

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### Aplicabilidad del modelo lineal de Kimber para determinar la capacidad de rotondas en Lima

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Carlos Michel Nieto Medina**

**Asesor: Dr. (c) Félix Israel Cabrera Vega**

Lima, abril de 2016

## RESUMEN

Los problemas de tráfico en Lima muchas veces se generan debido al bajo nivel de planificación urbana que se ha tenido a lo largo de su desarrollo como ciudad. Debido a ello, resulta importante conocer los fundamentos del diseño y funcionamiento de los elementos del tráfico vehicular con la finalidad de beneficiar a los ciudadanos que diariamente hacen uso de ellos.

De esta manera, se considera importante el desarrollo de un trabajo de investigación orientado a rotondas, las cuales han sido poco estudiadas en países de América Latina. Por ello, el presente trabajo está orientado al estudio de la capacidad de sus entradas mediante el modelo empírico de regresión lineal propuesto por R.M. Kimber en 1980, aunque se debe reconocer que los problemas de circulación en general abarcan otras dimensiones, como la ambiental, económica y social además de la ingenieril.

Dado que la investigación de rotondas en el Perú es prácticamente nula y el modelo lineal de Kimber fue concebido para rotondas de Inglaterra, se tiene como objetivo general verificar si es aplicable a la realidad de Lima.

Como parte de la literatura, se revisan y detallan diversos modelos de capacidad en rotondas desarrollados en diversos países; tales como Francia, Suiza, Alemania, Inglaterra, Australia, Estados Unidos y China. Asimismo, se describen brevemente los parámetros de eficiencia de una intersección.

La información que fue requerida por el modelo para ser evaluado comprende características geométricas de la rotonda, las cuales fueron obtenidas mediante un levantamiento topográfico. Por otro lado, con el acceso a las grabaciones de las cámaras de seguridad implementadas por las municipalidades de los distritos de Miraflores y Santiago de Surco se realizó el conteo de vehículos para obtener la demanda horaria y las colas de las zonas de estudio.

Se evaluó la validez del modelo a través de una comparación de las longitudes colas formadas en las entradas con los valores obtenidos con la fórmula transformada de Whiting. Para ello, se utilizó la herramienta estadística *randomization test* y la teoría probabilística de formación de colas.

Finalmente, luego de la evaluación estadística de los datos se concluye que las longitudes de colas medidas y calculadas no son equivalentes.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.2.1. Objetivo general .....	3
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Hipótesis del proyecto.....	3
1.4. Alcances y limitaciones del proyecto.....	3
Capítulo 2: Revisión de la literatura.....	4
2.1. Modelos empíricos de regresión lineal.....	4
2.1.1. Modelo de Philbrick (Reino Unido) .....	4
2.1.2. Modelo de Glen, Sumner y Kimber (Reino Unido).....	6
2.1.3. Modelo de Kimber (Reino Unido) .....	8
2.1.4. Modelo de Sieglösch (Alemania).....	9
2.1.5. Modelo de Brilon y Bondzio (Alemania) .....	11
2.1.6. Modelo del CERTU (Francia) .....	12
2.1.7. Modelo de Bovy (Suiza).....	13
2.2. Modelos teóricos basados en la teoría de brechas.....	16
2.2.1. Modelo de Brilon-Wu (Alemania).....	16
2.2.2. Modelo del HCM 2000 (Estados Unidos) .....	17
2.2.3. Modelo de Troutbeck (Australia).....	19
2.3. Modelos mixtos .....	20
2.3.1. Modelo de Guichet (Francia) .....	20
2.3.2. Modelo del HCM 2010 (Estados Unidos) .....	23
2.3.3. Modelo de Shi-Wang-Yang (China).....	25
2.4. Medidas de eficiencia en rotondas .....	26
2.4.1. Longitudes de cola en rotondas.....	26

