de la corriente prioritaria con el proceso de la 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”. Esta teoría fue inventada en Alemania por Hardes (1968), la cual ha ido evolucionando mediante las investigaciones realizadas, entre las cuales destacan Siegloch (1973) y Troutbeck y Brilon (1996) [11].

El modelo de intervalo de aceptación, se basa en modelos generados para el cálculo de capacidad en una intersección sin señalizar. En una intersección sin señalizar existe un flujo principal en donde el vehículo que se encuentra en la vía secundaria necesita un tiempo aceptable para ingresar a la intersección, el cual es generado por la brecha entre los vehículos [25]; similar comportamiento ocurre en las rotondas en donde se asume como flujo principal al que se encuentra dentro del anillo de circulación y como flujo secundario al que ingresa por cualquiera de las entradas. Desde el punto de vista del tráfico en la vía secundaria o en las entradas para el caso de las rotondas, el tráfico del anillo de circulación se puede comportar de dos formas: como brechas o bloques [26]. Las brechas son el espacio de tiempo generado entre dos vehículos que circulan por el anillo y los bloques son la unión de varios vehículos en donde entre ellos no existe una brecha suficiente de tiempo para el ingreso de vehículos, en el cual el vehículo puede ingresar cuando el último vehículo final posee una brecha suficiente. En la Figura 2-27 se muestra el funcionamiento de una rotonda en base de la teoría de aceptación de intervalos.

Este principio es utilizado para el cálculo de la capacidad en países como Alemania, Suiza y Estados Unidos, es por ello que a continuación se explica la metodología y parámetros

necesarios para el cálculo de la capacidad en función de lo expuesto en la última versión del HCM 2010 [24].



Figura 2-27: Funcionamiento de una rotonda con la teoría de aceptación de intervalos. [27]

### 2.4.2.2.1 MÉTODO HCM

El método utilizado en el HCM 2010 posee diferentes factores de entre los cuales están el tiempo crítico (tc) y el tiempo de seguimiento (tr).

El tiempo crítico (tc): Es el intervalo de tiempo necesario para que el vehículo que está por ingresar a la rotonda tome la decisión de ingreso [27].

El tiempo de seguimiento (tr): 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 [27].

Estos valores dependen de las condiciones locales para cada zona de estudio, el cual está ligado al comportamiento de los conductores, así como también depende del volumen y composición del tránsito y de la geométrica. La baja velocidad de circulación que puede dar una rotonda facilita la aceptación en la entrada y por ende aumenta su capacidad [3].

Como se indicó anteriormente todos los métodos de capacidad se evalúan en unidades de vehículos equivalentes. En el HCM 2010 [24], se ha generado los factores propuestos en la Tabla 2-13; los cuales deben ser utilizados en la ecuación 16 y 17 para generar el ajuste por los vehículos pesados [3].

$$v_{i,pce} = \frac{v_i}{f_{hv}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T * (E_T - 1)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$v_{i,pce}$  = Flujo de tráfico por movimiento en vehículos equivalentes (veq/hora)

$v_i$  = Flujo de tráfico por movimiento (veq/hora).

$f_{HV}$  = Factor de ajuste por vehículos pesados.

$P_T$  = Porcentaje de vehículo pesados.

$E_T$  = Factor del vehículo equivalente (ver Figura 2-36).

La ecuación para el cálculo de la capacidad es de carácter exponencial, en donde se presenta los parámetros A y B los cuales dependen de los tiempos críticos y tiempos de seguimientos, tal como se muestra en las ecuaciones 18-20 [27].

$$c = A * e^{-B * V_c} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

$$A = \frac{3600}{t_r} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$B = \frac{t_c - \frac{t_f}{2}}{3600} \quad \text{Ecuación 20}$$

Los valores de los tiempos que reflejan el comportamiento de los conductores en U.S.A y propuestos en el HCM 2010, se presentan a continuación en la Tabla 2-14. Las características geométricas se ven reflejadas en los factores del tiempo de seguimiento, siendo los de mayor incidencia: el ancho de los carriles de aproximación, el DCI y el número de carriles de aproximación y circulación. El tiempo crítico disminuye a medida que aumentan los parámetros geométricos y el tiempo de seguimiento disminuye cuando disminuyen la cantidad de carriles de circulación y cuando aumenta el diámetro de la rotonda y la cantidad de carriles de aproximación [24].

Tabla 2-14: Intervalo crítico y tiempo de seguimiento. [27]

| <i>Configuración</i>                                    |                             | $t_c$ | $t_f$ |
|---|-----------------------------|-------|-------|
| Entrada de un carril                                    | Un carril de circulación    | 5,19  | 3,19  |
|   | Dos carriles de circulación | 4,11  | 3,19  |
| Entrada de dos carriles con dos carriles de circulación | Carril izquierdo            | 4,29  | 3,19  |
|   | Carril derecho              | 4,11  | 3,19  |

Aplicando los valores presentados en la Tabla 2-14, se ha podido establecer diferentes fórmulas en función de los diferentes tipos de rotonda (ver Tabla 2-15).

Tabla 2-15: Fórmulas de capacidad para distintas configuraciones. [27]

| <b>Configuración</b>                                    | <b>Modelo de capacidad</b>  |  |
|---|-----------------------------|--|
| Entrada de un carril                                    | Un carril de circulación    | $c = 1.130 \times e^{(-0,0010v_c)}$        |
|   | Dos carriles de circulación | $c = 1.130 \times e^{(-0,0007v_c)}$        |
| Entrada de dos carriles con dos carriles de circulación | Carril izquierdo            | $c_{e,L} = 1.130 \times e^{(-0,00075v_c)}$ |
|   | Carril derecho              | $c_{e,R} = 1.130 \times e^{(-0,0007v_c)}$  |

Donde:  $c$ : capacidad de un carril de entrada [aphpc];  
 $v_c$ : flujo conflictivo [aphpc];  
 $c_{e,R}$ : capacidad del carril derecho de entrada [aphpc]; y  
 $c_{e,L}$ : capacidad del carril izquierdo de entrada [aphpc].

La capacidad y la eficiencia de una rotonda son muy sensibles a los valores del  $t_c$  y del  $t_r$  [28], por lo que estos deben ajustarse a las características locales de los conductores, la geometría y las condiciones del flujo de tránsito.

Tal cual como se menciona en el manual de U.S.A [3], es muy probable que a medida que los conductores se familiaricen con la forma de conducción en este tipo de intersecciones, los  $t_c$  y  $t_r$  van disminuyendo y por ende generen mayores capacidades. El método HCM 2010 también recomienda generar una calibración local de estos tiempos de tal forma que se pueda obtener un valor más real de la capacidad de la rotonda.

El Ecuador no posee investigaciones acerca del comportamiento de los conductores, pero mediante la revisión bibliográfica, se ha observado dos estudios en los que se determinan los  $t_c$  y  $t_r$  para rotondas elaborados en América Latina, con lo cual es posible calibrar el modelo del HCM 2010. Al utilizar dichos valores para el Ecuador estaremos reflejando la capacidad de una rotonda de manera más precisa que al utilizar los tiempos propuestos en la Tabla 2-14.

En la Tabla 2-16 se presenta los valores de los  $t_c$  y  $t_r$ , realizado para la ciudad de Córdoba en Argentina [27].

Tabla 2-16: Intervalos críticos y de seguimiento para Córdoba, Argentina. [27]

| <b>Configuración</b>                                    | $t_c$                       | $t_r$ |      |
|---|-----------------------------|-------|------|
| Entrada de un carril                                    | Un carril de circulación    | 3,60  | 2,34 |
|   | Dos carriles de circulación | 3,60  | 2,34 |
| Entrada de dos carriles con dos carriles de circulación | Carril izquierdo            | 3,34  | 2,11 |
|   | Carril derecho              | 3,34  | 2,05 |

El segundo estudio elaborado para la calibración del modelo del HCM 2010 para el cálculo de la capacidad de una rotonda, se desarrolló en Montevideo- Uruguay [28]; el cual se presenta en la Tabla 2-17.

Tabla 2-17: Intervalos críticos y de seguimiento para Córdoba, Argentina. [28]

| Parámetro             | Tipo de vehículo |         |       |
|-----------------------|------------------|---------|-------|
|                       | Livianos         | Pesados | Total |
| $t_c$ reg. lineal (s) | 3,5              | 4,0     | 3,7   |
| $t_f$ reg. lineal (s) | 2,2              | 2,8     | 2,3   |

Como se puede observar, tanto los tiempos encontrados para la ciudad de Córdoba como los tiempos encontrados para Montevideo, son menores que los propuesto por el HCM 2010, estos a la vez guardan una cierta similitud; lo cual refleja que existe una forma de conducción homogénea para estos dos países. Los valores de  $t_c$  y  $t_r$  al ser menores generan un aumento en la capacidad, evidenciándose un comportamiento más agresivo de los conductores de las ciudades en estudio, lo cual se podría generalizar para toda América Latina. Estos valores también pueden ser influenciados por los parámetros geométricos de las rotondas que en algunos casos generan un beneficio en los movimientos de acceso.

### 2.4.2.3 Métodos de Simulación

---

Estos métodos son basados 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. El objetivo de esta investigación es evaluar la capacidad al realizar cambios geométricos, por lo que se descarta un análisis minucioso de este tipo de métodos.

### 2.4.3 Conclusiones

---

- La norma vigente para el Ecuador [8], no presenta ningún apartado para el cálculo de la capacidad de las rotondas.
- Según la norma ecuatoriana, para el diseño geométrico se utiliza el concepto de longitud de entrecruzamiento, el cual también es utilizado para la normas vigentes en Colombia [20] y Perú [21], en donde para el cálculo de la capacidad se utiliza la ecuación de Wardrop (1973), la cual dejó de funcionar cuando se introdujo el criterio de dar prioridad a lo vehículo que se encuentran dentro del anillo de circulación; es decir es un método que no tiene un sustento teórico para el actual desempeño de las rotondas.
- Actualmente existen 3 metodologías para el análisis de las capacidades basadas principalmente en el cálculo de la capacidad de las entradas y son: métodos estadísticos, métodos probabilísticos y métodos de simulación (no se analizan ya que no son objetivo de esta investigación).
- Para los métodos estadísticos se analizó los métodos TRL y SETRA presentados en el manual portugués [6] en donde: el método TRL es el que más se acerca a la capacidad geométrica, mientras que el método SETRA sub-dimensiona la capacidad.

- Los métodos estadísticos relacionan los flujos principalmente en la entrada y el llamado flujo de conflicto, con los parámetros geométricos de la rotonda.
- En los métodos TRL y SETRA se introduce el concepto de longitud de cola, que es principalmente el añadir un carril en la entrada, el cual puede generar un aumento del 90% en la capacidad, es importante mencionar que la longitud de cola debe cumplir con ciertos parámetros geométricos que fueron expuestos en el apartado 2.3.3
- El hecho de aumentar el DCI no influye en un aumento de la capacidad evaluada con los métodos estadísticos, quitando definitivamente el principio de la longitud de entrecruzamiento y por ende es posible generar rotondas compactas con altos niveles de seguridad y capacidad.
- Un parámetro importante en la seguridad es el ángulo de entrada, se ha visto que un cambio en este valor influye mínimamente en la capacidad del mismo [6].
- Otro método analizado son los probabilísticos, de los cuales destaca el HCM ya que, en la ordenanza vigente en Quito [15], se recomienda utilizar la metodología descrita del HCM en donde se debe garantizar un nivel de servicio mínimo de “D”.
- El método del HCM utiliza el criterio de intervalos de aceptación; el criterio se encuentra formado por dos parámetros que son:  $t_c$  y  $t_r$ , dentro de estos parámetros se ve reflejado las características geométricas. Es por ello se debe calibrar los valores de acuerdo a la zona de estudio.
- El método del HCM 2010 genera valores altos del  $t_c$  y  $t_r$  producto principalmente de que en U.S.A las rotondas no son las intersecciones más populares y por ende los conductores no se encuentran familiarizados con el uso de la misma; estos valores altos se traducen en una disminución de la capacidad calculada.
- Se han realizado algunas investigaciones en América Latina en donde se han obtenido los valores de  $t_c$  y  $t_r$  locales, dando como resultados valores menores debido a la mayor agresividad de los conductores y a que en algunas entradas la concepción geométrica puede ayudar al movimiento de acceso. Estos valores se apegan más a la situación del Ecuador por lo que no estaría del todo errado usarlos, pero siempre es importante poder realizar un análisis local.
- En esta investigación se busca evaluar la influencia de los parámetros geométricos en la capacidad de las rotondas, por lo que se utilizará el método TRL, el cual permite introducir los parámetros geométricos en el cálculo de la capacidad.

## 2.5 Análisis Comparativo

### 2.5.1 Ventajas

Las ventajas de las rotondas son evaluadas en dos aspectos: la seguridad y la movilidad [29], en lo que respecta a la seguridad las rotondas son capaces de generar flujos lentos y suaves disminuyendo considerablemente la velocidad, eliminando los puntos de conflicto, especialmente a 90 grados (se elimina los giros a la izquierda) [4] y [6]; en lo que respecta a la Movilidad: son capaces de producir mayor capacidad que las intersecciones señalizadas e incluso iguala o supera la capacidad que disponen las intersecciones semaforizadas [5]. En muchos de los países se han ido reemplazando intersecciones normales o semaforizadas con intersecciones tipo rotondas, con el fin de generar mayor seguridad a los conductores [30].

Según el Manual de Seguridad Vial desarrollado en Noruega [31], existen 5 razones principales porque las rotondas son capaces de generar mayor seguridad a los usuarios:

- Son capaces de reducir los puntos de conflicto (ver Figura 2-28).
- Todo el tráfico que se mueve dentro del anillo de circulación va en una dirección.
- Son capaces de eliminar el giro a la izquierda.
- El desplazamiento lateral que se produce genera una disminución de la velocidad.
- Los usuarios que se aproximan a la rotonda tienen que dar derecho de paso a los que se encuentran dentro del carril de circulación.

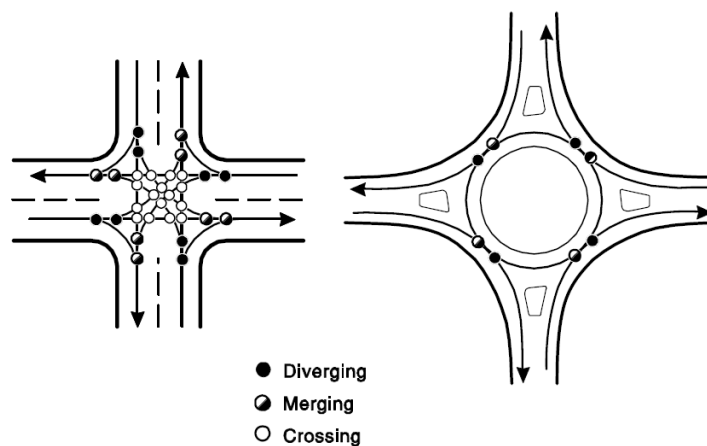


Figura 2-28: Reducción de puntos de conflicto. [3]

Una de las principales ventajas de este tipo de intersecciones, es la capacidad que tienen para disminuir la velocidad de circulación. Al comparar la diferencia de velocidad al reemplazar 7 intersecciones señalizadas y no señalizadas en rotondas, se pudo determinar que las rotondas son capaces de reducir la velocidad en 20km/h [32]; este valor es semejante al obtenido en la investigación para las rotondas en Portugal [33], en donde se establece que son capaces de reducir la velocidad en la entrada entre un 26% y un 37% de la velocidad normal de circulación; esta reducción se logra, siempre y cuando, las

rotondas no se encuentren distanciadas una longitud mayor a 300 metros [32]. Como se puede observar en la Figura 2-29 se presenta el perfil de velocidades de un corredor antes y después de la implementación de dos rotondas contiguas.

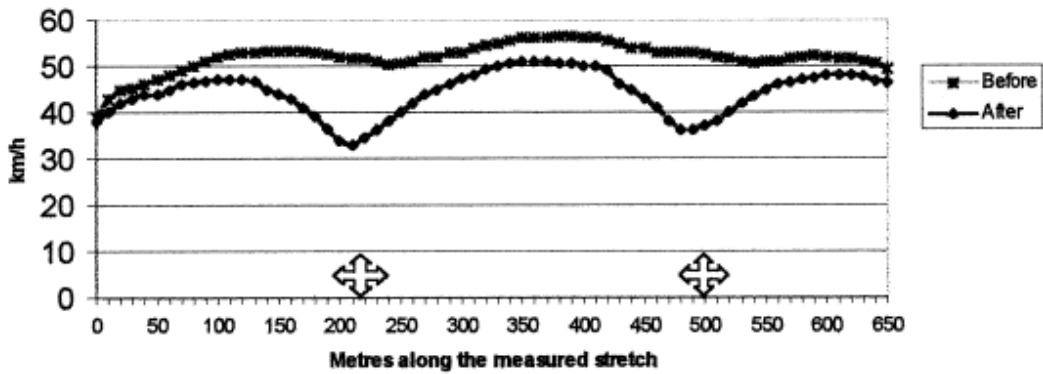


Figura 2-29: Perfil medio de velocidades de un corredor con dos rotondas contiguas. [32]

La disminución de la velocidad se logra cuando el vehículo que atraviesa la intersección debe realizar un desplazamiento lateral obligatorio, generado por el anillo de circulación; una mayor reducción de velocidad se logra cuando el desplazamiento lateral es igual o mayor a dos metros, tal como se puede observar en la Figura 2-30.

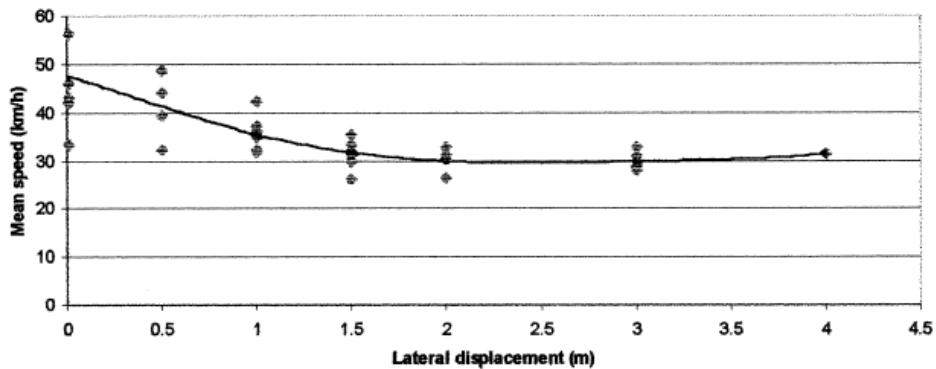


Figura 2-30: Relación entre el desplazamiento lateral y la velocidad de entrada en una rotonda. [32]

Esta disminución de la velocidad genera un flujo lento y continuo, estableciendo mayores brechas entre los vehículos que circulan por el anillo de circulación y por ende una mayor probabilidad de ingreso a los vehículos que se encuentran en las entradas, generándose así un aumento en la capacidad [3].

El principal beneficio de la reducción de la velocidad es la disminución de los accidentes y la severidad de los mismos, un estudio más profundo del tema se explica en el Capítulo 3.

Otras ventajas de estas intersecciones, es que cuando se reemplaza una intersección señalizada por una rotonda, se tiene que el tiempo consumido aumenta aproximadamente

2.3s/veh en la vía principal, pero se ve un ahorro de tiempo de 4.4 seg/veh para la vía secundaria. Cuando se reemplaza una intersección semaforizada por una rotonda se observa que se reduce un 29% en la emisiones de CO<sub>2</sub> y un 21% en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Finalmente en lo referente a la reducción del ruido, se ha visto que estas son capaces en reducir 3Db en promedio, lo cual es un valor que ya es captado por los humanos [32].

Las rotondas presentan la ventaja de que el peatón debe solo ver en una dirección para realizar la acción del cruce y así refugiarse en la isla separadora, en cambio en una intersección señalizada los peatones deben ver en ambas direcciones si no existe un parterre y también deben estar pendientes de los vehículos que realizan los giros [3].

Como se puede observar en la Figura 2-31, las rotondas poseen la misma capacidad que las intersecciones semaforizadas.

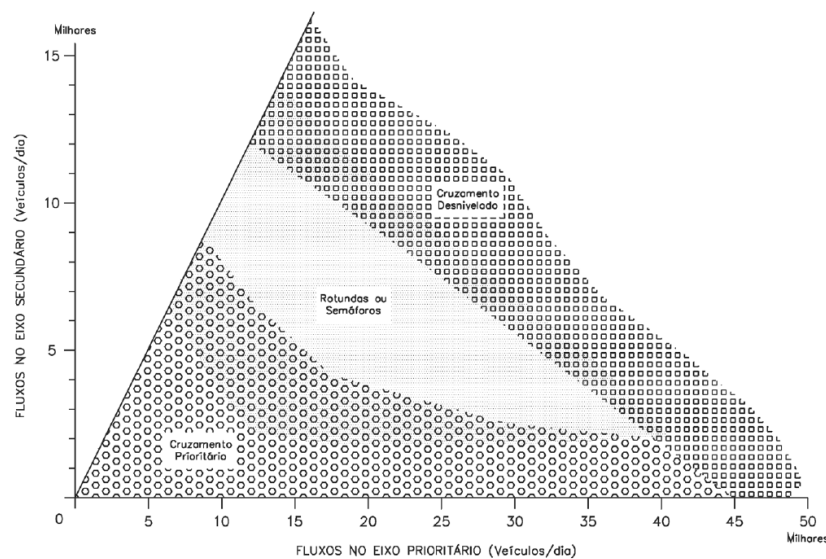


Figura 2-31: Capacidade de Diferentes Tipos de Intersecciones [6]

## 2.5.2 DESVENTAJAS

Uno de los mayores inconvenientes al implementar una rotonda, es que estas no son amigables con los usuarios vulnerables (peatones, ciclistas o motociclistas y personas con capacidad reducida), presentándose mayor número de choques o accidentes, a la vez que cuando se produce un accidente con este tipo de usuarios existe mayor probabilidad que a estos les ocurra una lesión severa [4]. El análisis de la accidentabilidad se presenta con mayor profundidad en el capítulo 3.

Al comparar una rotonda con una intersección semaforizada, esta ocupa un mayor espacio para su implementación, como se puede observar en la Figura 2-32.