2.4.2.	Demoras en rotondas .....	27
2.4.3.	Demoras geométrica en rotondas .....	28
	Capítulo 3: Metodología de trabajo .....	30
3.1.	Definición de las zonas de estudio .....	30
3.2.	Obtención de los parámetros geométricos.....	32
3.2.1.	Ángulo de entrada a la rotonda ( $\phi$ ).....	32
3.2.2.	Radio de curvatura de la curva de entrada (r).....	34
3.2.3.	Ancho de entrada a la rotonda (e).....	34
3.2.4.	Mitad del ancho del carril de aproximación (v).....	34
3.2.5.	Diámetro inscrito en la rotonda (D).....	34
3.2.6.	Longitud de la curva de entrada (l).....	35
3.3.	Características geométricas de la rotonda Villarreal.....	37
3.4.	Características geométricas de la rotonda Los Delfines.....	40
3.5.	Obtención de la información del flujo vehicular.....	43
3.6.	Cálculo de la capacidad.....	44
3.7.	Validación del modelo.....	44
	Capítulo 4: Resultados .....	46
4.1.	Características del tráfico de la rotonda Villarreal.....	46
4.2.	Características del tráfico de la rotonda Los Delfines.....	47
4.3.	Comparación de longitudes de cola .....	48
4.4.	Randomization test .....	52
4.5.	Teoría probabilística de formación de colas.....	57
	Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones .....	60
	Referencias.....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Rangos para los cuales el modelo lineal de Philbrick es válido .....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2. Rangos para los cuales el modelo de Glen, Sumner y Kimber es válido.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Rangos para los cuales el modelo lineal de Kimber es válido .....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 4. Constantes de Siegloch.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 5. Constantes de Brilon y Bondzio .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 6. Brecha crítica y tiempo de seguimiento para rotondas estadounidenses..</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 7. Rangos para los cuales el modelo de Guichet es válido.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 8. Parámetros geométricos de la rotonda Villarreal.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9. Parámetros geométricos de la rotonda Los Delfines.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 10. Resumen de flujos vehiculares y colas de la rotonda Villarreal .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 11. Resumen de flujos vehiculares y colas de la rotonda Los Delfines .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 12. Parámetros estadísticos de las colas medidas y calculadas.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 13. Probabilidad de formación de colas .....</i>	<i>58</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Características geométricas de la rotonda. ....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Características geométricas de la rotonda. ....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Curvas de capacidad del modelo de Siegloch.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Curvas de capacidad de Brilon y Bondzio. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Parámetros incluidos en el modelo del CERTU. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Puntos de conflicto de entrada “B” y salida “A”. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Variación de <math>\phi</math> según la separación de los puntos de conflicto.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Curvas de capacidad de Brilon-Wu.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9. Capacidad de entrada (ordenadas) versus el flujo circulante. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10. Curva de capacidad para el modelo de Troutbeck.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11. Parámetros incluidos en el modelo de Guichet. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12. Curvas de capacidad para el modelo. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13. Topógrafo haciendo uso del teodolito electrónico. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14. Puntos tomados de la rotonda Villarreal.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15. Puntos tomados de la rotonda Los Delfines.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16. Construcción geométrica para hallar el valor de <math>\Phi</math>. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17. Ángulo de entrada a la rotonda.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18. Parámetros geométricos de una rotonda.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Construcción geométrica para hallar el valor de <math>l</math> y <math>l'</math>. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20. Foto de la rotonda Villarreal. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21. Dibujo de la rotonda Villarreal. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22. Foto de la rotonda Los Delfines. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23. Dibujo de la rotonda Los Delfines. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 24. Captura de cámara de la rotonda Villarreal. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 25. Captura de cámara de la rotonda Los Delfines. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 26. Gráfico del grado de saturación versus longitud de cola. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Función transformada de Whiting. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 28. Gráfico del grado de saturación versus longitud de cola para grados de saturación menores a 0.9. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 29. Muestra original de datos para el randomization test.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 30. Conjunto de 10000 pares de muestras generadas a partir de las muestras originales. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 31. Evaluación del porcentaje de datos menor que la diferencia de medias de las muestras originales. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 32. Probabilidad de formación de cola versus longitud de cola. ....</i>	<i>59</i>

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1. Antecedentes

La poca eficiencia del sistema de transporte urbano en la ciudad de Lima es un problema que se está agravando con el transcurso de los años debido a la excesiva demanda que suele presentarse en zonas concurridas de la capital. Esto genera un exceso en los tiempos de traslado de un gran grupo de ciudadanos; efectos en su salud, tales como estrés y cansancio; un exceso en el consumo de combustibles e impactos ambientales negativos que a largo plazo se traducen en pérdidas monetarias para el Perú. De hecho, la gran cantidad de automóviles en Lima se debe, en parte, a la facilidad de acceso de las clases socioeconómicas de medianos ingresos, al mayor acceso al crédito, a la falta de regulación de vehículos que ingresa al país y la escasa aplicación de planes de transporte urbano orientados a la movilidad y sostenibilidad a largo plazo (Thomson & Bull, 2001). De hecho, no resulta sorprendente que Perú contase, en el año 2011, con un parque automotor de aproximadamente 2 millones de vehículos con una antigüedad promedio de 17 años, lo cual genera una contaminación mayor, debido al deterioro de los mismos a lo largo del tiempo (Asociación Automotriz del Perú, 2011).

Así, surge la preocupación respecto a los problemas de saturación que se dan en las calles de Lima, que han sido muchas veces abordados sin tener en cuenta la movilidad de los peatones, con un sobredimensionamiento en la infraestructura construida y con diseños basados en modelos extranjeros que no necesariamente son aplicables directamente a la realidad peruana.

Uno de los casos más resaltantes, actualmente, son las rotondas presentes en diversos puntos de la capital, ya que estas, muchas veces, no cumplen con el objetivo principal para el que fueron construidas, el cual es garantizar el tránsito fluido de una intersección de cuatro o más ramales empleando efectivamente el espacio público y a un costo relativamente reducido. En efecto, se generan zonas de conflicto, ya que los conductores, en diversas ocasiones, incumplen la normativa de tránsito en rotondas, lo cual perjudica la circulación fluida de vehículos.

Las rotondas fueron concebidas a principios del siglo XX como una solución a los problemas de tráfico existentes en las ciudades europeas más importantes. Mediante ellas se buscaba aumentar la fluidez, capacidad y seguridad del desplazamiento en general. Inicialmente, funcionaban como espacios de trenzado

entre los ramales que llegaban a ellas. Sin embargo, la prioridad de circulación fue otorgada a los vehículos circulantes por la calzada anular debido a los problemas de saturación que generaba el planteamiento original de su funcionamiento. De esta manera, actualmente son estudiadas como una asociación de intersecciones en T (Darder, 2005).