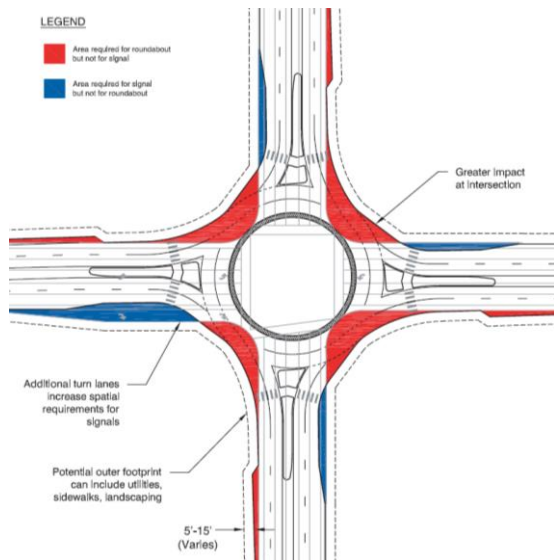


Figura 2-32: Área de ocupación de una rotonda comparada con una intersección semafORIZADA. [3]

Otra desventaja, es que cuando se reemplaza una intersección señalizada por un tipo rotonda, las emisiones de CO aumentan un 6% [32].

Las rotondas múltiples presentan serias desventajas en el cruce de usuarios vulnerables, ya que los mismos deben esperar una brecha adecuada para el paso simultaneo en todos los carriles, en muchos de los casos los conductores no respetan el paso cebra parando sobre el mismo lo que dificulta la visibilidad tanto del peatón como de los conductores que se encuentran en otros carriles produciendo una elevación de la tasa y severidad de los accidentes [3].

Una desventaja importante de las rotondas es que no permite determinar una brecha de aceptación adecuada en comparación de una intersección semafORIZADA para los usuarios con discapacidades, ya que, al no tener un sonido emitido por el semáforo, esto se les vuelve imposible cruzar por una intersección de este tipo sin ayuda externa [3].

Dentro de las desventajas presentadas para las rotondas múltiples, se encuentra los problemas operacionales producidos por una incorrecta maniobra que se genera en la entrada, carril de circulación, zonas de salida y en todos los movimientos de curvatura [34]. Los conductores que invaden los carriles generan inseguridad y disminución en la capacidad de la intersección, es así que en Portugal el 40% de los conductores que ingresa por el carril derecho invade el carril izquierdo dentro del anillo de circulación, generando un trayecto rectilíneo; en donde también el 20% de los conductores que ingresan a la rotonda por el carril izquierdo toman la salida derecha, tal como se puede mostrar en la Figura 2-33 [34].

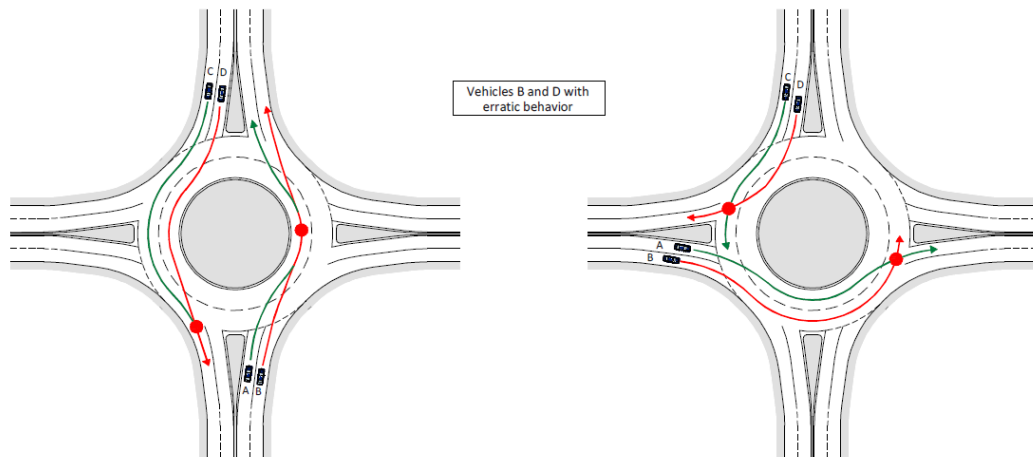


Figura 2-33: Trayectoria errática de los vehículos en rotondas dobles. [33]

Una rotonda posee 24 puntos de conflicto, pero cuando ocurre una incorrecta conducción se pueden producir hasta 32 puntos de conflicto [34], esto genera una disminución en la capacidad de las entradas porque no se establece un flujo continuo y estable dentro del anillo de circulación. El aumento de los puntos de conflicto genera también que aumente en la probabilidad de que exista accidentes. En la Figura 2-34 se puede observar los puntos de conflicto de una intersección múltiple cuando se realiza una correcta conducción y cuando la conducción es errática.

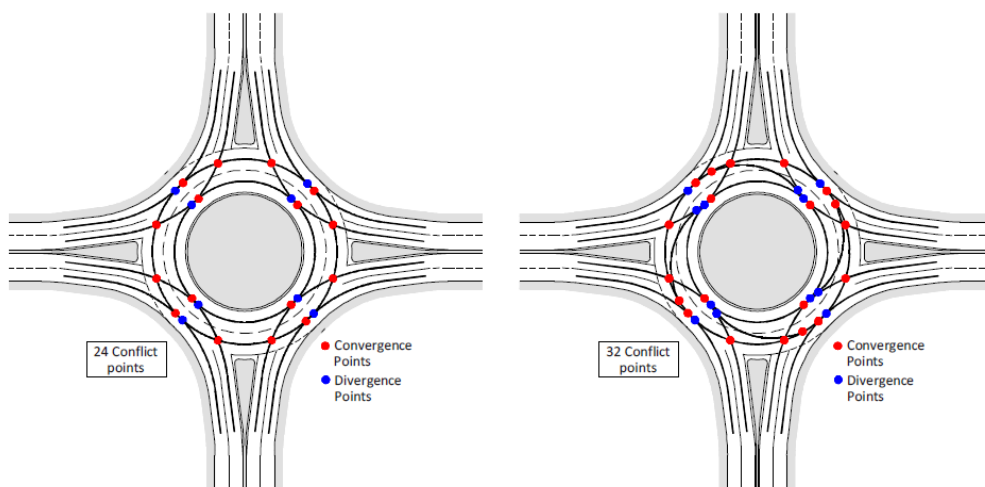


Figura 2-34: Puntos de conflicto en rotondas doble: Correcta conducción y conducción erráticas. [33]

Con relación a las rotondas múltiples, el principal problema es que estas no son capaces de disminuir en la misma proporción la velocidad en la entrada de la intersección y generan mayor número de accidentes, siendo en ese sentido menos eficientes [35].

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 3. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

## PROPUESTOS

Con la finalidad de generar parámetros geométricos que garanticen la seguridad de los usuarios, se ha procedido a realizar una investigación bibliográfica de la accidentalidad presentada en estas intersecciones, para así identificar los parámetros que contribuyen de manera significativa en la generación de accidentes y poder recomendar parámetros capaces de brindar una correcta seguridad al usuario.

### 3.1 ACCIDENTALIDAD EN ROTONDAS

Para el análisis de la accidentalidad en las rotondas se han tomado los datos de diferentes estudios. El primero fue la investigación elaborada por Montella en el año 2011, fue realizada en Italia en el periodo 2003-2008 en donde se analizó los factores que producen los accidentes en 15 rotondas urbanas ubicadas en la ciudad de Nápoles, esta investigación se basó en determinar la contribución de los diferentes factores y la relación entre ellos para la generación de accidentes. Dentro de los factores analizados se evaluaron 10 factores geométricos (ver Figura 3-1) y se identificaron 25 tipos de accidentes (ver Figura 3-2) y se tomó en cuenta el tráfico [7].

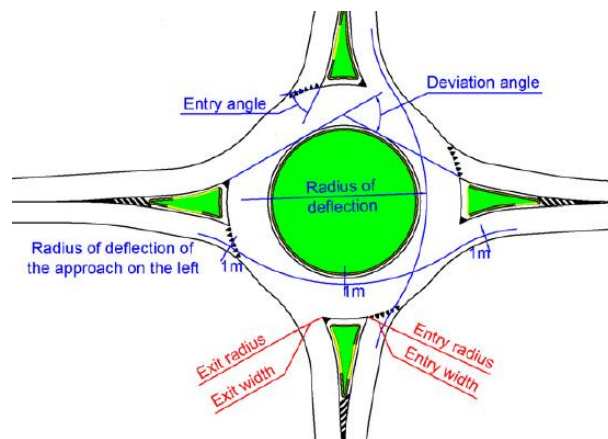


Figura 3-1: Parámetros geométricos. [7]

Dentro de los factores geométricos se analizó: DCI, ancho del carril de circulación, ancho de entrada, ancho de salida, ángulo de entrada, ángulo de desviación, excentricidad, radio de entrada, radio de salida y radio de deflexión. En lo que respecta al tráfico se levantó información manualmente durante las dos horas de máxima demanda en periodos de 15 minutos. Se analizó 274 accidentes en total en donde se diferenciaron los que generan lesiones, así como el total de heridos. Es importante mencionar que en Italia no existía hasta el año 2006 una norma para el diseño de este tipo de intersecciones, en este estudio

se menciona que en países en donde las rotondas no se encuentran bien consolidados o en donde se generan diseños inadecuados, se puede producir una influencia negativa en la seguridad.

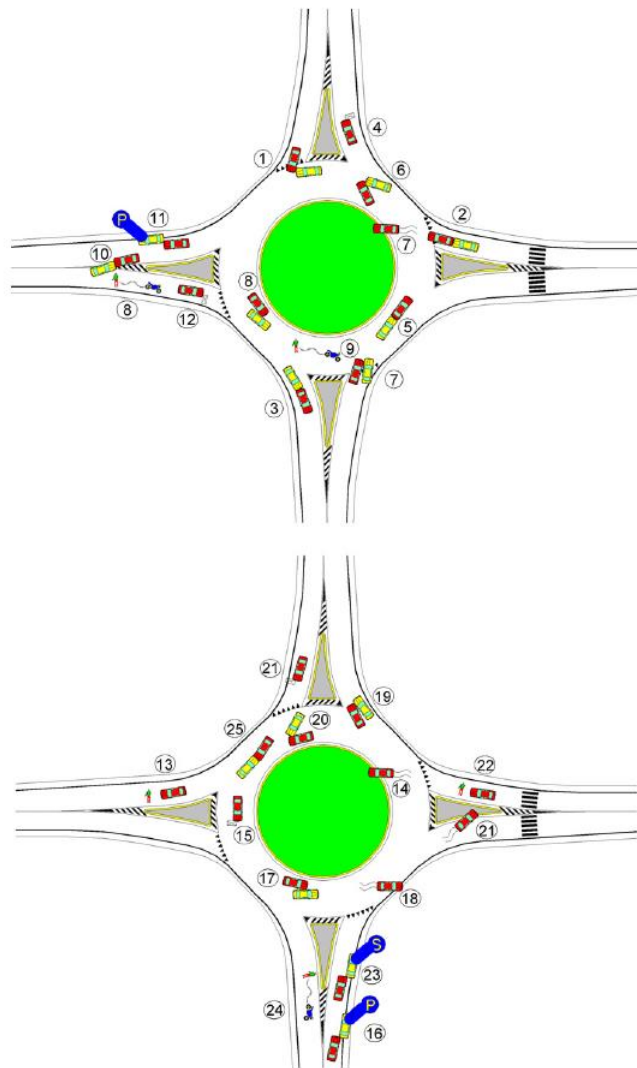


Figura 3-2: Tipos de accidentes. [7]

Como segundo estudio, se utilizó la investigación elaborada en la región de Flanders en Bélgica, donde se realizó una comparación entre el antes y después de la implementación de las rotondas, enfocados a los accidentes que involucraban a ciclistas. Se analizaron 91 rotondas escogidas aleatoriamente, el periodo de análisis fue entre 1994-2000. Se identificó si las intersecciones se encontraban dentro o fuera de la zona urbana, así como la velocidad de aproximación de cada una de ellas, estableciéndose para la zona urbana un límite de 50 km/h y para las zonas rurales velocidades que varían entre los 70 y 90 km/h. Se diferenció si las intersecciones antes de la construcción de las rotondas contaban o no con la señalización respectiva. También se analizó los accidentes ocurridos, los cuales se categorizaron por la severidad de los mismos diferenciándolos en: accidentes fatales, accidentes con lesiones severas y accidentes con lesiones leves [36].

En el año 2010 se extiende este estudio, en donde se incrementaron a 148 las rotondas analizadas, el objetivo fue generar un modelo de predicción de accidentes basados en 24 variables que se relacionan entre sí. En total se utilizaron los datos de 1491 accidentes diferenciados también por la severidad de los mismos y por los usuarios que involucran. Este modelo de predicción contaba con datos de los volúmenes en la hora de máxima demanda diferenciados según su clase. Para el levantamiento de parámetros geométricos se realizaron mediciones y visitas en campo [37]. Finalmente, en el año 2011 se realiza una extensión de estos modelos de predicción, enfocados principalmente en determinar los factores que influyen en la generación de accidentes que envuelven a un solo vehículo o usuario y en la generación de accidentes en donde se ven envueltos múltiples vehículos o usuarios. [4]

El tercer estudio se realizó en la ciudad de Vaxjo, Suecia, en donde se observó que en las intersecciones se presentaban el 75% de los accidentes y acompañado a que los usuarios viajaban en promedio 5km/h por encima del límite establecido (50 km/h), decidieron insertar en la red 21 rotondas simples con adios de la isla central que varían entre los 4 y 18 metros (ver Figura 3-3). La investigación se basó en estudiar el comportamiento de los conductores durante el periodo de verano desde abril hasta octubre de 1991, para posteriormente ser removidas en invierno [32].

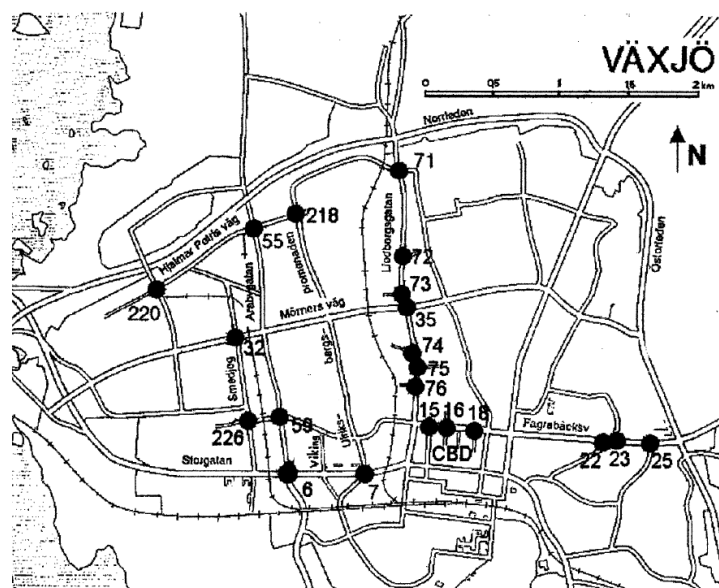


Figura 3-3: Rotondas reemplazadas en Vaxjo. [32]

La última investigación en análisis se realizó en la ciudad de Coimbra, Portugal; en donde se analizó el comportamiento de los conductores en 5 rotondas dobles separados entre sí 400 a 470 m, ubicados en un corredor arterial importante en condiciones de flujo libre. Se evidenció que la zona de influencia varía entre los 400 y 500 m, esta zona se considera a la longitud antes y después de la intersección desde que el vehículo inicia el frenado, pasa por la intersección y acelera hasta llegar a la velocidad de circulación normal (ver Figura 3-4) [33].

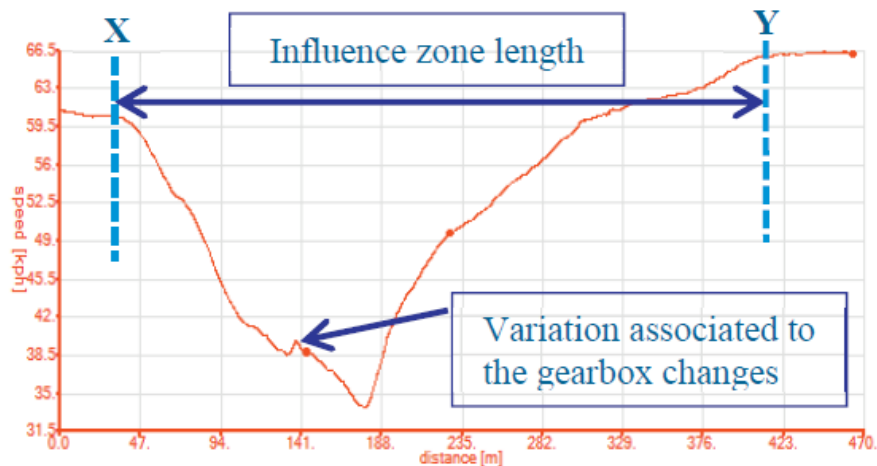


Figura 3-4: Longitud de zona de influencia. [33]

### 3.1.1 REDUCCIÓN DE ACCIDENTES

Las rotondas se han popularizado en todo el mundo debido a la capacidad que tienen para reducir los accidentes, siendo capaces de reducir entre un 10% y 41% [5] y [29].

También son capaces de reducir la severidad de los accidentes. Del análisis de 28 estudios en 8 diferentes países se ha demostrado que son capaces de reducir entre el 30-50% de las lesiones causadas por los accidentes [38] y [32], siendo más notoria esta reducción cuando los ramales de acceso poseen velocidades de circulación superiores a los 50 km/h [39]. Cuando se compara una intersección señalizada con una rotonda simple, se establece una reducción del 75% de las lesiones producidas en accidentes [40]. Las rotondas también son capaces de reducir el 65% de accidentes con consecuencias fatales [5].

Una rotonda al ser comparado con otro tipo de intersecciones genera mayor seguridad, debido a que disminuye en un 42% los accidentes en comparación con una intersección señalizada y en un 32% cuando previamente existía una intersección semafórica; siendo esta reducción más fuerte cuando se implanta la rotonda en vías de alta circulación, entre 90 y 50 km/h [39].

### 3.1.2 AUMENTO DE ACCIDENTES

El objetivo principal cuando se implementa una rotonda es la reducción de la velocidad de circulación, pero cuando el diseño propuesto no garantiza esto, la intersección es incapaz de reducir la severidad de los accidentes, esto se evidencia con más notoriedad al implementar una rotonda por una intersección semafórica en donde las velocidades de aproximación superan los 70 km/hora y 50 km/hora en su ramal principal y secundario respectivamente [39].

Las rotondas elevan en un 28% la probabilidad de accidentes para los usuarios vulnerables cuando previamente existía una intersección semaforizada [40], especialmente cuando las velocidades de cada acceso se encuentran sobre los 50 km/hora [39].

Dentro de los usuarios vulnerables, los ciclistas son los que poseen más riesgo al cruzar una rotonda. Se genera un aumento del 27% en los accidentes con lesiones a ciclistas, un aumento del 41% al 46% en accidentes con lesiones severas o con consecuencias fatales. Los accidentes a ciclistas aumentan al reemplazar una intersección señalizada por una rotonda en un 55% y aumenta un 23% cuando se reemplaza a una intersección semaforizada por una rotonda dentro de la zona urbana [36].

### 3.1.3 PARÁMETROS GENERADORES DE ACCIDENTES

Los factores geométricos son considerados como los más comunes, presentes en el 60 % de los accidentes [7]. Un excesivo radio de deflexión es un factor importante para la generación de accidentes, es por ello que en Italia se recomienda que este no sea mayor que 100 m [7]. Un ángulo de entrada pequeño (ver Figura 3-5), no es capaz de generar una desviación en la circulación y una disminución de la velocidad, aumentando hasta en un 200% el riesgo de sufrir accidentes con lesiones [32] Un factor determinante es el radio de entrada, ya que según la investigación desarrollada por Grant and Nicholson (2003), las rotondas con radios grandes generan velocidades altas de circulación, provocando movimientos erráticos de los conductores lo cual produce mayor gravedad en el accidente [41], además a medida que el radio de entrada aumenta, la longitud de influencia antes de la entrada disminuye debido a que los vehículos entran con velocidades mayores [33]. Un DCI pequeño no es capaz de garantizar que los conductores identifiquen la presencia de la rotonda debido a una deflexión inadecuada, produciendo un aumento de velocidad de circulación y disminuyendo la longitud de influencia [33], pero un valor excesivamente elevado genera una intersección tipo giratoria y velocidades de circulación excesivas y un incremento en los accidentes en donde participa un solo vehículo [4]. Entre otros factores detectados se encuentra: un excesivo ancho de carril de circulación, un excesivo ancho en la entrada, un radio de salida elevado, así como una incorrecta ubicación de la isla central expresada como una excentricidad hacia la izquierda [7].



Figura 3-5: Ángulo de entrada defectuoso. [32]

Lo que deben buscar los factores geométricos para el diseño correcto de las rotondas, es garantizar una velocidad de circulación adecuada. Es importante la disminución de la

velocidad ya que esta se encuentra directamente relacionada con la cantidad de accidentes que producen lesiones (ver Figura 3-6). Se han realizado normas geométricas que presentan los valores recomendados que permiten garantizar intersecciones seguras, estas normas han generado que exista menos accidentes en las intersecciones diseñadas actualmente en comparación con rotondas antiguas [6].

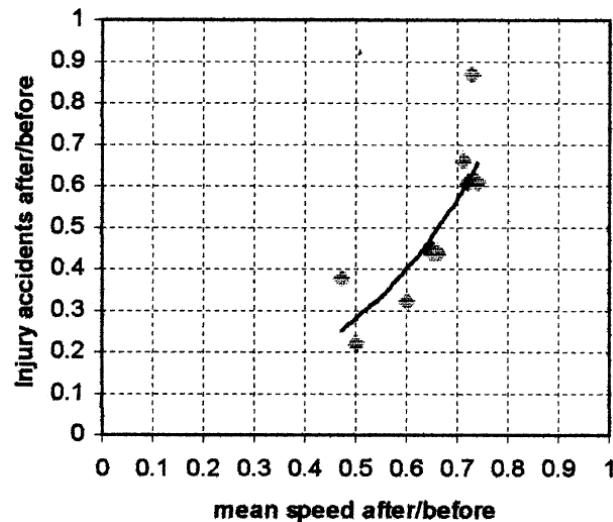


Figura 3-6: Relación entre el cambio de la velocidad media y el riesgo de accidentes en rotondas. [32]

En Chile, se ha observado que este país al no poseer una norma de diseño geométrico presenta intersecciones heterogéneas, generando graves problemas en la operación y seguridad. Se identifica que la principal falencia de diseño es el no generar ángulos de entrada y salida adecuados, la incorrecta ubicación de las islas separadoras y la falta de dimensionamiento y mala ubicación de los cruces peatonales [10].

El tráfico es un parámetro que se encuentra directamente ligado a la generación de accidentes. En rotondas con alto nivel de tráfico, existe más accidentes los cuales se caracterizan por ser choques entre múltiples vehículos [4].

La degradación o falta de señalización se encuentra presente en la mitad de los accidentes registrados, esto provoca especialmente accidentes del tipo angulares y traseros en las zonas de entrada [7]. La visibilidad e iluminación es un factor que contribuye también en la generación de accidentes, presentándose un 9% más de probabilidad de que ocurra un accidente en la noche que en el día [37].

En lo que respecta a los ciclistas, este tipo de usuarios se ven involucrados en el 47% de los accidentes producidos entre múltiples vehículos, a pesar de que en la composición vehicular solo representa un 3.4%, lo que indica el alto riesgo que poseen estos usuarios al atravesar la intersección. Según la investigación realizada en Odense, Dinamarca, en donde se utilizaron datos de 171 accidentes que envuelven ciclistas durante los años 1999-2003; se ha determinado que los accidentes en las rotondas se presentan principalmente

por dos motivos, el primero es que el funcionamiento de la rotonda es más difícil de entender debido a su trayectoria circular y en segundo lugar el atravesar esta intersección físicamente es más complicado por su deflexión [42].

Otros parámetros que influyen en la generación de accidentes a ciclistas son: una alta velocidad de aproximación en la entrada y un alto flujo vehicular. Se recomienda generar trayectorias para los ciclistas completamente separados del tráfico dentro de la intersección, cuando este supera los 8.000 vehículos por día [42].

## 3.2 PARÁMETROS PROPUESTOS

En base al análisis realizado de las normas existentes y de la accidentalidad, se ha establecido correlaciones entre los parámetros geométricos. En las Tablas 3-1 al 3-5 se muestra los valores que se recomienda utilizar para la norma ecuatoriana según las diferentes categorías definidas previamente. 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 se dispone 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.

Es importante mencionar que, en lo que respecta al vehículo de diseño, este se establezca según lo dispuesto en la Norma de Diseño Geométrico, en donde presenta los vehículos tipo para el diseño de carreteras.

Tabla 3-1: Parámetros recomendados para el Anillo de Circulación

| PARÁMETROS                              | MANUAL ECUATORIANO   |              |
|---|--|--------------|
| Posicionamiento de la isla central      | <i>Condición 1: El centro de la isla central debe estar en el polígono formado por los ejes de ramales</i> |              |
|   | <i>Condición 2: Los ramales pueden estar desfasados a la izquierda del centro de la isla central</i>       |              |
| Distancia entre ramales de aproximación | <i>El ángulo entre los ramales debe ser cercano a 90°, máx. 105°</i>                                       |              |
| Número de carriles                      | <i>≥ al número máximo de carriles en la entrada</i>  |              |
| Ancho de carriles                       | <i>El ancho de los carriles debe garantizar los movimientos asociados al vehículo de diseño.</i>           |              |
| Diámetro del círculo inscrito           | <i>Número de carriles circulación</i>  | <i>(m)</i>   |
|   | <i>1</i>   | <i>30-40</i> |
|   | <i>2</i>   | <i>40-50</i> |
|   | <i>múltiples</i>   | <i>60-80</i> |
| Radio de la isla central                | <i>&gt; 4m</i>   |              |

Tabla 3-2: Parámetros recomendados para la Entrada

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

Tabla 3-3: Parámetros recomendados para la Salida

| PARÁMETROS            | MANUAL ECUATORIANO   |                              |
|-----------------------|--|------------------------------|
| Número de carriles    | <i>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 tape la intersección</i> |                              |
| Ancho total de salida | <b>Número de carriles circulación</b>  | <b>(m)</b>                   |
|                       | 1  | > 6, recomendado entre 7-7.5 |
|                       | 2  | > 8, recomendado entre 10-11 |
| Radio de salida       | > 20 m, < 100m   |                              |

Tabla 3-4: Parámetros recomendados para la Visibilidad

| PARÁMETROS   | MANUAL ECUATORIANO  |               |
|--|---|---------------|
| Distancia de parada en la aproximación                         | <b>Velocidad de Tráfico (km/h)</b>  | <b>Dp (m)</b> |
|  | 40  | 40            |
|  | 50  | 60            |
|  | 60  | 80            |
| Distancia de Parada en el carril de circulación                | <b>Diámetro del círculo Inscrito (m)</b>                                    | <b>a (m)</b>  |
|  | ≤40   | Todo el cruce |
|  | 40-60   | 40            |
|  | 60-100  | 50            |
| Distancia de parada en zonas peatonales en la entrada y salida | <i>Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación</i>          |               |
| Distancia de visibilidad para el ingreso de los vehículos      | <i>Mismos valores de la distancia de parada en el carril de circulación</i> |               |

Tabla 3-5: Otros Parámetros para la Norma Ecuatoriana

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

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. ROTONDAS EN CUENCA

Como se mencionó en el capítulo 1, esta investigación se centrará en la ciudad de Cuenca, la misma que se encuentra ubicada en el sur del Ecuador siendo la tercera ciudad más importante. Según los datos proporcionados por el INEC para el año 2010 la ciudad de Cuenca contaba con 505.585 habitantes, con las proyecciones realizadas el año del 2016 se estima una población de 591.996 habitantes.

En lo que respecta al parque automotor, según la EMPO EP, en su rendición de cuentas del año 2013 presenta la matriculación de 79.567 vehículos, para el año 2014 se han matriculado 84.176 vehículos, lo que evidencia un alto índice de crecimiento del parque automotor de la ciudad en comparación de su crecimiento poblacional. Según el Plan de Movilidad y de Espacios Públicos (PMEP) [43], la ciudad de Cuenca para el año 2013 tiene una tasa de motorización de 150 vehículos por cada 1000 habitantes, siendo una de las más altas del País.

### 4.1 EVOLUCIÓN

No se tiene datos concretos y exactos de cómo fue la evolución histórica de la red viaria de la ciudad, pero con la investigación realizada en el PMEP es posible generar un análisis de la evolución de las intersecciones tipo rotondas.

La ciudad lineal fundada por los Incas llamada “Tomebamba”, fue refundada por los españoles con el nombre de “Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca”, en donde se implementó un trazado vial ortogonal que permitía una mejor distribución de las tierras y una orientación más fácil de la ciudad. En la Figura 4-1 se encuentra uno de los primeros planos de la ciudad realizado en 1563.

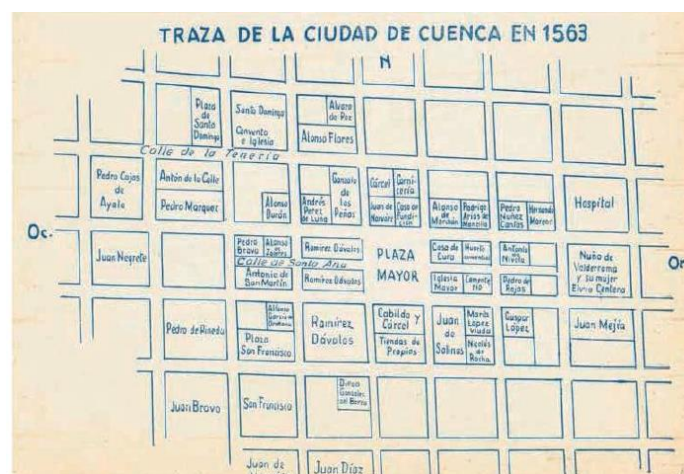


Figura 4-1: Trazado de la ciudad de 1563. [43]

La ciudad fue creciendo siguiendo el mismo trazado y no es hasta el año 1949 en donde se presenta el “Plan Regulador de la Ciudad de Cuenca”, elaborado por el Arquitecto Urbanista Gilberto Gatto Sobral, el cual presenta una planificación de la ciudad con un año horizonte de 50 años. En este plan se puede observar la generación de trazados viales en los cuales ya se evidencia la adhesión de rotondas, con el paso de los años se pudo constatar que la ciudad no siguió al pie de la letra lo generado en el Plan Regulador, pero en sí mantiene el principio propuesto. Es posible observar en la Figura 4-2 el plano propuesto en el Plan Regulador.



Figura 4-2: Plan Regulador de la Ciudad de Cuenca 1949. [43]

En la propuesta presentada por Gatto Sobral, se evidencia la planificación de 12 rotondas, las cuales unen vías de diferente jerarquía. Las rotondas propuestas poseen una diversidad de dimensión en su diámetro, así como una diversidad del número de entradas variando entre 3 y 5. Al realizar una comparación de las intersecciones propuestas en los planos con la situación actual de la ciudad, se observa que en su parte norte la ciudad no ha aplicado lo propuesto en el plan; por otro lado en la parte sur especialmente en la zona conocida como “Medio Ejido”, se ha seguido en algo lo propuesto, existiendo actualmente la zona del estadio, la Av. Fray Vicente Solano, la Av. Remigio Crespo, la Av. Roberto Crespo, la Av. José Peralta y la Av. 12 de abril. En todas las intersecciones que concuerdan con el plan de 1950, solamente la rotonda entre la Av. Fray Vicente Solano y Av. Remigio Crespo se encuentra actualmente construida, por lo que se asume que esta intersección es la rotonda construida en la ciudad.

En el año de 1966 con la iniciativa del Gobernador Miguel Malo González, se comienza con la vía perimetral (en ese entonces), conocida actualmente como Av. Las Américas. Para el año 1967 se genera un plano mostrado en la Figura 4-3, en donde se puede ver a la ciudad de Cuenca con el trazado propuesto de la Av. La Américas, esta vía actualmente

posee otro trazado, pero lo rescatable de dicho plano es que se observa construida la rotonda de la intersección de la Av. Fray Vicente Solano y Av. Remigio Crespo, afirmando la hipótesis implantada. Se puede observar la existencia de tres redondeles más, el primero en la intersección de la actual Av. España, Av. Huayna Capac, Sangurima y Av. Sebastián de Benalcázar con 5 entradas, el cual todavía se encuentra vigente en la ciudad, al mismo que se le han realizado algunas modificaciones geométricas debido a la implementación de un paso deprimido. En la parte norte se presenta una rotonda también con 5 entradas, ubicada en la intersección de la actual Av. Héroes de Verdeloma, Barrial Blanco y Calle Vieja la cual actualmente es una intersección semaforizada. La última intersección presente se encuentra en la unión de la actual Av. España y Av. Elia Liut el cual se mantiene hasta la actualizada. Se puede ver como se comienza a popularizar este tipo de soluciones en la ciudad.



*Figura 4-3: Plano de la ciudad de Cuenca 1967. [43]*

La década de los setenta fue considerada como la de mayor crecimiento, debido a que existió una gran migración de la zona rural hacia la zona urbana y por ende se generó la construcción de servicios básicos entre los cuales están las vías. Durante este periodo se generó la construcción de importantes avenidas como: Av. 10 de agosto, Av. Remigio Crespo, Av. Ordoñez Lazo, etc.; lo cual produjo un sin número de intersecciones las que en muchos de los casos fueron solucionadas con rotondas.

A partir del año 1996, los alcaldes al término de su periodo de administración comienzan a generar un documento en donde se reflejan las obras realizadas, en base a esto a continuación se explican las obras más emblemáticas desde 1996 hasta la actualidad, en donde se encuentren la construcción o reforma de rotondas:

- 1996-2004: Se construyó el distribuidor de tráfico conocido como “Chola Cuencana”, el mismo que consiste en un paso deprimido por el que atraviesa el flujo principal y en superficie la readecuación de la rotonda existente. Se construyó el distribuidor de tráfico llamado “José Peralta” el cual conecta la Bajada de Todos Santos con la Av. 12 de abril, Av. Paucarbamaba y Av. José Peralta; este distribuidor de tráfico mantiene el mismo principio del distribuidor “Chola Cuenca” con un paso deprimido y en superficie una rotonda constituida con 5 entradas.
- 2005-2009: Entre otros distribuidores de tránsito que se construyeron, se encuentra el de “Chaguarchimbana”, el mismo que consiste de una rotonda que une la Av. 10 de agosto con la Av. El paraíso y de un paso deprimido.
- 2009-2013: Se contrató la construcción del distribuidor “Simón Bolívar”, el cual tiene la misma concepción de los distribuidores de la Chola Cuencana y José Peralta. También se construyó la rotonda que conecta la Av. Primero de Mayo con la Circunvalación Medio Ejido-San Joaquín.

## 4.2 ESTADO ACTUAL

---

A partir de la información base generada en PMEP y con la ayuda de imágenes satelitales, se identificó que actualmente la ciudad dentro de su zona urbana cuenta con 40 rotondas, de las cuales todas son categorizadas como rotondas múltiples con dos o más carriles de circulación en el anillo central. En la Figura 4-4 se presenta el plano actual de la ubicación de las rotondas en la ciudad, en donde se observa que dentro del centro histórico en donde gobierna el trazado ortogonal no existe ninguna intersección de este tipo; así mismo no se evidencia rotondas en la parte norte de la urbe, debido principalmente a que la zona se encuentra ubicada dentro de una topografía montañosa. En la zona sur y nor-este zona relativamente más plana se ha producido la implementación de la mayoría de rotondas.

En la Tabla 4-1 se encuentra un resumen del número de carriles para el anillo de circulación, así como el número máximo y mínimo de carriles en la entrada. En esta Tabla se observa que el 75% de las rotondas poseen 2 carriles dentro del anillo de circulación y en la entrada máxima (vía principal), hecho que no ocurre para el número de carriles mínimo en la entrada (vía secundaria) en donde el 50% de las rotondas poseen 1 carril en la entrada y el restante 50% posee 2 carriles, no existe en la ciudad una rotonda en donde ambas aproximaciones posean 3 carriles, a la vez que se ve una descompensación en 7 rotondas en donde la vía principal posee 3 carriles y la secundaria 1 carril.

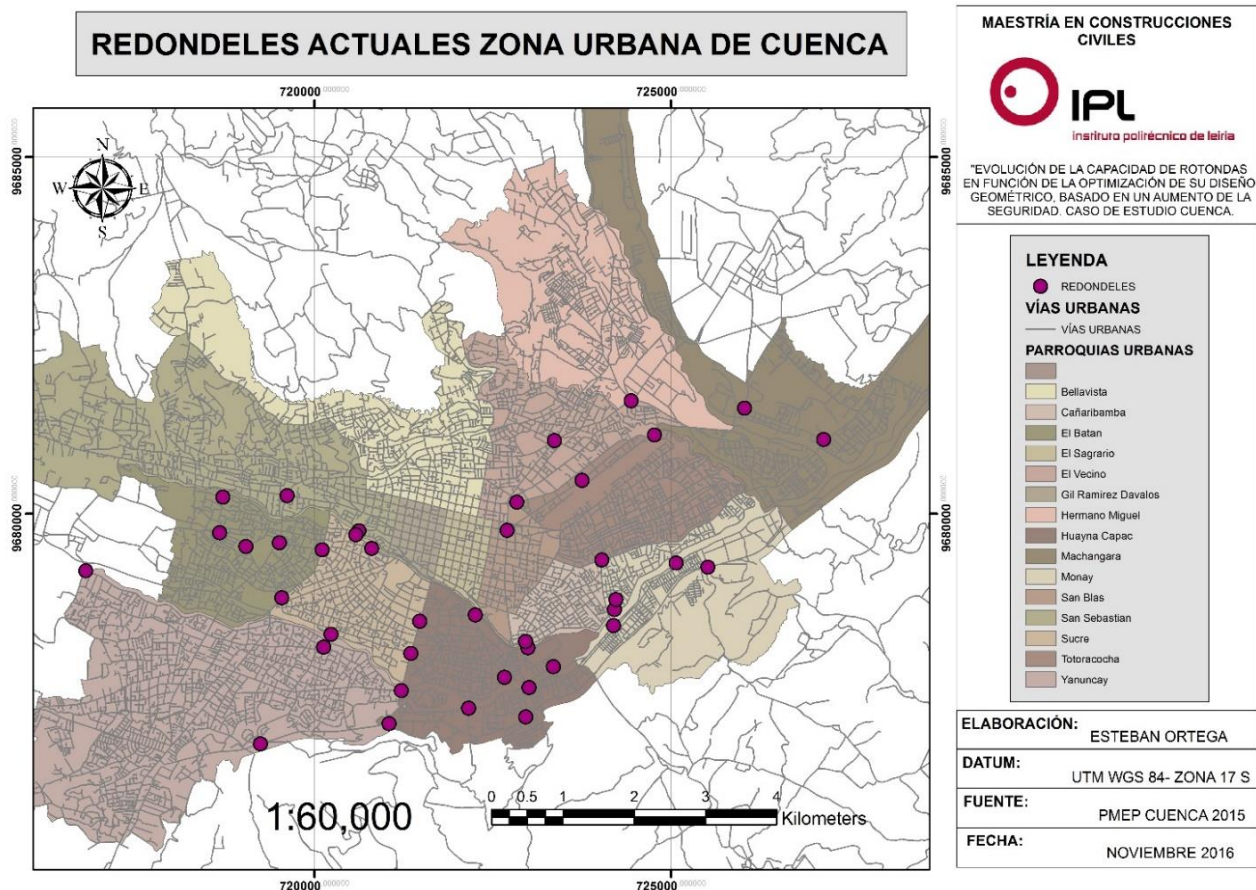


Figura 4-4: Redondeles actuales en la zona urbana de Cuenca

Tabla 4-1: Resumen del número de carriles. [43]

| NUMERO DE CARRILES | CARRILES DE CIRCULACIÓN | CARRILES DE ENTRADA MÁXIMO | CARRILES DE ENTRADA MÍNIMO |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 3                  | 10                      | 11                         | 0                          |
| 2                  | 30                      | 29                         | 19                         |
| 1                  | 0                       | 0                          | 21                         |
| <i>TOTAL</i>       | <i>40</i>               | <i>40</i>                  | <i>40</i>                  |

Un aspecto importante por analizar es el de contabilizar el número de entradas. En la Figura 4-5 se puede observar que el número máximo de entradas es de 6 mientras que el mínimo de entradas es de 2. Se ha cuantificado que el 58% de las rotondas poseen 4 ramales de entrada siendo el más común seguido con un 33% de las rotondas con 3 ramales de entrada.

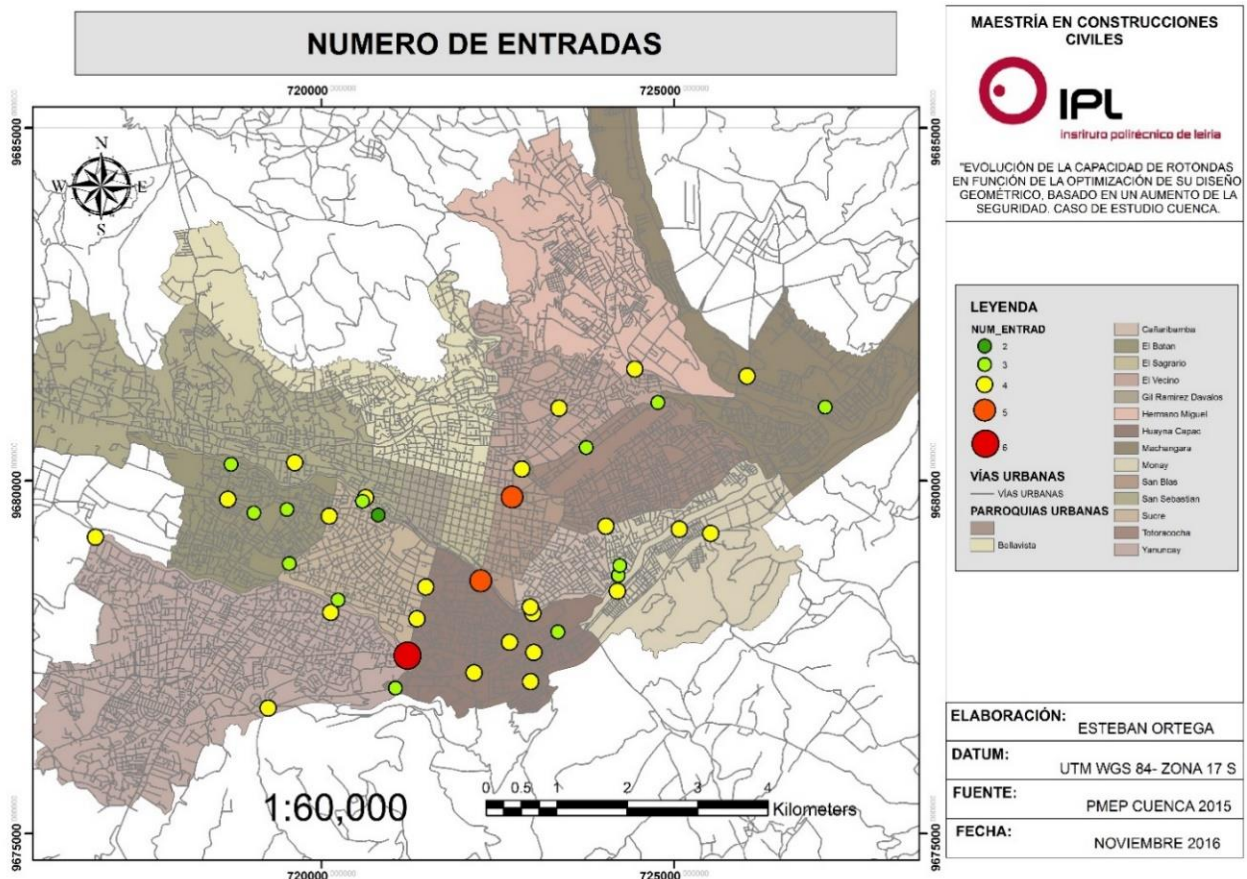


Figura 4-5: Número de entradas de rotondas en Cuenca

E ancho del carril de circulación es considerado un parámetro fundamental, ya que este es el que garantiza la correcta circulación de todos los vehículos que atraviesan la intersección. En la ciudad de Cuenca según los datos levantados se tiene que el 45% de las rotondas poseen anchos de carriles entre los 4 y 5 metros, un 28% de las rotondas poseen ancho de carriles entre 5 y 6 metros, un 10% poseen un ancho de carriles mayores a 6 metros y un 18% de las rotondas poseen carriles con anchos entre los 3.5 y 4 metros, hecho que se evidencia más claramente en la Figura 4-6.