El análisis de la capacidad de las rotondas ha estado limitado a países desarrollados, como Francia, Inglaterra, Alemania, Australia, Estados Unidos y China. Por ello, resulta importante estudiar los modelos desarrollados en estos países con la finalidad de conocer sus particularidades. De esta forma, se realizará una introducción a la concepción general de la capacidad de una rotonda para su mejor entendimiento.

La capacidad de la entrada de una glorieta es definida como el menor flujo que causa una presencia permanente de los vehículos esperando entrar a ella. Una fórmula o modelo de capacidad generalmente se obtiene de dos maneras: mediante modelos basados en la teoría de aceptación de brechas y mediante técnicas de regresión lineal aplicadas al muestreo de datos del tráfico (Fernández & Dextre, 2011).

La capacidad de la entrada de una rotonda ( $Q_e$ ) depende de variables geométricas ( $\tilde{G}$ ), del flujo perturbador ( $Q_d$ ), de la sensibilidad de los conductores ( $\tilde{\tau}$ ) y constantes de calibración ( $\tilde{S}$ ). Esto se resume en la siguiente expresión:  $Q_e = Q_e(\tilde{G}, Q_d, \tilde{\tau}, \tilde{S})$ . De hecho, las fórmulas de capacidad pueden clasificarse en tres grupos: aquellas basadas solamente en el número de entradas y carriles de circulación; aquellas que toman en cuenta las características geométricas a un nivel más detallado y aquellas que toman en cuenta los tiempos de seguimiento y brecha crítica, los cuales varían según el comportamiento de los usuarios además de algunos parámetros geométricos (Mauro, 2010).

Por otro lado, poco ha sido desarrollado en países de América Latina respecto a este tipo de intersección. Por ello, en el presente trabajo se abordará este problema desde el punto de vista de la capacidad, pues ella refleja la eficiencia de su funcionamiento dada una demanda conocida. Así, este trabajo evaluará la aplicabilidad en Lima del modelo empírico británico propuesto por el *Transport Research Laboratory* (TRL), el cual fue desarrollado por Kimber en 1980.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo principal de la presente tesis es analizar si el modelo lineal de Kimber es aplicable para la determinación de la capacidad de los óvalos en Lima.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Se han planteado dos objetivos específicos. El primero es calcular las capacidades, utilizando el modelo de Kimber, de los ramales de entrada de los óvalos Villarreal y Los Delfines, ubicados en los distritos de Miraflores y Santiago de Surco, respectivamente. El segundo, es comparar las colas formadas en las entradas y su longitud calculada con la fórmula transformada de Whiting.

## 1.3. Hipótesis del proyecto

El modelo lineal de Kimber, para grados de saturación menores a 0.9, es aplicable para la determinación de la capacidad de los ramales de entrada de las rotondas de la ciudad de Lima.

## 1.4. Alcances y limitaciones del proyecto

Este proyecto de Investigación trata de encontrar la factibilidad de uso del modelo lineal de Kimber en las rotondas de Lima. Sin embargo, dada la gran cantidad de glorietas en Lima, se resalta que se requiere del estudio de una mayor cantidad de ellas para obtener conclusiones más robustas. Además, se destaca que muchos óvalos en Lima no han sido adecuadamente diseñados, por lo que su geometría difiere de los estándares y, por consiguiente, los modelos empíricos son de difícil aplicación a estos casos.

También, cabe resaltar que, algunos supuestos deben ser asumidos respecto a las condiciones ideales de tráfico con las que se trabaja en el modelo. Uno de ellos es la regulación del tránsito en las rotondas que muchas veces no es respetada por los conductores limeños; por ello, se descartaron los datos obtenidos de situaciones muy diferentes a la del tránsito convencional.

Se abordará la aplicación del modelo desde el punto de vista determinístico que este ofrece. Esto se hará de manera separada para los óvalos mencionados anteriormente. Sin embargo, se reconoce que el problema del tráfico en Lima, específicamente en las rotondas, comprende otras dimensiones del tipo ambiental, económico y social que no serán analizadas en este trabajo.

## Capítulo 2: Revisión de la literatura

Actualmente, es sabido que los modelos determinísticos de intersecciones pueden clasificarse en dos grupos: los de regresión lineal y los teóricos de aceptación de brechas. Los primeros utilizan datos de campo para generar estadísticamente relaciones entre las características geométricas y alguna medida de efectividad de la intersección, tales como la capacidad o la demora. En cambio, los modelos teóricos utilizan elementos de la teoría del flujo vehicular junto con mediciones en campo de parámetros que reflejan el comportamiento de los conductores, tales como la brecha crítica o el intervalo promedio. No obstante, también buscan relacionar estos parámetros con la capacidad o la demora (Highway Capacity Manual, 2010).

A continuación, se hará una revisión de los distintos modelos planteados para la determinación de la capacidad de los ramales de entrada en rotondas. Se presentará el modelo de regresión lineal de Kimber (1980) y, luego, se presentarán los modelos desarrollados en diversos países, los cuales se agruparán en modelos empíricos de regresión lineal, modelos teóricos basados en la teoría de brechas y modelos mixtos. Además, se hará una revisión breve de algunas medidas de eficiencia para la evaluación de rotondas.