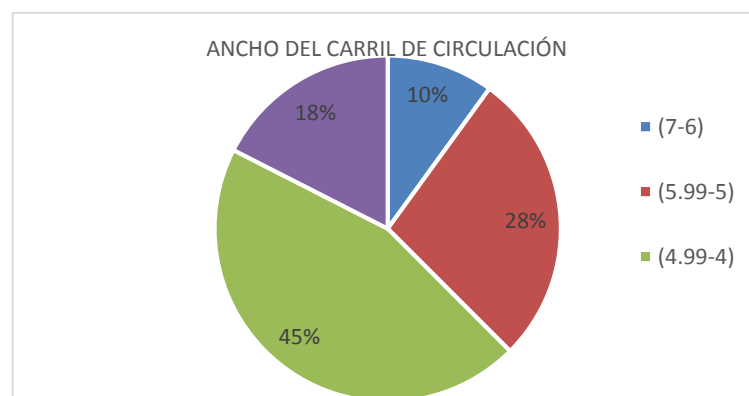


Figura 4-6: Ancho del carril de circulación

Con lo visto se puede concluir que en la ciudad solo existe la presencia de rotondas múltiples las cuales en su mayoría poseen 4 ramales de entrada y 2 carriles de aproximación en su vía principal y 2 en su vía secundaria.

### 4.3 IMPORTANCIA DE ROTONDAS

Con el fin de entender la importancia que tienen este tipo de intersecciones en la Ciudad, en la Figura 4-7 se presenta el mapa con la ubicación de las rotondas en la jerarquía vial actual elaborado en el año 2015 por el P MEP [43]. Se identifica que el 100% de rotondas se han colocado en la unión de vías de mayor jerarquía vial sean estas: expresas, arteriales y colectoras. Las rotondas se convierten en puntos fundamentales del paso de los usuarios de la red vial: peatones, ciclistas, transporte público, vehículos particulares, etc. Un diseño inadecuado de este tipo de intersecciones producirá un gran perjuicio a todos los usuarios, traducido en mayores tiempos de viaje y un aumento en el número de accidentes.

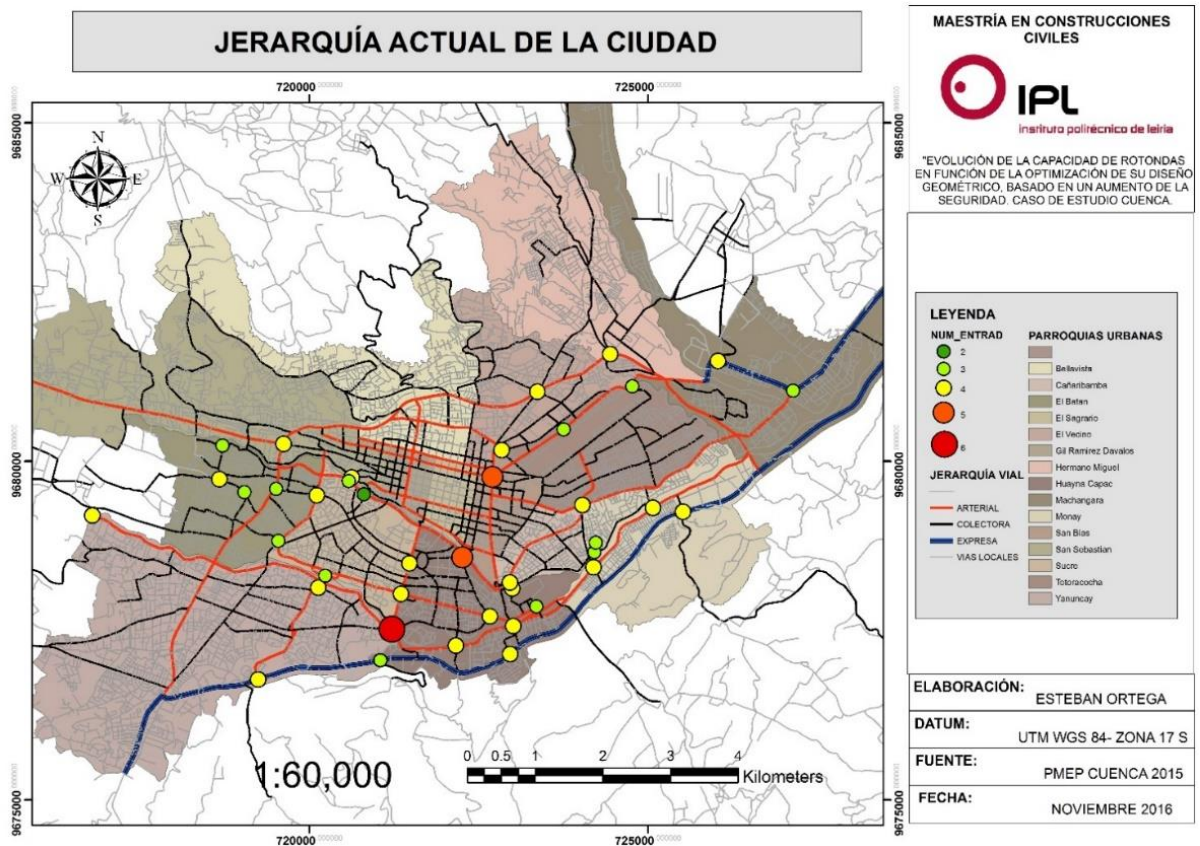


Figura 4-7: Jerarquía vial actual de la ciudad. [43]

Las vías de jerarquía vial mayor son las que se encuentran con una elevada circulación de tránsito y son las que requieren mayor capacidad, un valor de análisis claro de entender es la Intensidad Media Diaria (IMD), el cual según el P MEP [43] es:

“El número total de vehículos que atraviesa durante un año una determinada sección, dividido por 365 días, expresado en unidades de vehículos equivalentes a los cuales se les ha utilizado factores de corrección para vehículos livianos, pesados y motos, según la composición de tráfico de cada intersección en específico”.

El IMD calculado para el año 2014 en Cuenca se presenta en la Figura 4-8, en donde se ratifica la importancia de las rotondas, por las que pasan la mayor cantidad de vehículos convirtiéndose en puntos críticos de la red vial actual.

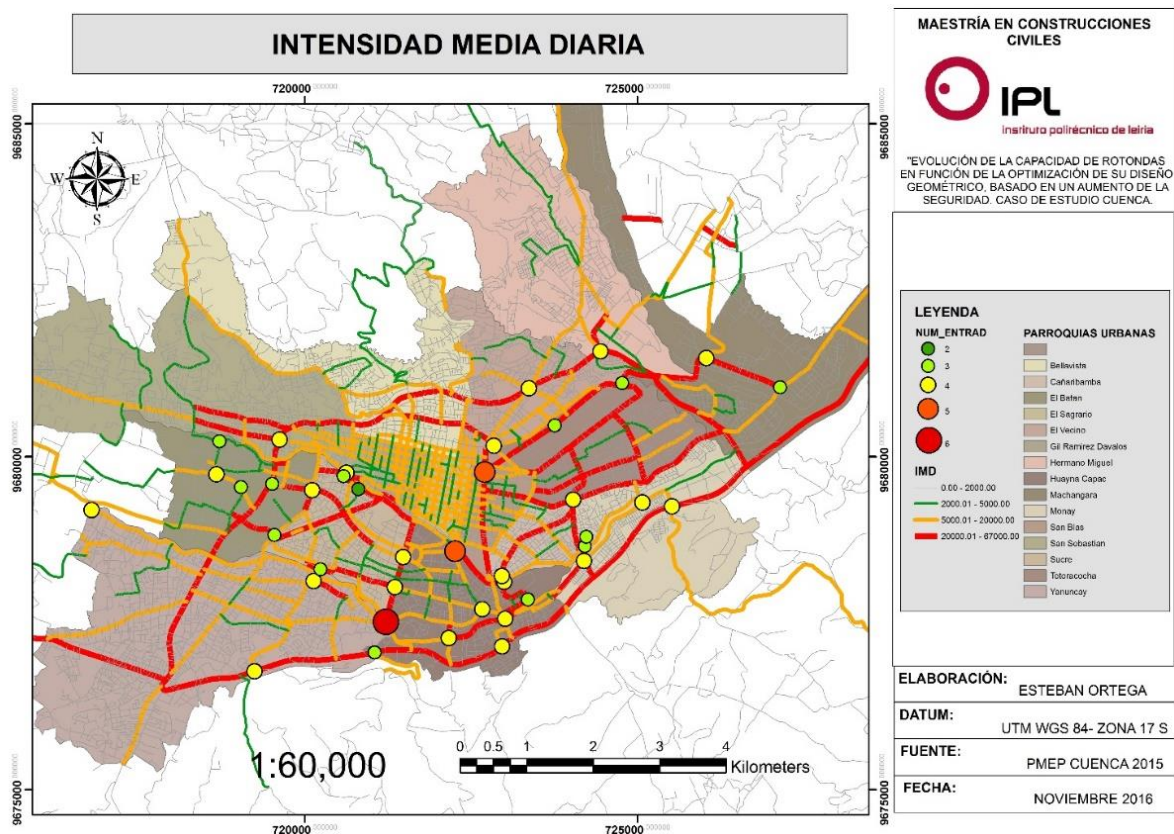


Figura 4-8: Intensidad Media Diaria de la ciudad. [43]

Las rotondas no afectan a la circulación vehicular si estas poseen la capacidad suficiente para que atraviese el tránsito diario, pero según la investigación realizada por PMEP [43] en donde analiza la saturación (volumen vehicular/capacidad) de la red principal vial de Cuenca, se observa varios corredores con un alto nivel de saturación (entre 80-100%), siendo lo más crítico que muchos de estos corredores poseen intersecciones tipo rotondas. En la ciudad existen intersecciones que no pueden soportar el alto volumen vehicular debido a la poca capacidad que estas brindan. En la Figura 4-9 se muestra un acercamiento de algunos corredores viales con grados de saturación de 80% resaltados con color amarillo y otros resaltados con color rojo que representan los corredores con una saturación igual o mayor al 100%.

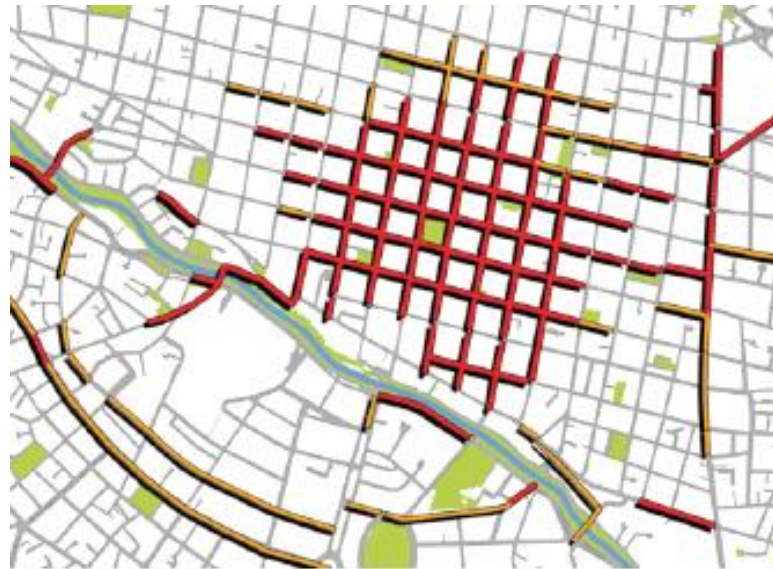


Figura 4-9: Saturación Vial de la ciudad. [43]

Para los accidentes de tránsito generados en el cantón Cuenca, la Tabla 4-2 contiene un historial del tipo de accidentes en el periodo 2013-2015, elaborado en la publicación “Cuenca en Cifras 2015” [44]; en donde para el año 2015 se ha producido 1.735 accidentes existiendo una disminución del 19% en comparación con el año 2014 y una disminución de 5% en comparación con el año 2013. Es importante mencionar que la zona urbana del cantón es la que tiene más incidencia en estos datos con un 80% de los accidentes generados. La Tabla 4-2 muestra que el mayor número de accidentes son los choques con un 57%, seguido por la pérdida de pista con un 14% y el atropello y estrellamiento ambos con un 10%, el resto de tipologías no es significativo.

Tabla 4-2: Accidentes de tránsito por período según tipo de accidentes (2013-2015). [44]

| Tipo de accidentes | Año 2013               |                          | Año 2014               |                          | Año 2015               |                          |
|--------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|                    | Participación absoluta | Participación porcentual | Participación absoluta | Participación porcentual | Participación absoluta | Participación porcentual |
| Choques            | 1,023                  | 54%                      | 1,183                  | 55%                      | 993                    | 57%                      |
| Pérdida de pista   | 137                    | 7%                       | 221                    | 10%                      | 240                    | 14%                      |
| Atropello          | 252                    | 13%                      | 263                    | 12%                      | 179                    | 10%                      |
| Estrellamiento     | 257                    | 14%                      | 260                    | 12%                      | 170                    | 10%                      |
| Rozamiento         | 75                     | 4%                       | 78                     | 4%                       | 59                     | 3%                       |
| Colisión           | 56                     | 3%                       | 62                     | 3%                       | 28                     | 2%                       |
| Volcamiento        | 28                     | 1%                       | 19                     | 1%                       | 18                     | 1%                       |
| Caida de pasajeros | 20                     | 1%                       | 22                     | 1%                       | 17                     | 1%                       |
| Arrollamiento      | 9                      | 0%                       | 7                      | 0%                       | 2                      | 0%                       |
| Otros              | 31                     | 2%                       | 33                     | 2%                       | 28                     | 2%                       |
| Sin Información    | 1                      | 0%                       | 2                      | 0%                       | 4                      | 0%                       |
| <b>Total</b>       | <b>1,889</b>           | <b>100%</b>              | <b>2,150</b>           | <b>100%</b>              | <b>1,735</b>           | <b>100%</b>              |

Dentro del análisis que se realiza para el lugar de mayor incidencia de choques para el año 2015, en el boletín se destacan 8 sitios de los cuales 5 son intersecciones tipo rotondas; similar comportamiento ocurrió para el año 2014 [45], en donde se identificaron

15 lugares de mayor incidencia de choque, de los cuales existen 5 intersecciones tipo rotondas. A continuación, se presenta el listado de las rotondas conflictivas:

- Av. Américas y Av. Remigio Crespo Toral.
- Av. Américas y Av. Ordoñez Lazo.
- Av. Américas y Av. Turuhuaico.
- Av. Américas y Av. De la Independencia.
- Rotonda de los Tres Puentes.
- Rotonda del Hospital del IESS.
- Av. Del Estadio y Roberto Crespo.
- Av. González Suarez y Panamericana Norte.

Existen 6 lugares que han sido denominados como de mayor incidencia de atropellos para el año 2015 [44], en donde 2 de ellos son rotondas; para el año 2014 [45] se identifican 5 lugares de los cuales ninguno pertenece a intersecciones giratorias, las intersecciones que destacan son:

- Av. Américas y Ordoñez Lazo.
- Av. Fray Vicente Solano y 10 de agosto.

En lo que se refiere a muertes producidas por accidentes de tránsito, se tiene que tanto para el año 2014 como 2015 se produjeron en 2 lugares de mayor incidencia, en donde el Redondel de la Av. González Suarez y Av. Paseo de los Cañaris se encuentra dentro de uno de estos.

## 4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 
- La implementación de las rotondas se viene realizando desde hace aproximadamente 50 años en Cuenca, actualmente existen 40 intersecciones, de las cuales el 100% se encuentra clasificada como rotondas múltiples y la mayoría con 4 ramales de aproximación.
  - Todas las rotondas de la ciudad se encuentran ubicadas en vías clasificadas como de jerarquía expresas, arterial y colectoras; a la vez que son por donde pasan la mayor cantidad de vehículos.
  - Del total de lugares de mayor incidencia de accidentes, se tiene que el 62% de los choques producidos se presentan en rotondas, a la vez que el 33% de los puntos de mayor incidencia de atropellos se generan en rotondas.
  - Las rotondas son puntos críticos en la ciudad, por lo que un mal diseño de la misma genera un perjuicio sustancial a los usuarios, reflejándose en un aumento de accidentes y demoras excesivas en los vehículos.
  - Se refleja que las intersecciones de la ciudad poseen altos niveles de saturación generando bajos niveles de servicio, produciendo así molestias diarias a los usuarios debido a que necesitan de mayores tiempos para atravesar las rotondas

## 5. CASO DE ESTUDIO.

Se ha enmarcado dentro de la investigación, el estudio de 2 intersecciones ubicadas en la ciudad de Cuenca. La primera intersección analizada es la conocida como “Rotonda del CREA” a la cual en adelante se la llamará “Intersección 1”. La segunda intersección evaluada es la conocida como “Rotonda de los Totems” a la cual en adelante se la llamará “Intersección 2”. En la Figura 5-1 se muestra la ubicación de las dos rotondas en estudio.

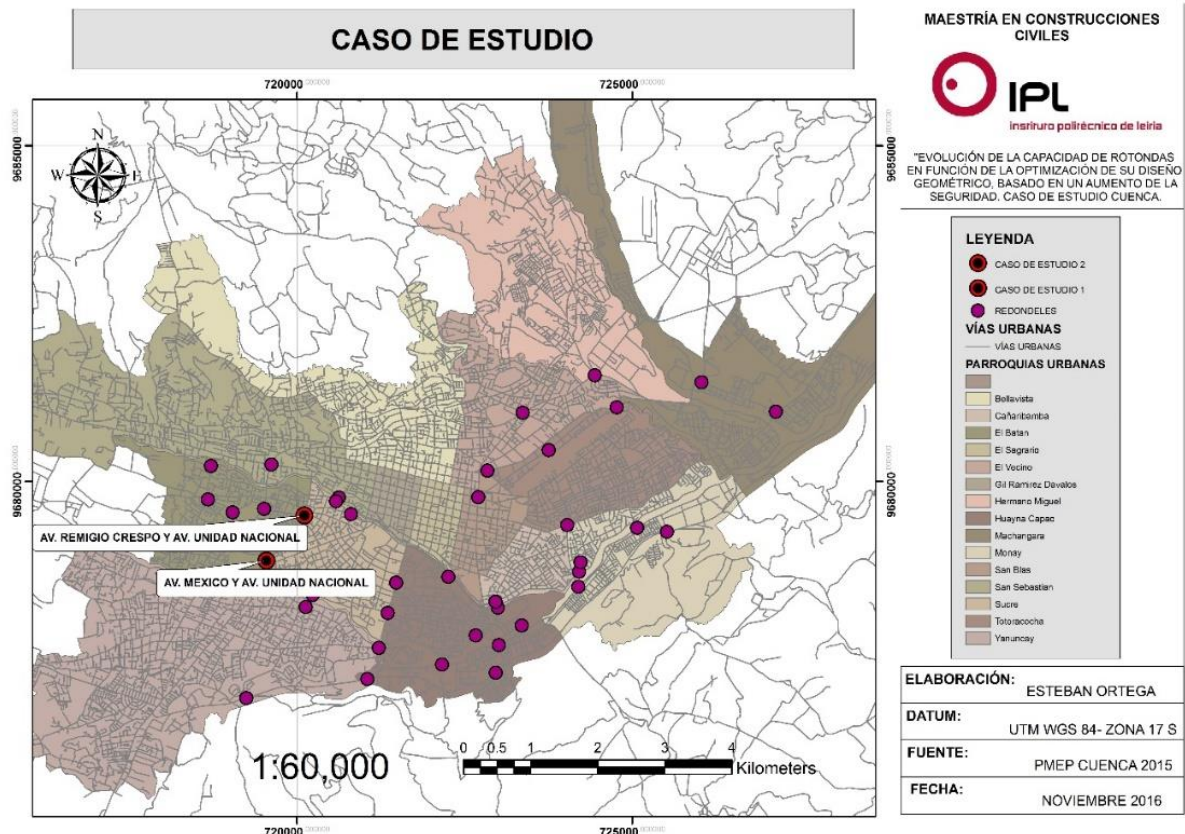


Figura 5-1: Ubicación de las intersecciones en estudio

Lo que se busca al analizar estas intersecciones, es obtener una idea clara de lo que está pasando en las rotondas ubicadas en la ciudad de Cuenca, tanto en el aspecto del tráfico como del diseño geométrico.

Para la obtención de las características geométricas, se han utilizado los datos del inventario vial contratado en el año 2014 por el GAD llamado “Servicios de Inventario Vial en la Zona Urbana del Cantón Cuenca” [46]; el cual consistió en el levantamiento de 59 km de ejes viales urbanos ubicados en la zona de El Ejido, dentro del inventario se realizó el levantamiento planimétrico y altimétrico de las vías con sus características geométricas, así como también se realizó el levantamiento de la señalización existente. Para el análisis del tráfico, se obtuvieron los datos de la consultoría contratada en el año 2013 por el GAD llamada “Estudio de Volúmenes de Tránsito de Diferentes

Intersecciones de la Ciudad de Cuenca” [47], la cual consistió en determinar los volúmenes de tráfico de 39 intersecciones, a la vez que se determinó la composición vehicular, los movimientos y las intensidades. En esta consultoría se realizó un conteo manual clasificado durante 12 horas continuas las 07:00 hasta las 19:00 y para el cálculo de los factores necesarios para determinar el TPDA, se utilizó la información de tránsito de detectores existentes en intersecciones aledañas en donde se obtuvo el tráfico sin clasificar durante siete días las 24 horas.

A continuación, se explica cada una de estas características enfocadas a las dos intersecciones en estudios

## 5.1 ESTUDIO DE INTERSECCIÓN 1

### 5.1.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INTERSECCIÓN 1

La intersección 1 se encuentra en coordenadas UTM WGS84 Z17S 719.533E y 9'678.821N. Esta intersección se encuentra conformada por tres ramales de acceso de los cuales contienen 2 carriles de aproximación y 2 carriles dentro del anillo de circulación. Esta intersección representa la unión de la Av. Unidad Nacional, Av. México y Av. 10 de agosto; las cuales son categorizadas como vías arteriales (Av. Unidad Nacional y Av. 10 de agosto) y vías colectoras (Av. México). En la Figura 5-2 se muestra un esquema de la Intersección 1.



Figura 5-2: Ubicación Intersección 1

Desde el punto de vista geométrico la Intersección 1 se encuentra emplazada en un terreno de características planas, ya que en sus dos accesos (Av. México y Av. Unidad Nacional) presentan pendientes longitudinales muy próximas al 0%; mientras que para el acceso compuesto por la Av. 10 de agosto, la pendiente longitudinal aumenta levemente hasta

un 4%. Esta intersección se caracteriza por tener un anillo de circulación que no es capaz de permitir de manera segura los movimientos de los vehículos, especialmente de los pesados. Los ramales de aproximación generan ángulos agudos con el anillo de circulación, lo que produce altas velocidades en las entradas.

## 5.1.2 CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO

### INTERSECCIÓN 1

La Intersección 1 posee gran afluencia vehicular, por ella circula un alto porcentaje de viajes que van desde el centro hacia la zona sur y viceversa. Actualmente cerca de la misma se encuentra emplazado el patio taller del proyecto “Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca” el cual luego de su puesta en operación se convertirá en un polo generador y atractor de viajes. La intersección en análisis se encuentra dentro de la zona de influencia del mercado el Arenal, convirtiéndose así en una intersección importante para la movilidad, una muestra de esto es que por ella pasan actualmente 3 líneas de buses (ver Tabla 5-1).

*Tabla 5-1: Buses en Intersección 1*

| LÍNEA | RUTA         | TRAYECTO |
|-------|--------------|----------|
| 14    | FERIA LIBRE  | IDA      |
| 15    | MONAY        | RETORNO  |
| 15    | FERIA LIBRE  | IDA      |
| 17    | TODOS SANTOS | IDA      |

A partir de la Información entregada por el GAD [47], se ha podido establecer que la Intersección 1, cuenta con 3 accesos de los cuales cada uno de ellos permite realizar 3 movimientos, por lo que en la intersección en total existen 9 posibles flujos de tráfico, tal como se muestra en la Figura 5-3.

El total del conteo levantado en el año 2013 para toda la intersección 1 se presenta en la Tabla 5-2.

*Tabla 5-2: Total Conteo 2013 en Intersección 1*

| TOTAL CONTEO 2013 TODAS LAS ENTRADAS |          |       |      |      |      |         |       |               |
|--------------------------------------|----------|-------|------|------|------|---------|-------|---------------|
|                                      | LIVIANOS | BUSES | CL   | CM   | CP   | TRAILER | MOTOS | TOTAL         |
| <b>TOTAL</b>                         | 22948    | 657   | 944  | 251  | 269  | 19      | 525   | <b>25613</b>  |
| <b>PORCENTAJE</b>                    | 89.6%    | 2.6%  | 3.7% | 1.0% | 1.1% | 0.1%    | 2.0%  | <b>100.0%</b> |

Para el cálculo del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), se ha utilizado el criterio que se fundamenta en la hipótesis de permanencia de las variaciones horarias, diarias, semanales y mensuales del tráfico de año a año en porcentajes; esto quiere decir que, aunque sus volúmenes siempre serán crecientes, las proporciones o porcentajes serán prácticamente las mismas de año en año.



Figura 5-3: Movimientos de la Intersección 1

Para el cálculo del TPDA<sub>2013</sub>, se necesario la ecuación 21:

$$TPDA_{2013} = T_o * F_h * F_d * F_s * F_m \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

$TPDA_{2013}$ = Tráfico promedio diario anual para el año 2013.

$T_o$ = Tráfico observado, obtenido a partir del conteo de tráfico.

$F_h$ = Factor horario.

$F_d$ = Factor diario.

$F_s$ = Factor semanal.

$F_m$ = Factor mensual.

El valor de los diferentes factores para la Intersección 1 se ha obtenido de la consultoría del GAD [47], el cual se muestra a continuación en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Factor de expansión para Intersección 1

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Fh_Lun_Jul        | 1.26        |
| Fd_Lun_Jul        | 0.99        |
| Fs_Lun_Jul        | 1.000       |
| Fm_Lun_Jul        | 0.97        |
| <b>Fe_Lun_Jul</b> | <b>1.21</b> |

Los resultados del TPDA para el 2013 para la Intersección 1 se presenta en la Tabla 5-4, en donde se han colocado los resultados totales pertenecientes a cada acceso a la intersección, estos valores se encuentran clasificados por el tipo de vehículo.

Tabla 5-4: TPDA 2013 Intersección 1

| TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 1: ENTRADA |          |       |        |       |       |         |       |              |
|---|----------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|--------------|
|   | LIVIANOS | BUSES | CL     | CM    | CP    | TRAILER | MOTOS | TOTAL        |
| <b>TOTAL</b>                                    | 9541     | 257   | 105    | 113   | 68    | 8       | 238   | <b>10330</b> |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                      | 1.21     | 1.21  | 1.21   | 1.21  | 1.21  | 1.21    | 1.21  |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                | 11564    | 311   | 127    | 137   | 82    | 10      | 288   | <b>12519</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                               | 92.37%   | 2.48% | 1.01%  | 1.09% | 0.66% | 0.08%   | 2.30% | <b>100%</b>  |
| TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 2: ENTRADA |          |       |        |       |       |         |       |              |
|   | LIVIANOS | BUSES | CL     | CM    | CP    | TRAILER | MOTOS | TOTAL        |
| <b>TOTAL</b>                                    | 7628     | 187   | 90     | 93    | 31    | 9       | 139   | <b>8177</b>  |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                      | 1.21     | 1.21  | 1.21   | 1.21  | 1.21  | 1.21    | 1.21  |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                | 9245     | 227   | 109    | 113   | 38    | 11      | 168   | <b>9911</b>  |
| <b>PORCENTAJE</b>                               | 93.28%   | 2.29% | 1.10%  | 1.14% | 0.38% | 0.11%   | 1.70% | <b>100%</b>  |
| TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 3: ENTRADA |          |       |        |       |       |         |       |              |
|   | LIVIANOS | BUSES | CL     | CM    | CP    | TRAILER | MOTOS | TOTAL        |
| <b>TOTAL</b>                                    | 5779     | 213   | 749    | 45    | 170   | 2       | 148   | <b>7106</b>  |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                      | 1.21     | 1.21  | 1.21   | 1.21  | 1.21  | 1.21    | 1.21  |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                | 7004     | 258   | 908    | 55    | 206   | 2       | 179   | <b>8612</b>  |
| <b>PORCENTAJE</b>                               | 81.33%   | 3.00% | 10.54% | 0.64% | 2.39% | 0.02%   | 2.08% | <b>100%</b>  |

Para obtener el tráfico en el año 2017, se realizará las proyecciones del mismo, basados en las tasas de crecimientos generadas por la Unidad de Factibilidad del MTOP para el Azuay, las cuales se presenta en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Tasas de Crecimiento

| TASAS DE CRECIMIENTO AZUAY |          |       |          |
|----------------------------|----------|-------|----------|
| PERIODO                    | LIVIANOS | BUSES | CAMIONES |
| 2015-2020                  | 5.98     | 2.27  | 4.45     |
| 2020-2025                  | 5.16     | 1.96  | 4.07     |
| 2025-2030                  | 4.51     | 1.72  | 3.67     |
| 2030-2035                  | 3.99     | 1.51  | 3.33     |

El resultado de la proyección del tráfico para todas las entradas se muestra en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6: Tráfico proyectado Intersección 1

| TOTAL TPDA 2017 TODAS LAS ENTRADAS |          |       |      |      |      |         |       |              |
|------------------------------------|----------|-------|------|------|------|---------|-------|--------------|
|                                    | LIVIANOS | BUSES | CL   | CM   | CP   | TRAILER | MOTOS | TOTAL        |
| <b>TOTAL</b>                       | 35087    | 870   | 1157 | 146  | 285  | 9       | 801   | <b>38355</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                  | 91.5%    | 2.3%  | 3.0% | 0.4% | 0.7% | 0.0%    | 2.1%  |              |

A partir de la Tabla 5-6 se puede observar como el 90% de los vehículos pertenece a la categoría de livianos, seguido por un 2.2% referente a vehículos tipo buses, un 3.5% a

camiones livianos, un 0.9% a camiones medianos y un 1% a camiones pesados, un 0.1% de trailers y un 2.1% de motos (Ver Figura 5-4).

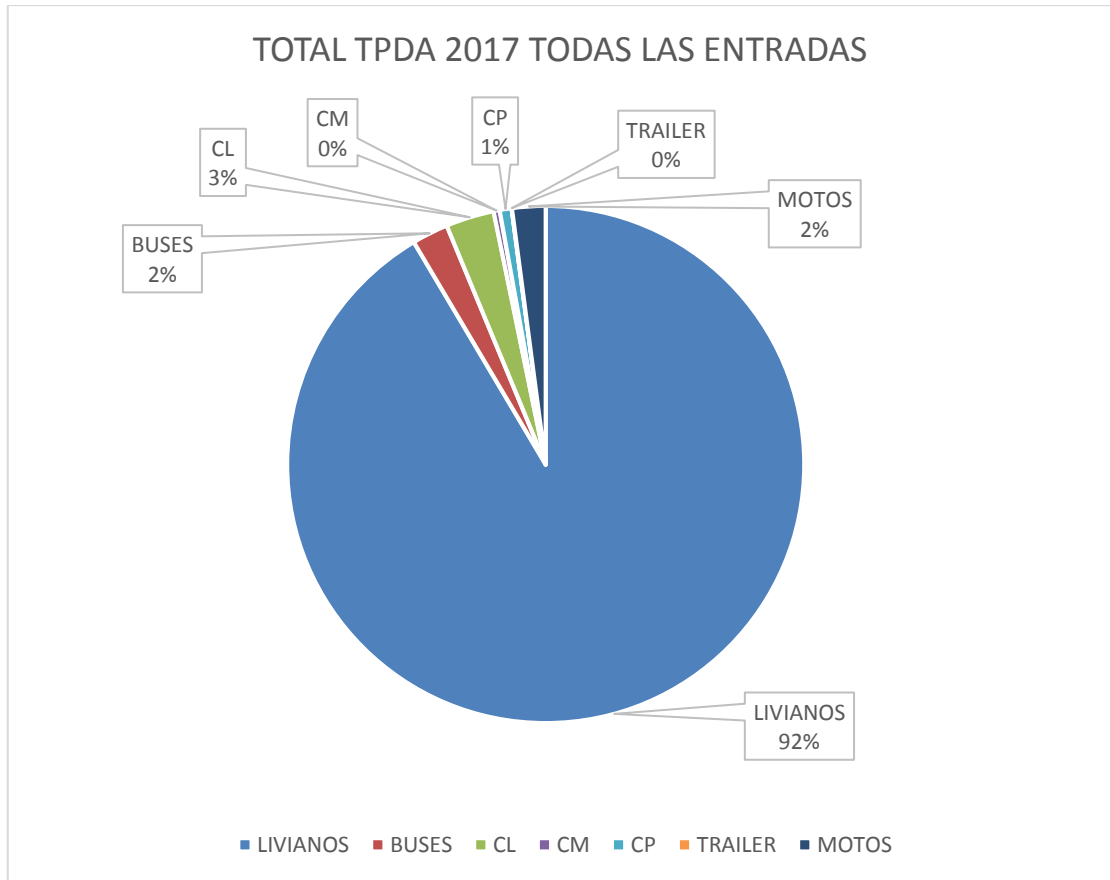


Figura 5-4: Clasificación Vehicular Intersección 1

Es importante conocer como aporta cada uno de los accesos al tráfico en la intersección, así como también el conocer el tráfico para cada movimiento. En la Tabla 5-7 se presenta un resumen del TPDA para el año 2017, diferenciado por cada flujo y acceso.

Tabla 5-7: Tráfico por cada Flujo Intersección 1

| RESUMEN TPDA 2017         |               |        |                |               |        |                |               |        |
|---------------------------|---------------|--------|----------------|---------------|--------|----------------|---------------|--------|
| ACCESO 1                  |               |        | ACCESO 2       |               |        | ACCESO 3       |               |        |
|                           |               | %      |                |               | %      |                |               | %      |
| <b>Flujo 1</b>            | 7617          | 49.40% | <b>Flujo 4</b> | 4540          | 37.23% | <b>Flujo 7</b> | 3956          | 36.84% |
| <b>Flujo 2</b>            | 7713          | 50.02% | <b>Flujo 5</b> | 7381          | 60.52% | <b>Flujo 8</b> | 6742          | 62.79% |
| <b>Flujo 3</b>            | 90            | 0.58%  | <b>Flujo 6</b> | 274           | 2.25%  | <b>Flujo 9</b> | 39            | 0.37%  |
| <b>TOTAL PARCIAL</b>      | 15420         | 100%   |                | 12195         | 100%   |                | 10737         |        |
| <b>PROCENTAJE</b>         | <b>40.21%</b> |        |                | <b>31.80%</b> |        |                | <b>28.00%</b> |        |
| <b>TOTAL INTERSECCIÓN</b> | <b>38352</b>  |        |                |               |        |                |               |        |

El acceso 1 es el que aporta la mayor cantidad de tráfico a la intersección con un 40%; el acceso 2 aporta con un 32% y el acceso 3 un 27%. En lo que respecta a los giros, las vueltas en “U” poseen cantidades de tráfico mínimas, los giros derechos e izquierdos son

los movimientos que representa la mayor cantidad de vehículos en cada acceso, estableciéndose un comportamiento homogéneo para los accesos 2 y 3, en donde el giro derecho posee alrededor del 60%; esta situación no se replica para el acceso 1, ya que existe una división equitativa de los vehículos que realizan el giro derecho e izquierdo (ver Figura 5-5).

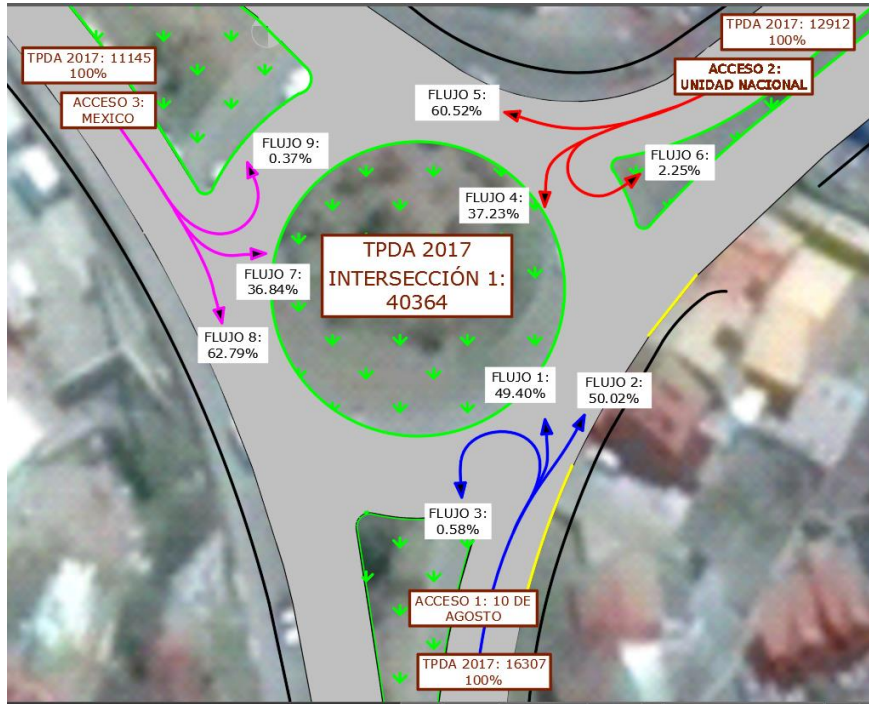


Figura 5-5: TPDA 2017 Intersección 1

El conteo realizado como se indicó anteriormente se ejecutó en periodos de 15 minutos, a partir de estos datos es posible encontrar cual es la hora de máxima demanda y cuál es el factor de la hora de máxima demanda, valores que servirán para el cálculo de la capacidad de la intersección.

Para encontrar la hora de máxima demanda, en la Figura 5-6 se muestra un diagrama que representa el conteo realizado dividido en cada hora, de este se puede obtener que la hora de máxima demanda para la intersección 1 se encuentra entre las 18:00 y las 19:00, con 2529 vehículos contados.

A partir de la hora de máxima demanda, es posible encontrar un factor que relacione a esta con el tráfico total del día, en la Tabla 5-8 se presenta el resultado de la relación en mención.

Tabla 5-8: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 1

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| <i>TOTAL CONTEO</i>                 | 25613 |
| <i>FATOR HORARIO</i>                | 1.28  |
| <i>TOTAL DÍA</i>                    | 32880 |
| <i>TOTAL HORA DE MÁXIMA DEMANDA</i> | 2529  |
| <i>RELACIÓN H.M.D</i>               | 7.69% |

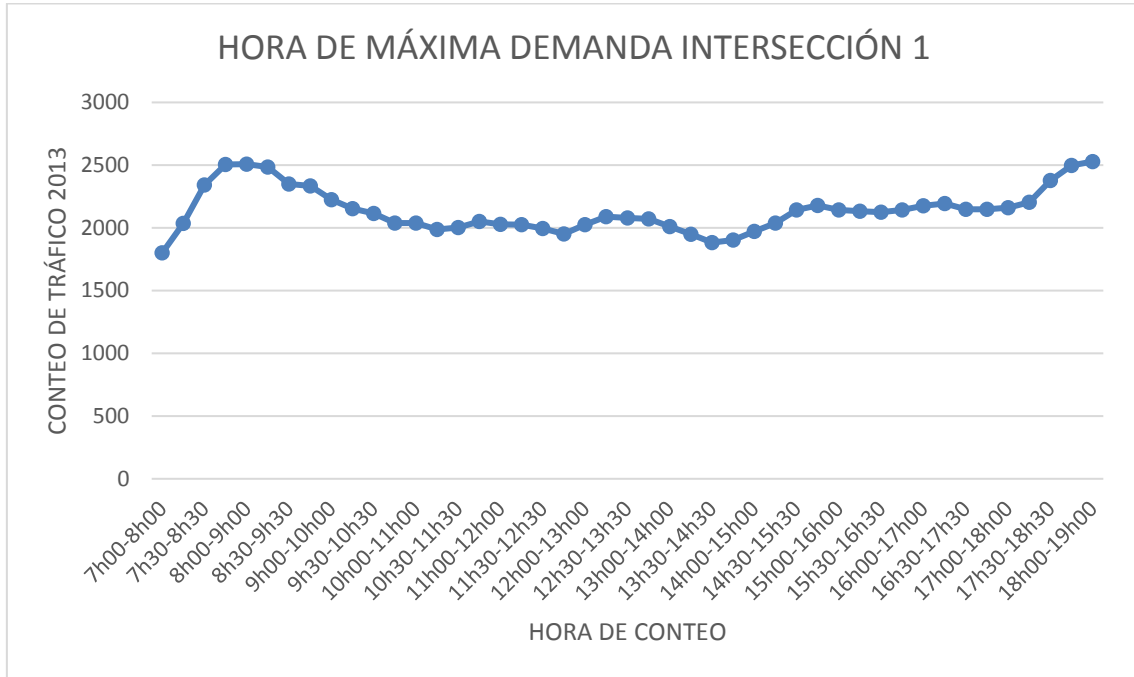


Figura 5-6: Hora de Máxima Demanda Intersección 1

Así como el tráfico horario posee variaciones a lo largo del día, el flujo horario también posee variaciones dentro de la hora. Para considerar esta variación, es necesario utilizar el Factor de Hora de Máxima Demanda (FHMD), el cual viene dado por la ecuación 22.

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(Q_{m\acute{a}x})} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

FHMD: Factor en la Hora de máxima Demanda.

VHMD: Volumen en la hora de máxima demanda.

N: Número de periodos durante la hora de máxima demanda.

$Q_{m\acute{a}x}$ : Volumen máximo.

El resultado del FHMD para la intersección 1 es de 0.93.

Finalmente es necesario expresar el tráfico del año 2017, en función de los vehículos equivalentes; los factores utilizados son los presentados en la Tabla 5-3 en donde se diferencia por el tipo de vehículo y por la pendiente a la que circula. Los valores para cada flujo expresados en vehículos equivalentes para la hora de máxima demanda se presentan en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 1

| VEHÍCULOS EQUIVALENTES EN LA HORA DE MÁXIMA DEMANDA |     |          |     |          |     |
|---|-----|----------|-----|----------|-----|
| ACCESO 1  |     | ACCESO 2 |     | ACCESO 3 |     |
| Flujo 1   | 516 | Flujo 4  | 390 | Flujo 7  | 366 |
| Flujo 2   | 523 | Flujo 5  | 634 | Flujo 8  | 623 |
| Flujo 3   | 6   | Flujo 6  | 24  | Flujo 9  | 4   |

## 5.2 ESTUDIO DE INTERSECCIÓN 2

### 5.2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS INTERSECCIÓN 2

La intersección 2 se encuentra formada por la unión de la Av. Unidad Nacional y Av. Remigio Crespo de jerarquía arterial y colectora respectivamente. Esta intersección posee cuatro ramales de aproximación y se encuentra tipificada como una rotonda múltiple con dos carriles en todas sus aproximaciones y dentro del anillo de circulación. En la Figura 5-7 se presenta una imagen satelital de la Intersección 2, esta se encuentra ubicada en coordenadas UTM WGS84 Z17S 720.111E y 9'679.500N.