Asimismo, cabe resaltar que los modelos propuestos, a continuación, se rigen por la regla de prioridad de circulación en rotondas estudiada en 1956 por el *Road Research Laboratory*, la cual prioriza el tránsito de los vehículos presentes en la rotonda sobre los que desean ingresar en ella. Luego del análisis realizado en 83 rotondas, se obtuvieron resultados satisfactorios respecto a la nueva regla. Así, esta se instauró en el Reino Unido en 1966; en Francia, en 1984; y en Suiza, en 1987 (Darder, 2005).

### 2.1. Modelos empíricos de regresión lineal

#### 2.1.1. Modelo de Philbrick (Reino Unido)

Philbrick (1977) propone un modelo de regresión lineal basado en las observaciones de 11 rotondas en el Reino Unido. En su estudio, se hace una crítica al modelo de Wardrop y se demuestra que el factor de trenzado tenía relevancia para predecir la capacidad de rotondas modernas. Por ello, propuso una nueva forma de calcular la capacidad, la cual incluye efectos del tráfico (tales como el flujo

de entrada, el flujo circulante y el porcentaje de vehículos pesados) y características geométricas de la rotonda. A continuación se detalla la fórmula propuesta:

$$Q_e = F - f_c Q_c$$

$$F = 233e_l \left( 1,5 - \frac{1}{\sqrt{r_1}} \right) - 255$$

$$f_c = 0,0449(2e_l - w) + 0.282$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (pcu/h)

$F$ : Punto de intersección de la recta de regresión con el eje de ordenadas (pcu/h)

$f_c$ : Pendiente de la recta de regresión

$r_1$ : Radio de curvatura de la curva de entrada a la rotonda (m)

$e_l$ : Ancho de entrada a la zona de trenzado (m)

$w$ : Ancho de circulación de la rotonda (m)

Además, en el siguiente cuadro se muestran los rangos de valores de las características geométricas de la rotonda para los cuales la fórmula es aplicable.

Tabla 1. Rangos para los cuales el modelo lineal de Philbrick es válido

Variable	Símbolo	Rango
Ancho de entrada a la zona de trenzado (m)	$e_l$	4,0 - 12,5
Relación entre el ancho de entrada a la zona de trenzado y la raíz del radio de curvatura de la curva de entrada	$e_l/\sqrt{r_1}$	0,74 - 3,30
Diferencia entre el doble del ancho de entrada a la zona de trenzado y el ancho de circulación de la rotonda (m)	$2e_l-w$	-2,5 - 9,5
Flujo circulante (pcu/h)	$Q_c$	580 - 3890

Fuente: Philbrick, 1977

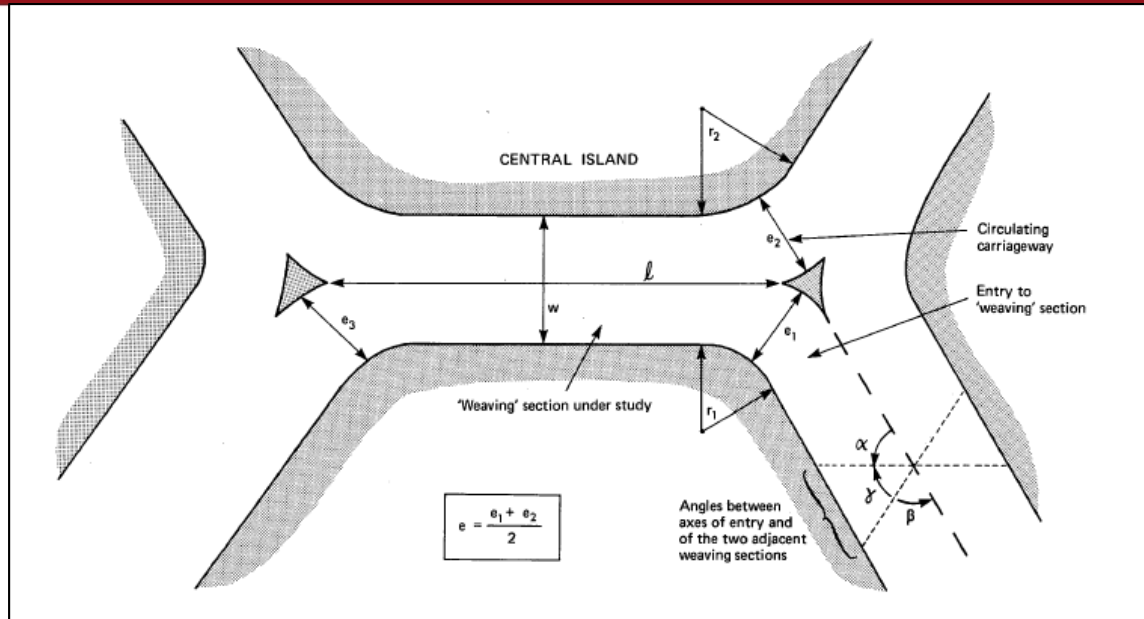


Figura 1. Características geométricas de la rotonda. Fuente: Philbrick, 1977

Al año siguiente, Glen et al., (1978) proponen una modificación al modelo de Philbrick. De esta manera, modifican los valores de  $f_c$  y  $F$  según otros parámetros geométricos diferentes a los evaluados en 1977.

### 2.1.2. Modelo de Glen, Sumner y Kimber (Reino Unido)

Como se mencionó anteriormente, los valores de la pendiente de la recta de regresión ( $f_c$ ) y el intercepto con el eje de las ordenadas ( $F$ ) dependen de otros parámetros geométricos, diferentes a los propuestos por Philbrick. A continuación, se detallarán las expresiones propuestas por Glen, Sumner y Kimber.

$$Q_e = F - f_c Q_c$$

$$F = 224 \left( v + \frac{e - v}{1 + S} \right) + 35u + 2,4D - 135$$

$$f_c = 0,063 \left( v + \frac{e - v}{1 + S} \right) + 0.29$$

$$S = \frac{e - v}{l}$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (pcu/h)

$v$ : Mitad del ancho del carril de aproximación (m)

e: Ancho de entrada a la rotonda (m)

u: Ancho de circulación en el punto de máxima deflexión en la entrada (m)

D: Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)

S: Agudeza de la entrada

Además, en el siguiente cuadro se muestran los rangos de valores de las características geométricas de la rotonda para los cuales la fórmula es aplicable.

Tabla 2. Rangos para los cuales el modelo de Glen, Sumner y Kimber es válido

Variable	Símbolo	Rango
Mitad del ancho del carril de aproximación (m)	v	1,9 - 6,9
Ancho de entrada a la rotonda (m)	e	4,5 - 16,5
Agudeza de la entrada (adimensional)	S	0,05 - 1,98
Ancho de circulación en el punto de máxima deflexión en la entrada (m)	u	5,5 - 22,4
Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)	D	13,5 - 58,5

Fuente: Glen et al., 1978

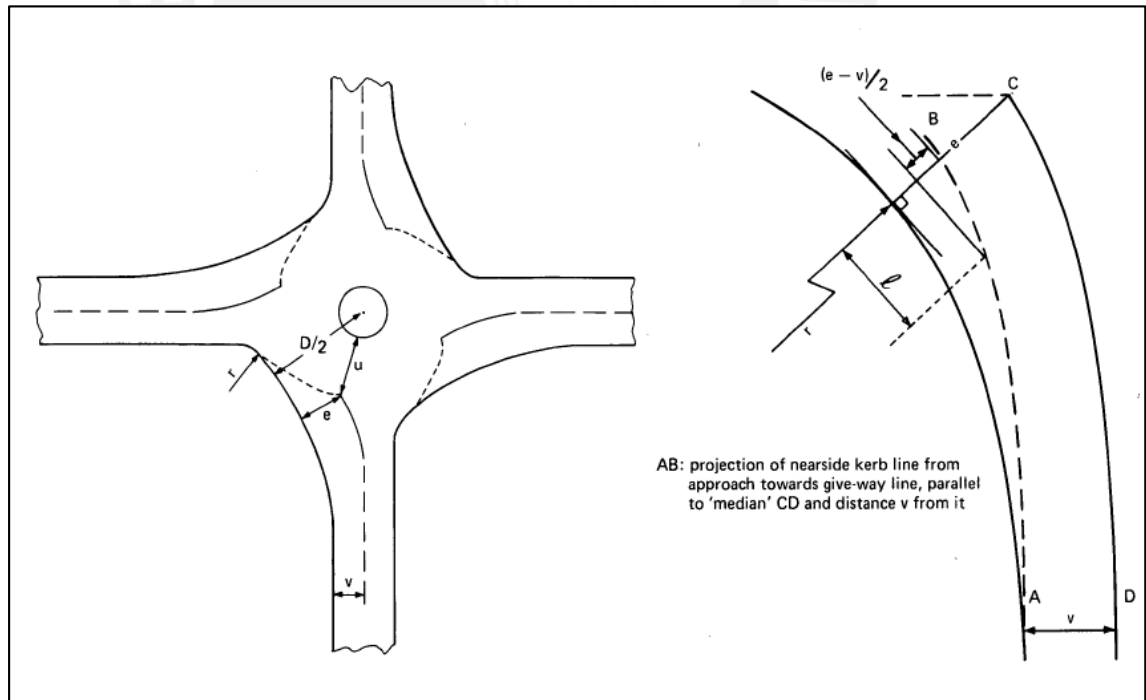


Figura 2. Características geométricas de la rotonda. Fuente: Glen et al., 1978

### 2.1.3. Modelo de Kimber (Reino Unido)

Luego de los modelos desarrollados por Philbrick y Glen en 1977 y 1978, respectivamente. Kimber realiza algunas modificaciones para afinar el modelo de Glen, en cuyo desarrollo, él también formó parte. Así, propone la siguiente fórmula de capacidad, en la cual se incluyen más características geométricas de la rotonda.

$$Q_e = k \cdot (F - f_c \cdot Q_c)$$

$$F = 303 \cdot x_2$$

$$f_c = 0,210 \cdot t_D \cdot (1 + 0,2 \cdot x_2)$$

$$k = 1 - 0,00347 \cdot (\varphi - 30) - 0,978 \cdot \left(\frac{1}{r} - 0,05\right)$$

$$t_D = 1 + \frac{1}{2 \cdot (1 + e^{\frac{D-60}{10}})}$$

$$x_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2S}$$

$$S = \frac{e - v}{l} = 1,6 \frac{e - v}{l'}$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (pcu/h)

$F$ : Punto de intersección de la recta de regresión con el eje de ordenadas (pcu/h)

$f_c$ : Pendiente de la recta de recta de regresión

$v$ : Mitad del ancho del carril de aproximación (m)

$e$ : Ancho de entrada a la rotonda (m)

$S$ : Agudeza de la entrada

$x_2$ : Constante dependiente de  $e$ ,  $v$  y  $S$

$D$ : Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)

$t_D$ : Constante dependiente de  $D$

$r$ : Radio de curvatura de la curva de entrada a la rotonda (m)

$\phi$ : Ángulo de entrada

Además, en el siguiente cuadro se muestran los rangos de valores de las características geométricas de la rotonda para los cuales la fórmula es aplicable.