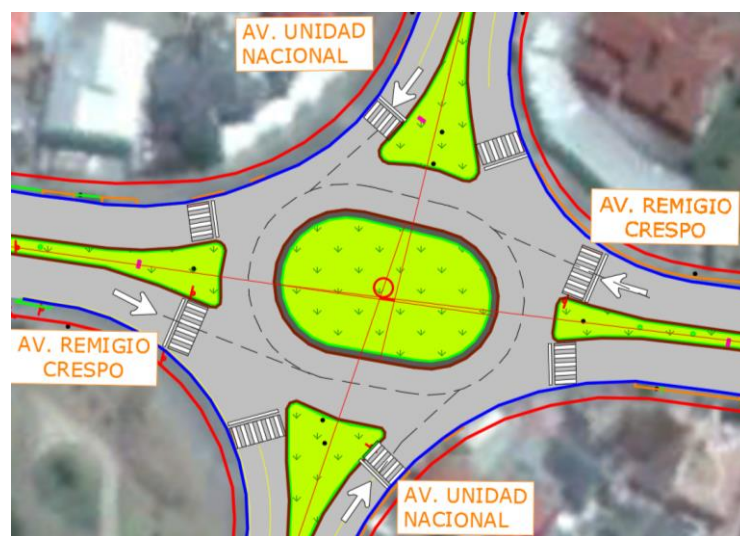


Figura 5-7: Ubicación Intersección 2

La intersección 2 se encuentra emplazada en un terreno de características planas, en donde sus cuatro accesos poseen pendientes cercanas a 0%; esta intersección posee un anillo de circulación en forma de óvalo, lo que genera que en las aproximaciones de la Av. Remigio Crespo tenga ángulos de entrada grandes que aumenta la velocidad en la entrada.

## 5.2.2 CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO

### INTERSECCIÓN 2

Esta intersección es importante, ya que se encuentra cerca del mercado conocido como “El Arenal”, así como de zonas de comercio, barrios residenciales, equipamientos urbanos, discotecas, etc. Por esta intersección pasan actualmente 8 de las 29 líneas de buses urbanos que dispone la Ciudad, las cuales se describen en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10: Buses en Intersección 2

| LÍNEA | RUTA               | TRAYECTO |
|-------|--------------------|----------|
| 2     | TOTORACOCHA        | Retorno  |
| 3     | SAYAUSI (EL LIRIO) | Ida      |
| 3     | EUCALIPTOS         | Retorno  |
| 13    | TEJAR              | Ida      |
| 13    | UCUBAMBA           | RETORNO  |
| 14    | FERIA LIBRE        | IDA      |
| 14    | EL VALLE           | RETORNO  |
| 16    | SAN PEDRO          |          |
| 16    | MONAY              | IDA      |
| 17    | PUNTACORRAL        | RETORNO  |
| 17    | TODOS SANTOS       | IDA      |
| 18    | ZONA FRANCA        | IDA      |
| 18    | AEROPUERTO         | RETORNO  |
| 27    | SININCAY           | RETORNO  |
| 27    | HUIZHIL            | IDA      |
| 29    | HOSPITAL DEL IESS  |          |
| 29    | BALZAY             |          |

La intersección 2 al poseer 4 accesos, permite realizar por cada uno de ellos 4 movimientos, por lo que el total de flujos de tráfico para la intersección es 16, en la Figura 5-8 se presenta una descripción de cada flujo.

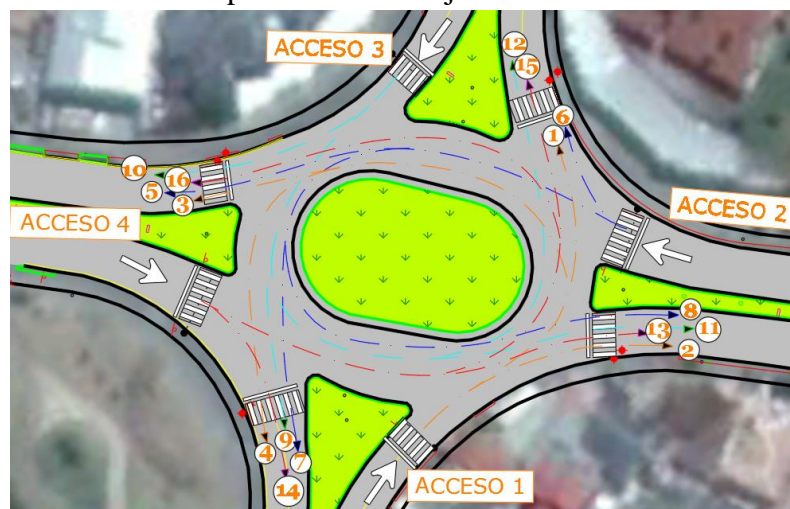


Figura 5-8: Movimientos de la Intersección 2

El total del conteo levantado en el año 2013 para toda la intersección 2 se presenta en la Tabla 5-11.

Tabla 5-11: Total Conteo 2013 en Intersección 2

| TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) TODAS LAS ENTRADAS |          |       |       |       |       |         |       |               |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|---------------|
|  | LIVIANOS | BUSES | CL    | CM    | CP    | TRAILER | MOTOS | TOTAL         |
| <b>TOTAL</b>                                     | 33155    | 1522  | 421   | 405   | 111   | 8       | 850   | <b>36472</b>  |
| <b>PORCENTAJE</b>                                | 90.91%   | 4.17% | 1.15% | 1.11% | 0.30% | 0.02%   | 2.33% | <b>100.0%</b> |

Al igual que lo expuesto en la Intersección 1, se ha utilizado la ecuación 21 para el cálculo del TPDA. El valor de los diferentes factores para la Intersección 2 se ha obtenido de la consultoría del GAD [47], el cual se muestra a continuación en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12: Factor de expansión Intersección 2

|            |             |
|------------|-------------|
| Fh_Mar_Jul | 1.28        |
| Fd_Mar_Jul | 0.96        |
| Fs_Mar_Jul | 1.00        |
| Fm_Mar_Jul | 0.97        |
| Fe_Mar_Jul | <b>1.20</b> |

Los resultados del TPDA para el 2013 para la intersección 2 se presenta en la Tabla 5-13, en donde se han colocado los resultados totales pertenecientes a cada acceso a la intersección, estos valores se encuentran clasificados por el tipo de vehículo.

Para obtener el tráfico en el año 2017, se realizará las proyecciones del mismo, basados en las tasas de crecimientos presentadas en el Tabla 5-5. Los resultados de la proyección para la Intersección 2 para el Año 2017 se presentan en la Tabla 5-14.

Al igual que para la Intersección 1, el porcentaje de tipo de vehículos se mantiene constante con un 92% de livianos, un 4% de buses, un 1.1% de camiones livianos y medianos, un 0.3% de camiones pesados, un 0.01% de trailers y un 2.3% de motos (Ver Figura 5-9).

Tabla 5-13: TPDA 2013 Intersección 2

| <b>TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 1: ENTRADA</b> |                 |              |           |           |           |                |              |              |
|--|-----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|--------------|
|  | <b>LIVIANOS</b> | <b>BUSES</b> | <b>CL</b> | <b>CM</b> | <b>CP</b> | <b>TRAILER</b> | <b>MOTOS</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>TOTAL</b>   | 8441            | 310          | 125       | 109       | 55        | 4              | 242          | <b>9286</b>  |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                             | 1.20            | 1.20         | 1.20      | 1.20      | 1.20      | 1.20           | 1.20         |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                       | 10138           | 372          | 150       | 131       | 66        | 5              | 291          | <b>11153</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                                      | 90.90%          | 3.34%        | 1.34%     | 1.17%     | 0.59%     | 0.04%          | 2.61%        | <b>100%</b>  |
| <b>TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 2: ENTRADA</b> |                 |              |           |           |           |                |              |              |
|  | <b>LIVIANOS</b> | <b>BUSES</b> | <b>CL</b> | <b>CM</b> | <b>CP</b> | <b>TRAILER</b> | <b>MOTOS</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>TOTAL</b>   | 9960            | 402          | 105       | 126       | 17        | 0              | 201          | <b>10811</b> |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                             | 1.20            | 1.20         | 1.20      | 1.20      | 1.20      | 1.20           | 1.20         |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                       | 11962           | 483          | 126       | 151       | 20        | 0              | 241          | <b>12983</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                                      | 107.25%         | 4.33%        | 1.13%     | 1.35%     | 0.18%     | 0.00%          | 2.16%        | <b>116%</b>  |
| <b>TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 3: ENTRADA</b> |                 |              |           |           |           |                |              |              |
|  | <b>LIVIANOS</b> | <b>BUSES</b> | <b>CL</b> | <b>CM</b> | <b>CP</b> | <b>TRAILER</b> | <b>MOTOS</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>TOTAL</b>   | 6951            | 270          | 77        | 88        | 15        | 3              | 186          | <b>7590</b>  |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                             | 1.20            | 1.20         | 1.20      | 1.20      | 1.20      | 1.20           | 1.20         |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                       | 8348            | 324          | 92        | 106       | 18        | 4              | 223          | <b>9115</b>  |
| <b>PORCENTAJE</b>                                      | 74.85%          | 2.91%        | 0.82%     | 0.95%     | 0.16%     | 0.04%          | 2.00%        | <b>82%</b>   |
| <b>TOTAL CONTEO DE 7 A 19 (2013) ACCESO 4: ENTRADA</b> |                 |              |           |           |           |                |              |              |
|  | <b>LIVIANOS</b> | <b>BUSES</b> | <b>CL</b> | <b>CM</b> | <b>CP</b> | <b>TRAILER</b> | <b>MOTOS</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>TOTAL</b>   | 7803            | 540          | 114       | 82        | 24        | 1              | 221          | <b>8785</b>  |
| <b>FACTOR DE EXPANSIÓN</b>                             | 1.20            | 1.20         | 1.20      | 1.20      | 1.20      | 1.20           | 1.20         |              |
| <b>TPDA 2013</b>                                       | 9371            | 649          | 137       | 98        | 29        | 1              | 265          | <b>10550</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                                      | 84.02%          | 5.82%        | 1.23%     | 0.88%     | 0.26%     | 0.01%          | 2.38%        | <b>95%</b>   |

Tabla 5-14: Tráfico proyectado Intersección 2

| <b>TOTAL TPDA 2017 TODAS LAS ENTRADAS</b> |                 |              |           |           |           |                |              |              |
|---|-----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------|--------------|
|   | <b>LIVIANOS</b> | <b>BUSES</b> | <b>CL</b> | <b>CM</b> | <b>CP</b> | <b>TRAILER</b> | <b>MOTOS</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>TOTAL</b>                              | 50232           | 1999         | 602       | 578       | 158       | 12             | 1286         | <b>54867</b> |
| <b>PORCENTAJE</b>                         | 91.6%           | 3.6%         | 1.1%      | 1.1%      | 0.3%      | 0.0%           | 2.3%         |              |



Figura 5-9: Clasificación Vehicular Intersección 2

En la Tabla 5-15 se presenta la cantidad de tráfico expresado para cada movimiento posible en la Intersección 2, con lo cual se puede determinar que todos los accesos aportan de una manera equitativa al tráfico, en donde el Acceso 2, es el que lidera el aporte del tráfico seguido por el Acceso 1, 4 y 3.

Tabla 5-15: Tráfico por cada Flujo Intersección 2

| ACCESO 1                  |               | %           | ACCESO 2 |               | %           | ACCESO 3 |               | %           | ACCESO 4 |               | %           |
|---------------------------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|
| Flujo 1                   | 9086          | 64.98%      | Flujo 5  | 7129          | 43.80%      | Flujo 9  | 7414          | 64.87%      | Flujo 13 | 7857          | 59.61%      |
| Flujo 2                   | 2134          | 15.26%      | Flujo 6  | 4101          | 25.20%      | Flujo 10 | 1081          | 9.46%       | Flujo 14 | 2911          | 22.08%      |
| Flujo 3                   | 2631          | 18.81%      | Flujo 7  | 4590          | 28.20%      | Flujo 11 | 2858          | 25.01%      | Flujo 15 | 2211          | 16.78%      |
| Flujo 4                   | 133           | 0.95%       | Flujo 8  | 456           | 2.80%       | Flujo 12 | 75            | 0.66%       | Flujo 16 | 201           | 1.53%       |
| <b>TOTAL PARCIAL</b>      | <b>13984</b>  | <b>100%</b> |          | <b>16276</b>  | <b>100%</b> |          | <b>11428</b>  | <b>100%</b> |          | <b>13180</b>  | <b>100%</b> |
| <b>PROCENTAJE</b>         | <b>25.49%</b> |             |          | <b>29.66%</b> |             |          | <b>20.83%</b> |             |          | <b>24.02%</b> |             |
| <b>TOTAL INTERSECCIÓN</b> | <b>54868</b>  |             |          |               |             |          |               |             |          |               |             |

De la Tabla 5-15 se puede ver como los movimientos rectos son los que poseen un mayor flujo, situación que se presenta para todos los accesos; para los accesos 1,2 y se observa que existe un mayor flujo que realizan los giros izquierdos en comparación con los derechos, siendo el acceso 3 el que presenta esta diferencia más notoria; en lo que respecta

al acceso 4 predominan los giros a la derecha; los giros en “U” en todas la aproximaciones tiene un porcentaje mínimo de alrededor del 1%, tal como se muestra en la Figura 5-10.

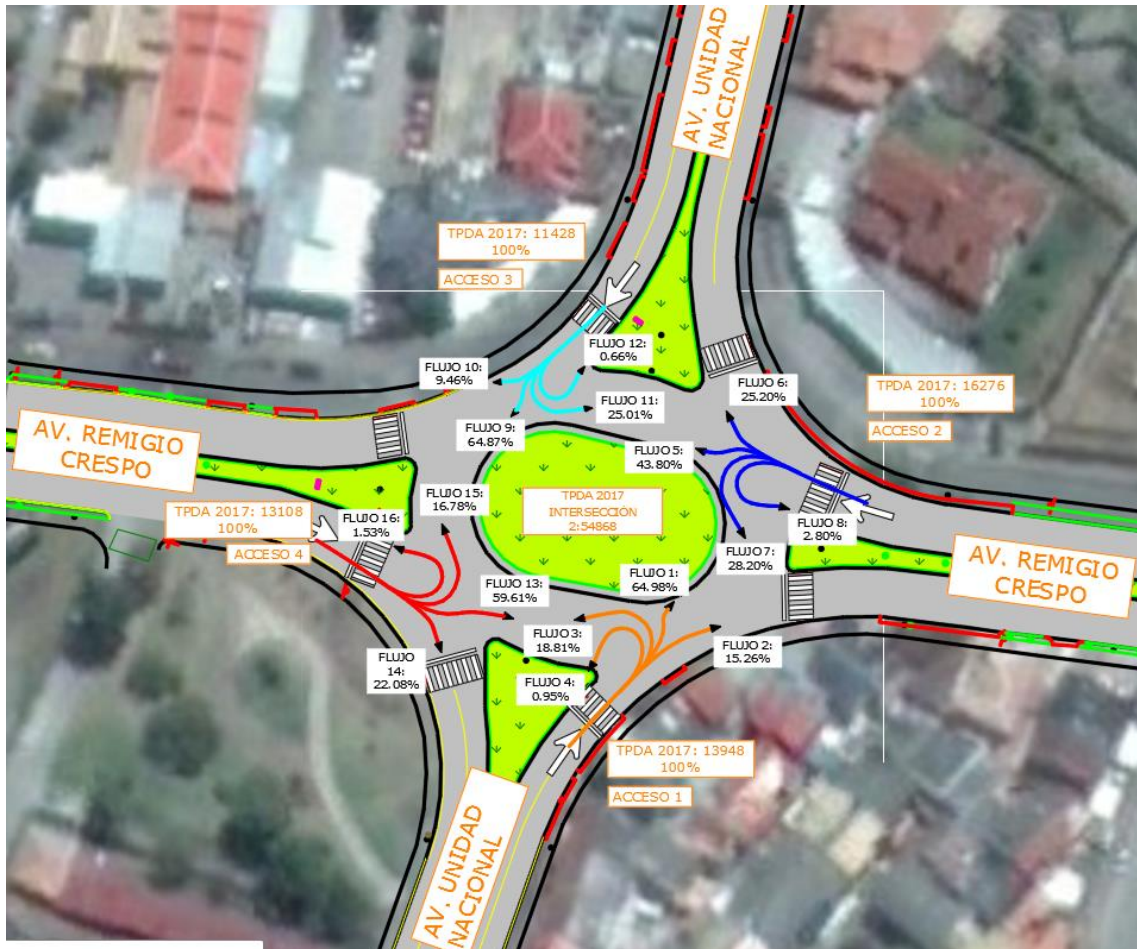


Figura 5-10: TPDA 2017 Intersección 2

El conteo realizado se ejecutó en periodos de 15 minutos, a partir de estos datos es posible encontrar cual es la hora de máxima demanda y cuál es el FHMD, valores que servirán para el cálculo de la capacidad de la intersección. En la Figura 5-11 se muestra un resumen del conteo para el año 2013 diferenciado en cada hora, en donde se ha podido establecer que el periodo entre las 18:00 y 19:00 es el que posee mayor tráfico, con 3782 vehículos contados.

A partir de la hora de máxima demanda, es posible encontrar el FHMD siguiendo la ecuación 22, el cual es de 0.94; también es posible establecer una relación que permita determinar la hora de máxima demanda a partir del tráfico total en el día, el cual se presenta en la Tabla 5-16.

A continuación, se presenta en la Tabla 5-17 el valor de los vehículos equivalentes en la hora de máxima demanda al cual se ha aplicado el FHMD y servirá para el cálculo de la

capacidad, estos valores se encuentran divididos por cada acceso y por cada flujo que representa los movimientos posibles dentro de la Intersección 2.

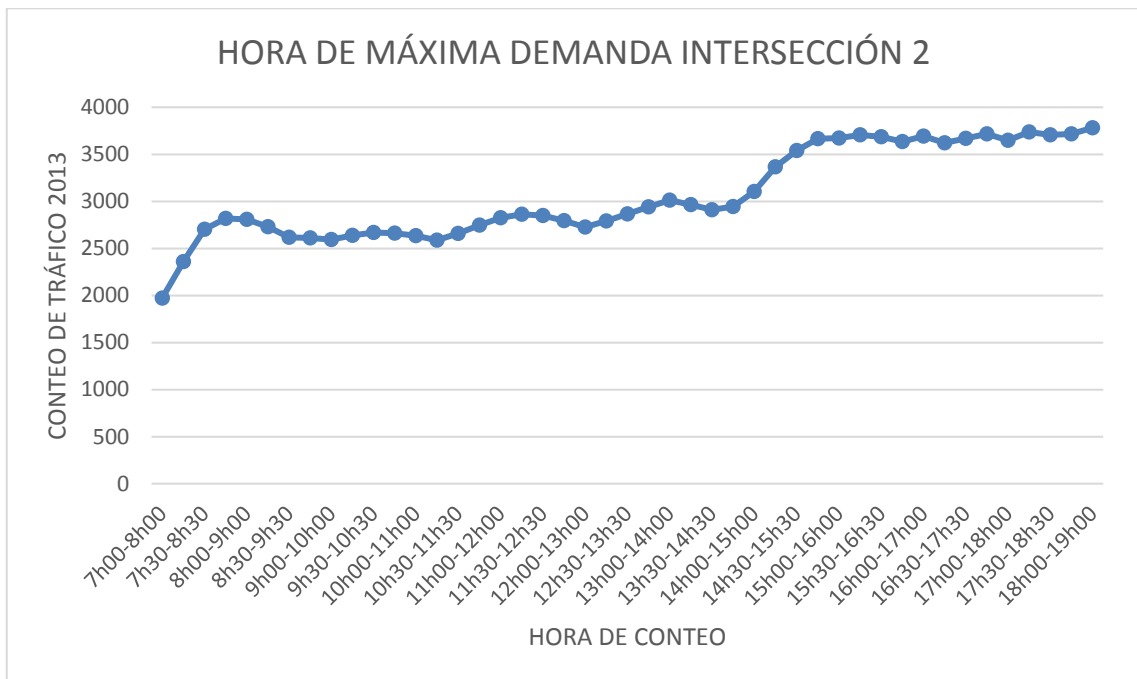


Figura 5-11: Hora de Máxima Demanda Intersección 2

Tabla 5-16: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 2

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| <b>TOTAL CONTEO</b>                 | 36472 |
| <b>FATOR HORARIO</b>                | 1.28  |
| <b>TOTAL DÍA</b>                    | 46822 |
| <b>TOTAL HORA DE MÁXIMA DEMANDA</b> | 3782  |
| <b>FACTOR H.M.D</b>                 | 8.08% |

Tabla 5-17: Relación de Hora de Máxima Demanda Intersección 2

| <b>VEHÍCULOS EQUIVALENTES EN LA HORA DE MÁXIMA DEMANDA</b> |     |                 |     |                 |     |                 |     |
|--|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|-----------------|-----|
| <b>ACCESO 1</b>  |     | <b>ACCESO 2</b> |     | <b>ACCESO 3</b> |     | <b>ACCESO 4</b> |     |
| 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  |

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

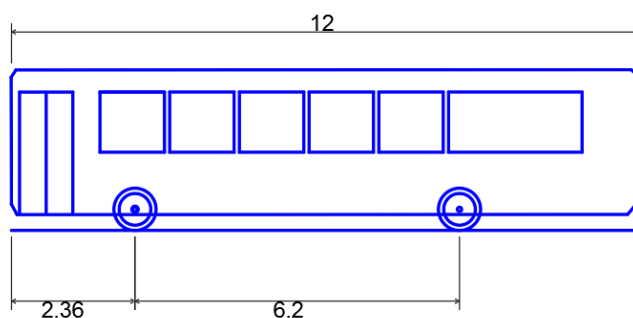
## 6. COMPARACIÓN ENTRE EL ESTADO ACTUAL Y EL PROPUESTO.

Se analizaron 2 escenarios para cada intersección, el primer escenario consistió en el análisis de la situación actual y el segundo escenario conforma la elaboración de un rediseño geométrico a la intersección basado en los parámetros propuestos. 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 [24].

A continuación, en una primera fase se describe la comparación de las características geométricas para todos los escenarios en análisis y en una segunda fase se establece una comparación de la capacidad vial y niveles de servicio de los escenarios.

### 6.1 COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Para la comparación de las características geométricas, se han utilizado como base los parámetros recomendados en el capítulo 3. Debido a que la zona de estudio se encuentra dentro de un área urbana consolidada, se ha considerado como vehículo de diseño a un bus urbano, con una longitud de 12 metros, a continuación en la Figura 6-1 se muestra las características geométricas del vehículo.



TIPO DE VEHÍCULO: Autobus

|                        |         |
|------------------------|---------|
| Longitud Total         | 12.00 m |
| Ancho Total            | 2.55 m  |
| Ancho total del Cuerpo | 3.07 m  |

Figura 6-1: Características del Vehículo de Diseño

La velocidad de diseño con la que circulará el vehículo dentro de la intersección es de 15 km/hora. En base a la velocidad, es posible determinar la trayectoria que tendrá este al realizar los movimientos de giro. En la Figura 6-2 se presenta el recorrido de giro a 180° del vehículo de diseño, el cual genera diferentes radios.

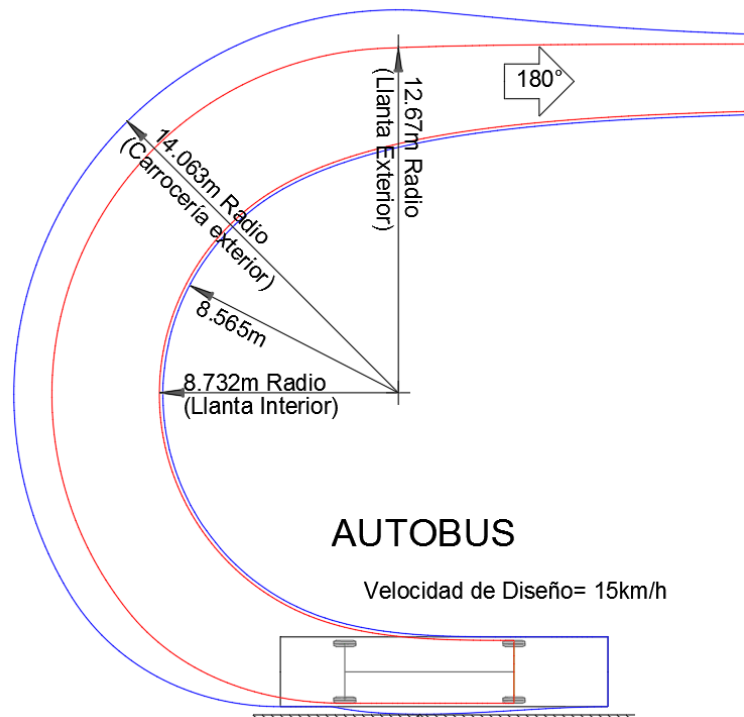


Figura 6-2: Trayectoria del vehículo de diseño con giro a 180°

Con el fin de poder cuantificar de mejor manera las características geométricas de los diferentes escenarios, se estableció un criterio de ponderación agrupado en las 5 categorías restantes a comparar que son: anillo de circulación, zona de entrada, zona de salida, distancia de visibilidad, otros parámetros; con esto es posible obtener un número que represente de manera cuantitativa las características geométricas de cada escenario.

Para generar esta ponderación se colocaron pesos a cada parámetro de diseño, asigna un valor alto a los parámetros que influyen en la velocidad de circulación.

En la Tabla 6-1 se presenta los pesos asumidos para el anillo de circulación, en donde se ha generado una mayor ponderación a los parámetros que generan una configuración adecuada de la rotonda que garantice una disminución de la velocidad de circulación dentro del anillo.

Tabla 6-1: Valores de ponderación en el Anillo de Circulación

| ANILLO DE CIRCULACIÓN                   |  |                 |             |           |   |
|---|--|-----------------|-------------|-----------|---|
| PARÁMETROS                              | MANUAL ECUATORIANO   | PESOS ASIGNADOS |             |           |   |
|   |  | CUMPLE          | SE APROXIMA | NO CUMPLE |   |
| Posicionamiento de la isla central      | <i>Condición 1: El centro de la isla central debe estar en el polígono formado por los ejes de ramales</i> | 6               | 3           | 0         |   |
|   | <i>Condición 2: Los ramales pueden estar desfasados a la izquierda del centro de la isla central</i>       | 6               | 3           | 0         |   |
| Distancia entre ramales de aproximación | <i>Condición 1: El ángulo entre los ramales debe ser cercano a 90°, máx. 105°</i>                          | 6               | 3           | 0         |   |
| Número de carriles                      | $\geq$ al número máximo de carriles en la entrada  | 2               | 1           | 0         |   |
| Ancho de carriles                       | <i>El ancho de los carriles debe garantizar los movimientos asociados al vehículo de diseño.</i>           | 6               | 3           | 0         |   |
| Diámetro del círculo inscrito           | <i>Número de carriles circulación</i>  |                 |             |           |   |
|   |  | (m)             |             |           |   |
|   | 2  | 40-50           | 6           | 3         | 0 |
| Radio de la isla central                | $> 4m$   | 6               | 3           | 0         |   |

En la zona de entrada considerada como la de mayor incidencia en la generación de accidentes, se estableció una mayor ponderación a los parámetros de ángulo de entrada y radio de entrada, ya que los mismos se encuentran directamente relacionados con la disminución de la velocidad. En la Tabla 6-2 se muestra los valores de ponderación considerados en esta zona.

Tabla 6-2: Valores de ponderación en la Entrada

| ENTRADA                            |  |                 |             |           |   |
|------------------------------------|--|-----------------|-------------|-----------|---|
| PARÁMETROS                         | MANUAL ECUATORIANO   | PESOS ASIGNADOS |             |           |   |
|                                    |  | CUMPLE          | SE APROXIMA | NO CUMPLE |   |
| Número de carriles de aproximación | <i>1 para rotondas simples y 2 o más para múltiples rotondas, dependiendo de la demanda de tráfico</i> | 2               | 1           | 0         |   |
| Número de carriles en la entrada   | <i>Si es necesario aumentar la capacidad se recomienda incrementar un carril en la entrada</i>         | 2               | 1           | 0         |   |
| Ancho total de entrada             | <i># de carriles circulación</i>   |                 |             |           |   |
|                                    |  | (m)             |             |           |   |
|                                    | 2  | 7.3-9.1         | 6           | 3         | 0 |
| Ancho por carril de aproximación   | $> 2.5 m$  | 2               | 1           | 0         |   |
| Longitud de Cola                   | $> 5 m$  | 2               | 1           | 0         |   |
| Ángulo de entrada                  | <i>Condición recomendable: 20-60°</i>  | 6               | 3           | 0         |   |
| Radio de entrada                   | <i>rotonda simple 15-30m, rotonda doble <math>&gt; 20m</math> Y <math>&lt; 100m</math></i>             | 6               | 3           | 0         |   |
| Velocidad a la entrada             | <i># de carriles circulación</i>   |                 |             |           |   |
|                                    |  | (km/h)          |             |           |   |
|                                    | múltiples  | 40-48           | 2           | 1         | 0 |

Según lo analizado previamente, se ha visto que los parámetros de salida no son influyentes en la generación de accidentes, es por ello que las ponderaciones poseen valores máximos de 2, como se muestra en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: Valores de ponderación en la Salida

| SALIDA                |  |  |                 |             |           |
|-----------------------|--|--|-----------------|-------------|-----------|
| PARÁMETROS            | MANUAL ECUATORIANO   |  | PESOS ASIGNADOS |             |           |
|                       |  |  | CUMPLE          | SE APROXIMA | NO CUMPLE |
| Número de carriles    | <i>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 tape la intersección</i> |  | 2               | 1           | 0         |
| Ancho total de salida | <i>Número de carriles circulación</i>  | <i>(m)</i>                             |                 |             |           |
|                       | 2  | <i>&gt; 8, recomendado entre 10-11</i> | 2               | 1           | 0         |
| Radio de salida       | <i>&gt; 20 m, &lt; 100m</i>  |  | 2               | 1           | 0         |

El cumplimiento de las distancias de visibilidad en toda la intersección es fundamental para el correcto desempeño de las rotondas, este parámetro es capaz de garantizar la acción de frenado frente a objetos o personas, por lo que se vuelve fundamental para la seguridad. Se ha colocado como valor de ponderación máximo a 6 en todos los parámetros de análisis (ver Tabla6-4).

Tabla 6-4: Valores de ponderación de Visibilidad

| VISIBILIDAD  |   |               |                 |             |           |
|--|---|---------------|-----------------|-------------|-----------|
| PARÁMETROS   | MANUAL ECUATORIANO  |               | PESOS ASIGNADOS |             |           |
|  |   |               | CUMPLE          | SE APROXIMA | NO CUMPLE |
| Distancia de parada en la aproximación                         | <i>Velocidad de Tráfico (km/h)</i>  | <i>Dp (m)</i> |                 |             |           |
|  | 40  | 40            | 6               | 3           | 0         |
| Distancia de Parada en el carril de circulación                | <i>Diámetro del círculo Inscrito (m)</i>                                    | <i>a (m)</i>  |                 |             |           |
|  | 40-60   | 40            | 6               | 3           | 0         |
| Distancia de parada en zonas peatonales en la entrada y salida | <i>Mismos valores de la distancia de parada en la aproximación</i>          |               | 6               | 3           | 0         |
| Distancia de visibilidad para el ingreso de los vehículos      | <i>Mismos valores de la distancia de parada en el carril de circulación</i> |               | 6               | 3           | 0         |

Finalmente, en la categoría de otros factores, se encuentra uno de los parámetros fundamentales para la seguridad, que es el cumplimiento del CCV, se ha considerado a este parámetro como el más importante a cumplir y por ende es el que posee un valor mayor de ponderación, asumiendo un valor de 10 en caso del cumplimiento correcto, un valor de 5 cuando la rotonda está muy próxima a cumplir el criterio y 0 en la situación en donde no se cumple. En la Tabla 6-5 se muestra los valores de ponderación establecidos para la categoría de Otros Factores.

Tabla 6-5: Valores de ponderación para Otros Factores

| OTROS FACTORES              |   |                 |             |           |
|-----------------------------|---|-----------------|-------------|-----------|
| PARÁMETROS                  | MANUAL ECUATORIANO  | PESOS ASIGNADOS |             |           |
|                             |   | CUMPLE          | SE APROXIMA | NO CUMPLE |
| Consistencia de velocidades | <i>La máxima diferencia de velocidades entre las trayectorias libres de los vehículos deber ser de máximo 25 km/h</i> | 10              | 5           | 0         |
| Bermas                      | <i>Máx 1 m, pudiendo ser suprimidas</i>   | 2               | 1           | 0         |
| Inclinación Longitudinal    | <i>Se recomienda que no exceda el 6%, pero puede llegar a ser mayor al 10%</i>  | 2               | 1           | 0         |
| Peralte                     | <i>(+)-2-2.5%</i>   | 2               | 1           | 0         |
| Isla Separadora             | <i>Longitud &gt; (DCI/2) o a 15m</i>  | 2               | 1           | 0         |
|                             | <i>Ancho inicial &gt; DCI/8 o a 2.5m</i>  | 2               | 1           | 0         |
|                             | <i>Ancho en zona de paso peatonal &gt; 1.2 m</i>  | 2               | 1           | 0         |

### 6.1.1 COMPARACIÓN GEOMÉTRICA INTERSECCIÓN 1

A partir de los valores de ponderación establecidos y con la ayuda del levantamiento planimétrico existente, se ha realizado un análisis de las características geométricas de la intersección 1 en su estado actual. En el Anexo 1, se presentan los planos resultantes de la evaluación geométrica, en el primer plano del anexo se presenta la planta de la intersección 1 en el estado actual en donde se puede observar cómo se encuentra la implantación de la isla central respecto a los ejes de los ramales adyacentes. En un segundo plano se presenta todos los acotamientos geométricos posibles, para lo cual se han efectuado detalles de sus islas separadoras. Para los planos del 3-5 de este anexo se ha realizado con la ayuda del programa Vehicle Tracking, el recorrido del vehículo de diseño sobre la intersección determinando así, si el ancho de calzada tanto en las entradas, salidas y el anillo de circulación, es capaz de garantizar todos los movimientos posibles. Los planos 6-8 se muestra el recorrido de los vehículos siguiendo las recomendaciones propuestas en el CCV, con lo cual ha sido posible determinar la diferencia de velocidades entre todos los movimientos posibles de la intersección, con esto se ha podido obtener los datos para determinar si esta cumple o no con este criterio. En el Anexo 2 se han colocado los valores obtenidos de cada parámetro geométrico para la intersección 1 en su estado actual.

Posteriormente se ha realizado el rediseño geométrico de la Intersección 1, el cual tiene como objetivo primordial, utilizar como base de diseño los parámetros geométricos propuestos, con la finalidad de aumentar la seguridad en la intersección. Este rediseño lo que busca a la vez es utilizar el mismo espacio físico que ocupa la situación actual, con la finalidad de evitar afecciones a viviendas aledañas a la zona de estudio. Los planos resultantes del rediseño geométrico, se presentan en el Anexo 3, en donde al igual que para la intersección en el estado actual, en el primer plano se muestra una vista en planta de la intersección rediseñada y la ubicación de la isla central. En un segundo plano están todas las acotaciones geométricas y los detalles respectivos. Los planos del 3-5 contienen la comprobación del ancho de carriles en función de los movimientos del vehículo de

diseño y en los planos 6-8 se muestra el análisis del CCV. En el Anexo 4, se presenta todos los valores geométricos obtenidos del escenario propuesto de la intersección 1.

Un resumen de los valores de la ponderación obtenidos del análisis geométrico de la intersección 1 para la situación actual y propuesta, se muestra en la Tabla 6-6.

*Tabla 6-6: Análisis Geométrico de la Intersección 1*

| <b>VALOR DE LA PONDERACIÓN</b> |                      |                         |              |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|
| <b>ZONA EN ANÁLISIS</b>        | <b>ESTADO ACTUAL</b> | <b>ESTADO PROPUESTO</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>ANILLO DE CIRCULACIÓN</b>   | 38                   | 35                      | 38           |
| <b>ENTRADA</b>                 | 48                   | 72                      | 72           |
| <b>SALIDA</b>                  | 11                   | 16                      | 18           |
| <b>VISIBILIDAD</b>             | 30                   | 60                      | 60           |
| <b>OTROS FACTORES</b>          | 30                   | 66                      | 66           |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>157</b>           | <b>249</b>              | <b>254</b>   |

A partir de la Tabla 6-6, se determina una clara diferencia del estado geométrico entre los dos escenarios en análisis, se puede ver como el estado actual cumple solo con aproximadamente el 62% de todos los valores de ponderación establecidos, en donde la categoría de otros factores solamente cumple con el 45% de los valores de ponderación. En el Anexo 2 se determina que dentro de esta categoría, el valor más influyente es el parámetro que analiza el CCV el cual no se cumple para la situación actual.

Es necesario recalcar que en todas las categorías de análisis, la situación actual posee un déficit significativo. Analizando la categoría de entrada a la intersección, se puede ver como cumple solo en un 67% de los valores de ponderación, en donde en la mayoría de las entradas no se cumple el radio y el ángulo de entrada. En general el estado actual no cumple con el correcto posicionamiento de su anillo de circulación. Mediante los planos 3-5 del Anexo 1, se ha determinado que el ancho establecido de los carriles no garantiza los movimientos del vehículo de diseño. En lo que respecta a la categoría de visibilidad, actualmente la intersección no garantiza una correcta visibilidad, especialmente la distancia de aproximación a la intersección y la distancia de visibilidad en las zonas peatonales.

En el estado propuesto o de rediseño, se cumple con el 94% de los valores de ponderación, además se puede observar en los planos respectivos, como la situación propuesta ocupa un espacio físico similar al de la situación actual, por lo una posible intervención para el mejoramiento geométrico de esta intersección no se encuentra limitada por el costo de indemnización de viviendas o edificaciones aledañas a la zona de estudio. En la Figura 6-3, se muestra un resumen de las categorías geométricas establecidas en valores de porcentajes.

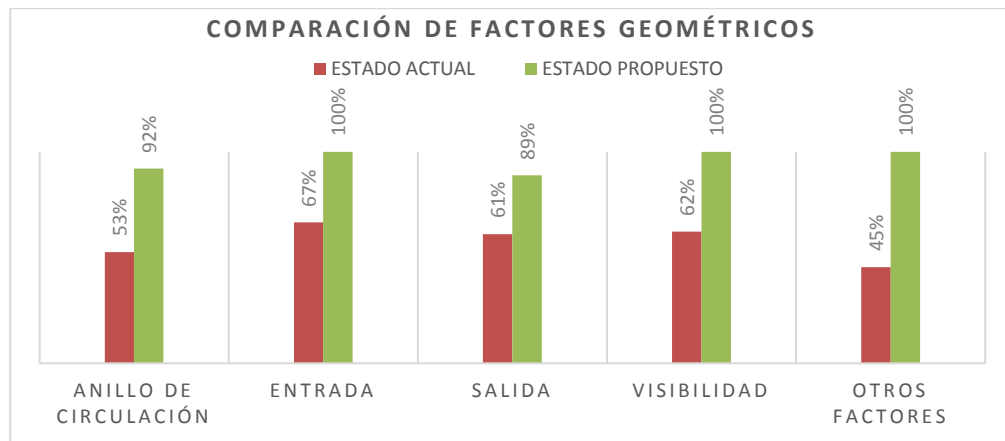


Figura 6-3: Comparación de Intersección 1 expresada en porcentajes

Luego del análisis geométrico de los dos escenarios para la intersección 1, se puede concluir que en la situación actual, evidentemente no rige ninguna norma geométrica, lo que causa que se produzcan velocidades de circulación altas y a la vez genera un riesgo al usuario que transita por la intersección, así como se puede ver como en el momento en que se produzca un choque, este debido a que las velocidades de circulación son elevadas, generará mayores consecuencias y daños. También mediante los planos establecidos para cada situación, se puede identificar como con pequeñas reformas geométricas, es posible aumentar significativamente el cumplimiento de los parámetros geométricos propuestos.

## 6.1.2 COMPARACIÓN GEOMÉTRICA INTERSECCIÓN 2

Siguiendo la misma metodología para la comparación geométrica de la Intersección 1, en el Anexo 5, se presentan los planos necesarios para obtener los parámetros geométricos de la situación actual de la Intersección 2. En un primer plano se presenta una vista en planta y la ubicación de su isla central. En el segundo plano se muestran las acotaciones geométricas de la intersección. En los planos 3-6 se realiza el análisis del ancho de carril, en donde se muestra las trayectorias del vehículo de diseño. En los planos 7-10 se verifica el cumplimiento del criterio de consistencia de velocidades; adicionalmente en el Anexo 6 se muestra los valores de cada parámetro geométrico de la situación actual de la intersección en análisis.

Luego de elaborado el rediseño geométrico, en el Anexo 7 se encuentran los planos con las reformas geométricas propuestas, estableciéndose de igual manera el primer plano la planta y ubicación de la isla central, en el segundo las acotaciones, del 3-6 las trayectorias de los vehículos de diseño y del 7-10 la comprobación del CCV, el resultado de esta evaluación geométrica agrupada por las categorías de análisis se presenta en el Tabla 6-7. En el Anexo 8 se presentan los valores de cada parámetro geométrico de la situación propuesta.

Tabla 6-7: Análisis Geométrico de la Intersección 2

| <b>VALOR DE LA PONDERACIÓN</b> |                      |                         |              |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|
| <b>ZONA EN ANÁLISIS</b>        | <b>ESTADO ACTUAL</b> | <b>ESTADO PROPUESTO</b> | <b>TOTAL</b> |
| <b>ANILLO DE CIRCULACIÓN</b>   | 26                   | 38                      | 38           |
| <b>ENTRADA</b>                 | 57                   | 96                      | 96           |
| <b>SALIDA</b>                  | 18                   | 19                      | 24           |
| <b>VISIBILIDAD</b>             | 36                   | 78                      | 78           |
| <b>OTROS FACTORES</b>          | 58                   | 88                      | 88           |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>195</b>           | <b>319</b>              | <b>324</b>   |

Al igual que en la intersección 1, se puede ver una marcada diferencia de las características geométricas para los dos escenarios, en donde se observa que el estado actual cumple solo con el 60% de los parámetros recomendados. Como se observó en la Figura 5-7 en la situación actual la intersección posee un anillo de circulación de forma ovalada. Analizando las categorías que poseen menos cumplimiento, se observa que la visibilidad es la que muestra una diferencia significativa, esto se debe a que por las características geométricas, no se cumple una correcta distancia de parada en la aproximación y en zonas peatonales. También es importante mencionar que debido a que actualmente dentro del anillo de circulación, se presenta un montículo elevado el cual sirve de base del monumento colocado en el centro de la intersección, este dificulta drásticamente la distancia de visibilidad dentro de anillo de circulación. En lo que respecta a la entrada, se ha visto que al ser una intersección formada por ramales a 90 grados, se encuentra en la mayoría de las entradas cumpliendo los parámetros fundamentales que son el radio y el ángulo de entrada. En los planos 3-6 del Anexo 5, se puede ver como la intersección en el estado actual permite la correcta circulación del vehículo de diseño mientras que en los planos 7-10 se ve que ese escenario incumple el criterio de consistencia de velocidades.

Observando las características geométricas del rediseño y observando el plano en planta, se puede determinar la mejora sustancial de las características geométricas, cumpliendo casi en su totalidad con todos los parámetros recomendados. Al analizar el plano 1 del Anexo 7, se ve como el rediseño geométrico incluso disminuye el área de ocupación de la intersección, con lo cual es posible realizar una reforma geométrica sin afectar o realizar indemnizaciones en las edificaciones aledañas. Este escenario propuesto también garantiza que se puedan ejecutar todos los movimientos posibles por el vehículo de diseño y especialmente genera el cumplimiento del CCV. Se puede concluir que realizar estos cambios marcará una mejora geométrica sustancial y con esto una disminución de los accidentes y la severidad de los mismos. En la Figura 6-4, se presenta un resumen de la comparación de los parámetros geométricos presentados en porcentajes.