Tabla 3. Rangos para los cuales el modelo lineal de Kimber es válido

Variable	Símbolo	Rango
Ancho de entrada (m)	e	3,6 – 16,5
Mitad del ancho de la calzada de aproximación (m)	v	1,9 – 12,5
Longitud de desarrollo de la curva de entrada (m)	l	1 - $\infty$
Agudeza de la entrada (adimensional)	S	0 – 2,9
Diámetro del círculo inscrito (m)	D	13,5 – 171,6
Ángulo de entrada (°)	$\phi$	0 - 77
Radio de entrada (m)	r	3,4 - $\infty$

Fuente: Kimber (1980)

Cabe resaltar que algunos factores geométricos tales como “u” y “w”, utilizados en el modelo de Glen et al., (1978) dejaron de ser incluidos en el modelo pues se demostró que no tenían una influencia significativa en los valores de capacidad.

Algunos estudios realizados en los años 80 fueron realizados sobre la base de modelos teóricos de brechas; sin embargo, los resultados fueron desalentadores (Brilon et al., 1997b). Además, la estimación de las brechas críticas es una de las tareas más difíciles en ingeniería de tráfico (Brilon et al., 1997a). Por otro lado, la investigación realizada en Inglaterra respecto a los modelos de regresión lineal ofrecía resultados prometedores y sirvió de inspiración para la creación de nuevos modelos como el desarrollado en Alemania por Sieglöch en 1973.

#### 2.1.4. Modelo de Sieglöch (Alemania)

El modelo propuesto por Sieglöch considera como referencia parte del trabajo realizado en Inglaterra; sin embargo, a diferencia de la fórmula británica, este propone la siguiente regresión exponencial citada por Taekratok (1998):

$$Q_e = A \cdot e^{-\frac{BQ_c}{10000}}$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de la entrada (veh/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (veh/h)

A, B: Constantes empíricas para Alemania

Los valores de A y B fueron obtenidos en diferentes experimentos para rotondas con entradas de hasta 3 carriles, y con 1 y 2 carriles de calzada anular. Estos se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Constantes de Siegloch

Caso	Número de carriles de entrada	Número de carriles de la calzada anular	A	B
a	1	1	1089	7.42
b	2-3	1	1200	7.3
c	2	2	1553	6.69
d	3	2	2018	6.68

Fuente: Taekratok, 1998

Así, utilizando la fórmula de Siegloch, se obtienen las siguientes curvas, según el número de carriles de entrada y de circulación.

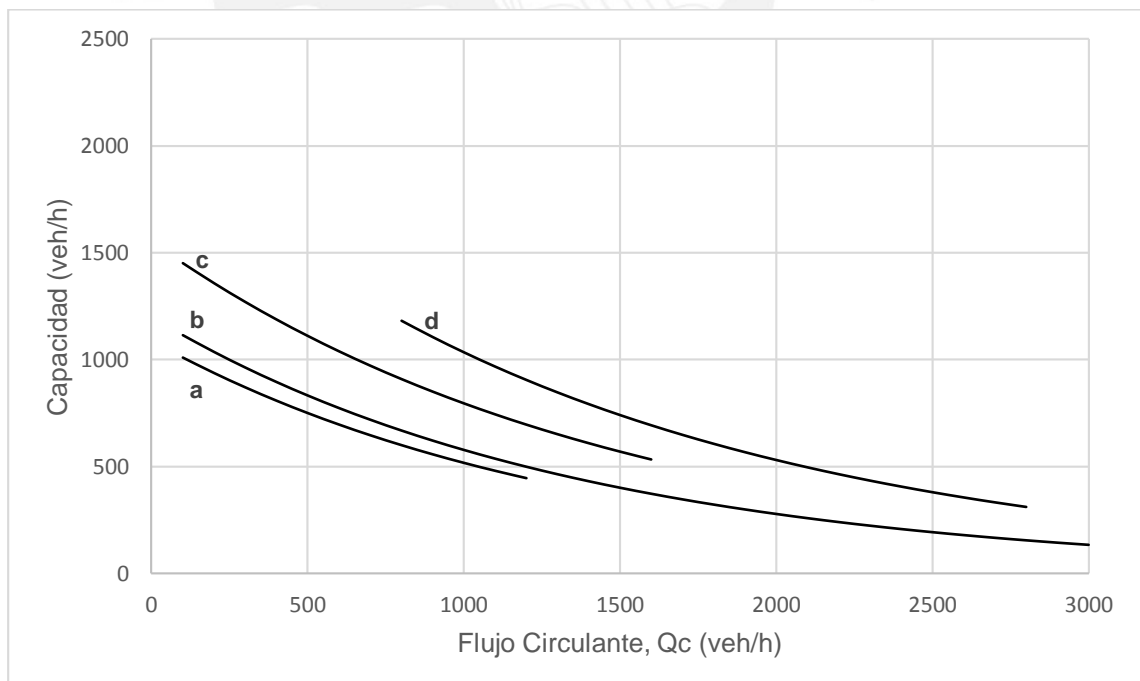


Figura 3. Curvas de capacidad del modelo de Siegloch. Fuente: Brilon & Stuwe, 1990