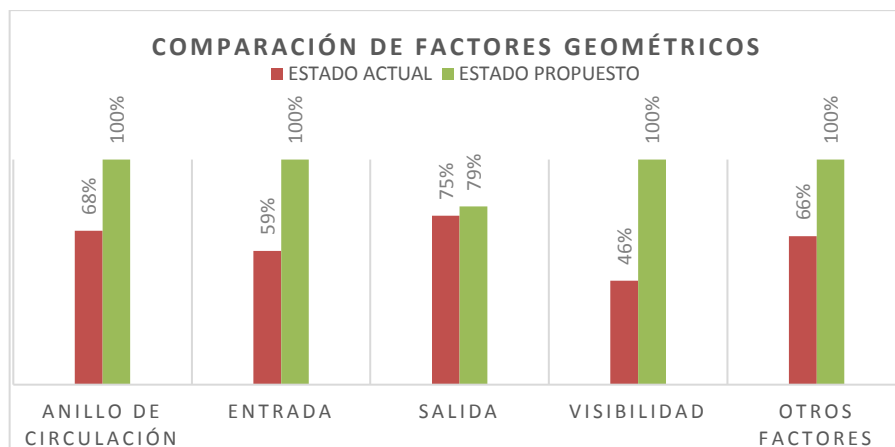


Figura 6-4: Comparación de Intersección 1 expresada en porcentajes

## 6.2 COMPARACIÓN DE CAPACIDAD

Para el cálculo de la capacidad de los dos escenarios establecidos para cada intersección, se ha utilizado la metodología TRL recomendada en el capítulo 2; ya que dentro de sus fórmulas de cálculo utilizan datos del flujo vehicular y de parámetros geométricos como: el ancho de la aproximación a la intersección, el DCI, el ancho efectivo en la entrada y el ángulo de entrada; con lo cual es posible reflejar la influencia que tienen los parámetros geométricos en la capacidad de la intersección. La capacidad vial de una intersección tipo rotonda es calculada en función de la capacidad individual de cada uno de los accesos a la intersección, es por ello que se ha realizado la comparación en cada ramal de aproximación.

A parte de la capacidad de cada aproximación, es necesario comprobar la calidad de operación vehicular que tiene la intersección, por lo que también se realiza una comparación del nivel de servicio de las rotondas para cada escenario de análisis. El nivel de servicio es “una medida cualitativa que describe las condiciones de operación del flujo vehicular, y de su percepción por los motoristas y pasajeros” [19]; para el cálculo del nivel de servicio, se ha utilizado la metodología propuesta por la HCM [24], en donde para situaciones de flujos discontinuos en intersecciones tipo rotondas, se evalúa el nivel de servicio en base a la demora que tienen los vehículos para ingresar al anillo de circulación expresada en s/veh. En la Tabla 6-8 se presenta la relación entre la demora y el nivel de servicio, presentados en el HCM.

Tabla 6-8: Nivel de servicio en función de la relación v/c

| 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       |

Las 2 intersecciones en análisis en su estado actual poseen características geométricas que no cumplen los parámetros recomendados, generando así un alto riesgo de accidentes. Se vuelve fundamental la comparación de la capacidad y del nivel de servicio entre el estado actual y el estado propuesto, ya que si las intersecciones en estado actual poseen mayores capacidades y niveles de servicio que la intersección en estado propuesto, los parámetros recomendados será difíciles de implementar, porque esto generará un rechazo directo de los usuarios; pero en el caso de que en la situación propuesta se mejore o mantenga una capacidad y niveles de servicio, con lo parámetros geométricos recomendados se estará generando rotondas más seguras y eficientes en su calidad de operación, con esto podrán ser implementadas de manera inmediata en Cuenca y en todo el país.

## 6.2.1 COMPARACIÓN DE CAPACIDAD PARA LA INTERSECCIÓN 1

El detalle del cálculo de la capacidad para la situación actual de la intersección 1 se presenta en el Anexo 9, mientras que el detalle del cálculo para la intersección 2 se presenta en el Anexo 10; un resumen de la capacidad por accesos se muestra en la Tabla 6-8, en donde globalmente la intersección 1 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, se presume que este aumento se debe principalmente a una ampliación en el ancho de la entrada para la situación propuesta.

*Tabla 6-9: Comparación de la capacidad Intersección 1*

| <b>CAPACIDAD</b> |                                 |                                    |
|------------------|---------------------------------|------------------------------------|
|                  | <b>ESTADO ACTUAL</b><br>(veh/h) | <b>ESTADO PROPUESTO</b><br>(veh/h) |
| <b>ACCESO 1</b>  | 1963                            | 2011                               |
| <b>ACCESO 2</b>  | 1576                            | 2239                               |
| <b>ACCESO 3</b>  | 1992                            | 1816                               |
| <b>TOTAL</b>     | <b>5531</b>                     | <b>6066</b>                        |

Para una mejor visualización, en la Figura 6-3 se presenta los valores de la capacidad tanto del estado actual como propuesto diferenciado en cada acceso.

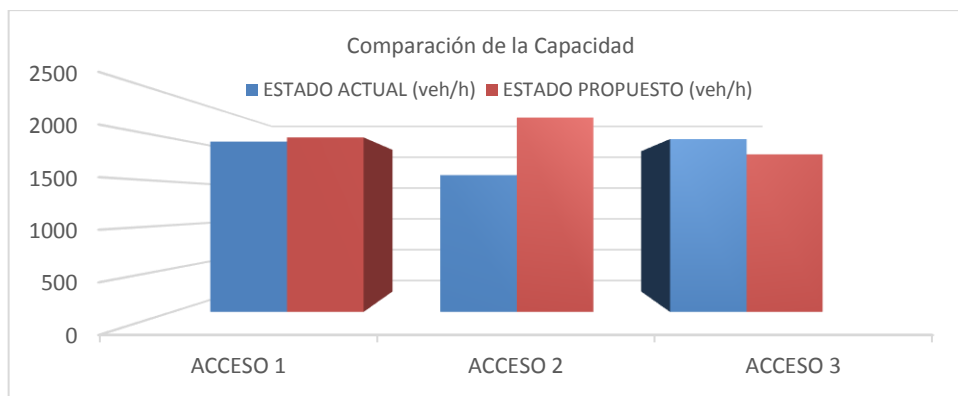


Figura 6-5: Comparación de la Capacidad Intersección 1

A partir del cálculo de la capacidad, es posible encontrar el grado de saturación de cada entrada, calculado por la relación volumen/capacidad. A partir de cálculo de la saturación, 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 6-9 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 mejora 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.

Tabla 6-10: Comparación del nivel de servicio Intersección 1

| REALACIÓN VOLUMEN/CAPACIDAD |             |             | NIVEL DE SERVICIO       |                          |                  |                             |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------|-----------------------------|
|                             | ACTUAL      | PROPUESTA   | DEMORA ACTUAL (seg/veh) | NIVEL DE SERVICIO-ACTUAL | DEMORA PROPUESTA | 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                           |
| <b>PROMEDIO</b>             | <b>0.85</b> | <b>0.51</b> | <b>7.7</b>              | <b>A</b>                 | <b>6.2</b>       | <b>A</b>                    |

Con estos cálculos, se puede concluir que la situación propuesta, brinda una capacidad mayor a la situación actual, lo que está directamente relaciona con una disminución de las demoras en la intersección.

## 6.2.2 COMPARACIÓN DE CAPACIDAD PARA LA INTERSECCIÓN 2

Los datos del cálculo de la capacidad para cada aproximación de la intersección 2 en el estado actual, se encuentran en el Anexo 11; mientras que para la situación propuesta este detalle se encuentra en el Anexo 12. Con estos datos se ha generado un resumen de las capacidades calculadas en los cuatro ramales de aproximación, los cuales se presentan en la Tabla 6-10. En esta tabla se puede observar como la capacidad global entre el estado actual y propuesto están prácticamente iguales, con una diferencia a favor de la situación

propuesta de apenas 133 veh/hora. Analizando cada acceso, 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 principalmente a la configuración geométrica del anillo de circulación, el cual es ovalado, la parte de mayor curvatura se presenta en los accesos 4 y 2 lo que conlleva a que en la situación actual posea un ancho en la entrada mayor y por ende la disminución de la capacidad en comparación en el estado propuesto; en los accesos 1 y 3 se presenta un efecto contrario, ya que debido a la forma ovalada de la isla central, se genera menores anchos de la entrada en la situación actual, produciéndose así un incremento de la capacidad en el estado propuesto, pero como se mencionó inicialmente este incremento o decremento no es significativo en base a la capacidad global.

Tabla 6-11: Comparación de la capacidad Intersección 2

| CAPACIDAD    |                          |                             |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|
|              | ESTADO ACTUAL<br>(veh/h) | ESTADO PROPUESTO<br>(veh/h) |
| ACCESO 1     | 1233                     | 1412                        |
| ACCESO 2     | 1751                     | 1653                        |
| ACCESO 3     | 1046                     | 1324                        |
| ACCESO 4     | 1774                     | 1548                        |
| <b>TOTAL</b> | <b>5804</b>              | <b>5937</b>                 |

Para una mejor visualización, en la Figura 6-4 se presenta los valores de la capacidad tanto del estado actual como propuesto diferenciado en cada acceso.

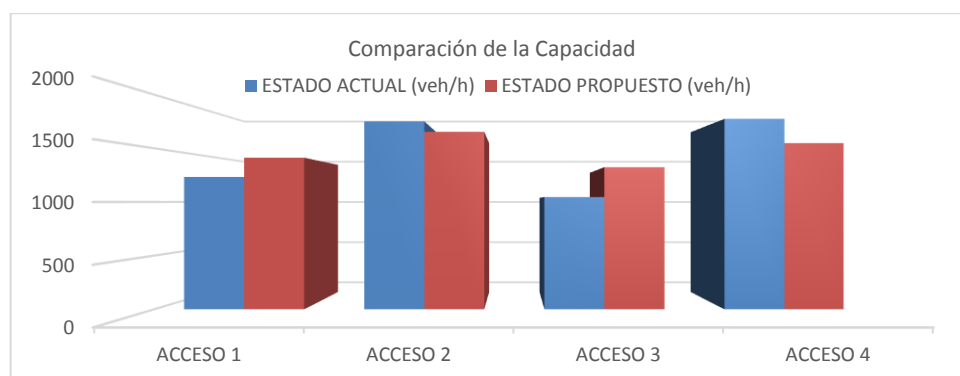


Figura 6-6: Comparación de la Capacidad Intersección 2

Con los datos de la capacidad expuestos en el Tabla 6-8 y con los valores de los flujos vehiculares establecidos en el capítulo 5, se ha calculado el grado de saturación de cada acceso, así como su nivel de servicio, los resultados se muestran en la Tabla 6-11. 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.

*Tabla 6-12: Comparación del nivel de servicio Intersección 2*

| REALIZACIÓN<br>VOLUMEN/CAPACIDAD |             |             | NIVEL DE SERVICIO             |                                 |                     |                                    |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|
|                                  | ACTUAL      | PROPUESTA   | DEMORA<br>ACTUAL<br>(seg/veh) | NIVEL DE<br>SERVICIO-<br>ACTUAL | DEMORA<br>PROPUESTA | NIVEL DE<br>SERVICIO-<br>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                                  |
| <b>PROMEDIO</b>                  | <b>0.85</b> | <b>0.83</b> | <b>43.4</b>                   | <b>E</b>                        | <b>19.0</b>         | <b>C</b>                           |

A partir de los datos expuestos, se puede ver como para la intersección 2 en el estado propuesto presenta una clara mejoría en la calidad de operación, es decir que al implementar esta solución en la intersección no solo mejorará la calidad del comportamiento de tráfico, sino que se verá una mejora sustancial en la seguridad de la misma.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 7. CONCLUSIONES.

---

Basado en la investigación presentada, pueden ser generadas las siguientes conclusiones:

- Las normas vigentes para el diseño geométrico en el Ecuador actualmente utilizan criterios para el diseño y cálculo de la capacidad de las intersecciones tipo rotondas, que han sido descartados a nivel mundial hace aproximadamente 50 años.
- Los factores geométricos se encuentran involucrados en el 60% de los accidentes, especialmente por un exceso del radio de deflexión, radio de entrada, radio de salida, ancho de carril de circulación y ancho de carril de entrada.
- 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.
- Las rotondas son puntos críticos en la ciudad de Cuenca tanto en su nivel de accidentalidad, como en el congestionamiento; por lo que un mal diseño de la misma genera un perjuicio sustancial a los usuarios, reflejándose en un aumento de accidentes y demoras excesivas en los vehículos.
- Al evaluar dos rotondas en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, se observa como actualmente las intersecciones no cumplen con los parámetros geométricos propuestos, lo que causa una velocidad de circulación alta, aumentando así el riesgo de accidentes; también se ha visto que los parámetros geométricos que actualmente poseen las intersecciones en análisis son heterogéneos, generando así que los usuarios no se familiaricen con la conducción en las rotondas y produciendo un rechazo para la implementación de nuevas rotondas en la ciudad.
- En base al análisis anterior se verificó que las dos intersecciones evaluadas actualmente cumplen con el 60% parámetros geométricos propuestos, generando intersecciones heterogéneas.
- En el estado actual de las intersecciones, se observa mediante la ayuda de los planos respectivos que en la situación actual, las intersecciones no garantizan todos los movimientos del vehículo de diseño, lo que se traduce en una disminución de la capacidad.
- 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.

- Al utilizar los parámetros propuestos se generan intersecciones con características homogéneas, las cuales serán de fácil percepción y aceptación por los usuarios.
- 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.
- Se recomienda en futuras investigaciones, generar una comparación entre la capacidad calculada mediante el método TRL y la capacidad real que dispone la intersección tanto en su estado actual como en el estado propuesto.
- Es necesario ampliar esta investigación, de tal manera de poder obtener parámetros de diseño geométrico para todos los tipos de rotondas existentes; de tal forma que se pueda establecer una norma de diseño a nivel nacional.
- Futuras investigaciones en este tema pueden profundizar el estudio de los parámetros propuestos, especialmente en la zona de mayor importancia en la intersección que es la entrada.
- Es importante que las entidades competentes, exijan el cumplimiento de los parámetros geométricos propuestos en los diseños de rotondas, de tal forma que se comiencen a generar 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.

## 8. Bibliografía

---

- [1] N. Garber y L. Hoel, *Traffic and Highway Engineering*, Toronto: Cengage Learning, 2009.
- [2] T. R. Nueman, R. Pfefer, K. L. Slack, K. K. Hardy, D. W. Harwood, I. B. Potts, D. J. Torbic y R. Kohlman, *A Guide for Addressing Unsignalized Intersection Collisions*, Washington DC.: NCHRP Report 500, 2003.
- [3] L. Rodegerdts, J. Bansen, C. Tiesler, J. Knudsen, E. Myers, M. Jhonson, M. Moule, B. Persadu, C. Lyon, S. Hallmark, H. Isebrands, B. Crown, B. Guichet y A. O'Brien, «NCHRP REPORT 672-Roundabout: An Informational Guide,» *Transportation Research Board*, Whashington, D.C., 2010.
- [4] S. Daniels, T. Brijs, E. Nuyts y G. Wets, «Extended prediction models for crashes at roundabouts,» *Safety Science*, pp. 198-207, 2010.
- [5] L. Rodegerdts, M. Blogg, E. Wemple, E. Myers, M. Kyte, M. Dixon, G. List, A. Flannery, R. Troutbeck, W. Brilon, N. Wy, B. Persaud, C. Lyon, D. Harkey y D. Carter, «NCHRP Web-Only Document 94 - Appendixes to NCHRP Report 572: Roundabout in the United States,» *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2007.
- [6] A. M. Bastos y Á. Mala, «Manual de planeamiento das acessibilidades e da gestão viária,» *Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N)*, Porto, 2010.
- [7] A. Montella, «Identifying crash contributory factors at urban roundabout and using association rules to explore their relationships to different crabs types,» *Accident Analysis and Prevention*, vol. 43, pp. 1451-1463, 2011.
- [8] MOP, «Nomas de Diseño Geométrico y Caminos Vecinales,» *Ministerio de Obras Públicas*, Quito, 2003.
- [9] Subsecretaría del Transporte, «Norma Ecuatoriana Vial,» *Ministerio de Transporte y Obras Públicas*, Quito, 2013.
- [10] G. Thenoux y R. Villasante, «Estudio Aplicación Guía Aastho 2000 para el diseño de rotondas en Chile,» *Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción*, pp. 403-412, 2003.
- [11] W. Wang y X. Yang, «Research on Capacity of Roundabouts in Beijing,» *ELSEVIER*, pp. 157-168, 2012.
- [12] T. Tollazi, *Alternative Types of Roundabout*, Hardcover, 2015.
- [13] W. Brilon, «Roundabouts: a State of the Art un Germany,» *Transportation Research Board*, pp. 1-16, 2014.

- [14] G. Nikolic, R. Pringle y K. Braag, «Evaluation o Analytical Tools used for the operational Analysis of Roundabouts,» Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Nova Scotia, 2010.
- [15] Consejo Metropolitano de Quito, «Ordenanza N° 3746 "Normas Arquitectónicas y Urbanísticas",» Dirección Metropolitana de Planificación Territorial y Servicios Públicos, Quito, 2012.
- [16] H. England, T. Scotland, W. G. L. Cymru y T. D. f. R. D. N. Ireland, «Geometryc Design of Roundabouts,» Design Manual for Roads and Bridges, London, 2007.
- [17] Subsecretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, «Guía de Nudos Varios,» Ministerio de Fomento, Madrid, 2012.
- [18] P. Spacek, «Basis of the Swiss design standard for roundabout,» *Transportation Research Record*, pp. 27-35, 2004.
- [19] R. Cal y Mayor y J. Cárdenas, Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones, México: Alfaomega, 2007.
- [20] Instituto Nacional de Vías, «Manual de Diseño Geométrico de Carreteras,» Ministerio de Transporte, Bogota, 2008.
- [21] MTC, «Manual de Carreteras, Diseño Geométrico DG-2013,» Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Lima, 2013.
- [22] YACM, «Highway Capacity Manual,» Transportation Research Board, Washington D.C, 2000.
- [23] HCM, «Highway Capacity Manual,» Transportation Research Board, Washington D.C, 1994.
- [24] HCM, «Highway Capacity Manual,» Transportation Research Board, Washington D. C, 2010.
- [25] O. Giuffré, A. Graná y S. Marino, «Turbo-roundabouts vs Roundabouts Performance Level,» *Procedia Social and Behavioral Sciences*, pp. 590-600, 2012.
- [26] J. Tanner, «A theoretical analysis of delay At An Uncontrolled Intersections,» *Biometrika*, pp. 163-170, 1962.
- [27] G. Castellano, V. Depiante y J. Galarraga, «Calibración del modelo de capacidad de rotondas del HCM2010 a condiciones locales: caso Córdoba, Argentina,» *Transportes*, pp. 95-103, 2015.
- [28] M. Caimi y J. Galarraga, «Estimación del tiempo de Aceptación y del Tiempo de Seguimiento en rotondas en Uruguay,» *XIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, pp. 1-14, 2007.
- [29] R. Elvik y T. Vaa, «The Handbook of Road Safety Measures,» *Elseiver*, p. 1078, 2004.

- [30] D. Lord, I. v. Schalkwyk, S. Chrysler y L. Staplin, «A strategy to reduce older driver injuries at intersections using more accommodating roundabout design practices,» *Accident Analysis and Prevention*, pp. 427-432, 2007.
- [31] R. Elvik, A. Mysen y T. Vaa, «Road Safety Handbook, In Norwegian,» Transportøkonomisk Institutt, Oslo, 1997.
- [32] C. Hydén y A. Várhegyi, «The effects on safety, time consumption and environment of large scale use of roundabouts in an urban area: a case study,» *PERGAMON*, pp. 11-23, 2000.
- [33] A. Bastos Silva, S. Santos, L. Vasconcelos, Á. Seco y J. P. Silva, «Driver behavior characterization in roundabout crossings,» *transportation Research Procedia*, pp. 80-89, 2014.
- [34] A. Bastos Silva, L. Vasconcelos y S. Santos, «Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-Roundabouts,» *Social and Behavioral Sciences*, pp. 137-146, 2014.
- [35] A. Bastos Silva y A.M.C, «Definicao de uma Metodologia de Concepcao de Cruzamentos Giratórios,» Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
- [36] S. Daniels, E. Nuyts y G. Wets, «The effects of roundabouts on traffic safety for bicyclist: An observational study,» *Accident Analysis and Prevention*, pp. 518-526, 2008.
- [37] S. Daniels, T. Brijs, E. Nuyts y G. Wets, «Externality of risk and crash severity at roundabouts,» *Accident Analysis and Prevention*, nº 42, pp. 1966-1973, 2010.
- [38] R. Elvik, «Effects on Road Safety of Converting Intersections to Roundabouts: Review of Evidence from Non-U.S Studies,» *Journal of the Transportation Research Board*, pp. 1-10, 2003.
- [39] B. De Brabander y L. Vereeck, «Safety effects of roundabout in Flanders: Signal type, speed limits and vulnerable road users,» *Accidente Analysis & Prevention*, pp. 591-599, 2006.
- [40] U. Brude y J. Larson, «What roundabout design provides highest posible safety?,» *Nordic Road Transportation*, nº 2, pp. 17-21, 2000.
- [41] V. Gallellia, R. Vaianaa y T. Iuelea, «Comparison between simulated and experimental crossing speed,» *Procedia Socia and Behavioral Sciences*, pp. 117-126, 2014.
- [42] T. Hels y I. Orozava-Bekkvold, «The effect to roundabout desing features on cyclist accident rate,» *Accident Anal[ysis & Prevention*, pp. 300-307, 2007.
- [43] GAD de Cuenca, Plan de Movilidad y Espacios Públicos, Cuenca: Municipalidad de Cuenca, 2015.
- [44] Consejo de Seguridad Ciudadana, «Cuenca en Cifras 2015,» Centro de Estudios Estratégicos, Cuenca, 2015.

- [45] Consejo de Seguridad Ciudadana, «Cuenca en Cifras 2014,» Centro de Estudios Estratégicos, Cuenca, 2014.
- [46] GAD Cuenca, «Servicios de Inventario Vial en la Zona Urbana del Cantón Cuenca,» Municipalidad de Cuenca, Cuenca, 2014.
- [47] GAD Cuenca, «Estudio de Volúmenes de Tránsito de diferentes Intersecciones de la ciudad de Cuenca,» Municipalidad de Cuenca, Cuenca, 2013.
- [48] A. Silva y Á. Seco, «Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária,» Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N), Porto, 2008.

## 9. Anexos

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*