Sin embargo, algunos estudios posteriores al de Siegloch han sido realizados y han demostrado que las funciones lineales proporcionan mejores resultados (Brilon et al., 1997)

### 2.1.5. Modelo de Brilon y Bondzio (Alemania)

Este modelo propone una relación lineal entre la capacidad y el flujo circulante en vez de la propuesta por Siegloch, que era exponencial. A continuación, se muestra la fórmula obtenida para el modelo de por Brilon y Bondzio (1997).

$$C_e = A - B \cdot q_c$$

Dónde:

$C_e$ : Capacidad de entrada (veh/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (veh/h)

A, B: Constantes empíricas para Alemania

Tabla 5. Constantes de Brilon y Bondzio

Caso	Número de carriles de entrada	Número de carriles de la calzada anular	A	B	Tamaño de la muestra usada para la regresión lineal
a	1	1	1218	0.74	1504
b	1	2-3	1250	0.53	879
c	2	2	1380	0.50	4574
d	2	3	1409	0.42	295

Fuente: Brilon et al., 1997

De esta manera, utilizando la fórmula de Brilon y Bondzio, se obtienen las siguientes curvas, según el número de carriles de entrada y de circulación.

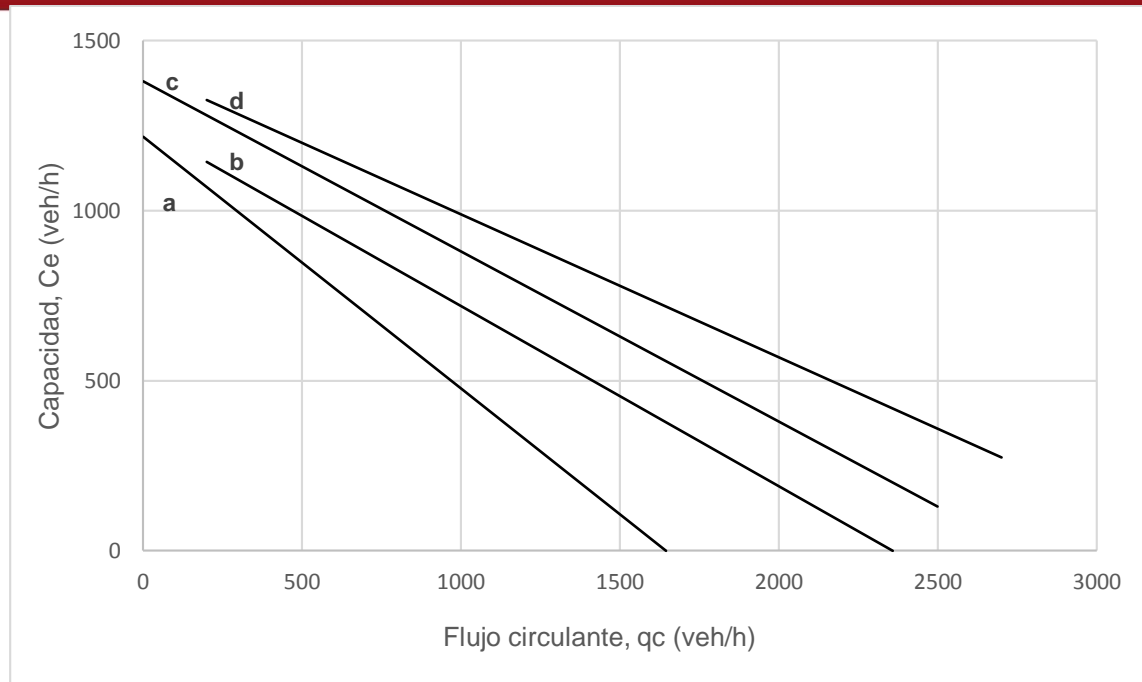


Figura 4. Curvas de capacidad de Brilon y Bondzio. Fuente: Brilon et al., 1997

Por otro lado, en Francia, el CERTU, desarrolló un modelo simplificado basado en el radio de la isla central ( $R_i$ ) y la longitud de la isleta de entrada a la rotonda ( $L_i$ ).

#### 2.1.6. Modelo del CERTU (Francia)

La formulación del CERTU (1999) es considerada adecuada para rotondas con una isla central de diámetro variable desde 20m hasta 60m, con entradas de un solo carril y distribución simétrica de las mismas. Además, se debe tener una demanda balanceada entre las entradas a la rotonda. Si se cumplen las condiciones anteriormente señaladas, se puede expresar la capacidad de entrada mediante la siguiente fórmula:

$$C = 1500 - \frac{5}{6} \cdot Q_d$$

El CERTU propone que el flujo perturbador ( $Q_d$ ) resulta de la combinación lineal del flujo circulante ( $Q_c$ ) y el flujo de salida ( $Q_u$ ) a través de los coeficientes  $a$  y  $b$  definidos a continuación.

$$Q_d = a \cdot Q_c + b \cdot Q_u$$

“ $a$ ” varía según  $R_i$ , su valor máximo es de 0.9 para valores de  $R_i$  menores a 15m y su valor mínimo es 0.7 para valores de  $R_i$  mayores a 30m. Para valores intermedios, se deberá interpolar linealmente entre 0.7 y 0.9 según el valor de  $R_i$ .

“b” varía según  $L_i$ , su valor mínimo es de 0 para valores de  $L_i$  mayores a 15m y su valor máximo es 0.3 para  $L_i$  igual a 0m. Para valores intermedios, se deberá interpolar linealmente entre 0 y 0.3 según el valor de  $L_i$ .

Cabe resaltar, que se ha observado que en rotondas de gran diámetro, con 2 carriles de circulación y de entrada, la capacidad aumenta en 40%. (Cabrera, 2015)

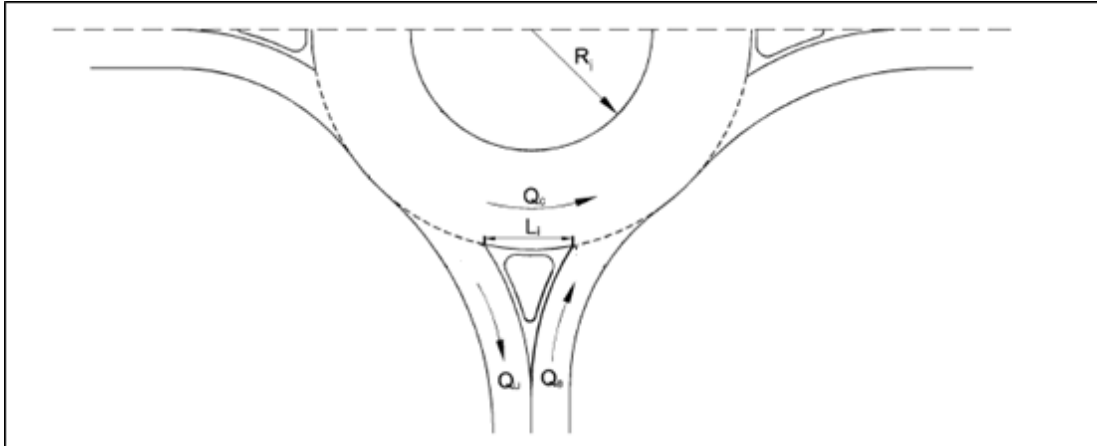


Figura 5. Parámetros incluidos en el modelo del CERTU. Fuente: Mauro, 2010

Por su parte, Bovy, en el Guía Suiza de Rotondas (1991), presentan un modelo similar al del CERTU, ya que proponen una relación lineal, pero afectada por un factor dependiente del número de carriles de la entrada en análisis. Este será detallado a continuación.

### 2.1.7. Modelo de Bovy (Suiza)

Este modelo es recomendado por Mauro (2010) para rotondas urbanas y suburbanas sin isla central o, en su defecto, de un diámetro de hasta 20m. El diámetro exterior de la rotonda debe variar entre 24m y 34m; además, las entradas deben ser anchas con la finalidad de tener mayor facilidad al momento de escoger qué dirección tomar al ingresar a la rotonda. La fórmula de capacidad se expresa a continuación.

$$C = \frac{1}{\gamma} \cdot (1500 - \frac{8}{9} \cdot Q_d)$$

Dónde:

C: Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_d$ : Flujo perturbador (pcu/h)

$\gamma$ : Parámetro dependiente del número de carriles de entrada

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 && \text{para 1 carril} \\ \gamma &= 0.6 - 0.7 && \text{para 2 carriles, } \gamma \text{ será menor para entradas más anchas} \\ &&& \text{usualmente se usa el valor de 0.667} \\ \gamma &= 0.5 && \text{para 3 carriles} \end{aligned}$$

Bovy, al igual que el CERTU, propone que el flujo perturbador resulta de la combinación lineal del flujo circulante ( $Q_c$ ) y el flujo de salida ( $Q_u$ ), para lo cual emplea los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$ . El flujo perturbador se calcula según la siguiente expresión.

$$Q_d = \alpha \cdot Q_u + \beta \cdot Q_c$$

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  dependen del número de carriles de la calzada circular y la longitud del arco formado en la rotonda al unir los puntos de conflicto de entrada y de salida de la misma.

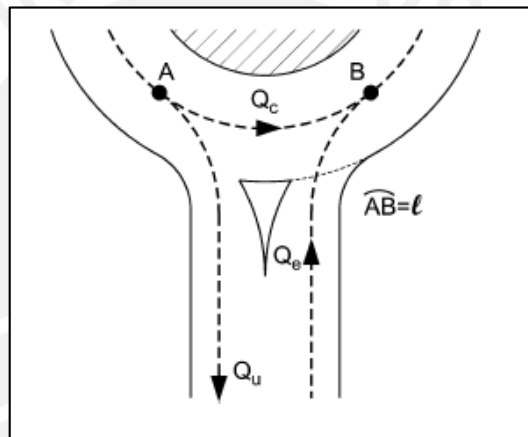


Figura 6. Puntos de conflicto de entrada "B" y salida "A". Fuente: Mauro, 2010

Asimismo, por simulaciones realizadas en rotondas, se sabe que el valor de  $\alpha$  decrece a medida que el valor de  $l$  se incrementa. Esto se cumple hasta un valor igual a 28m, cuando los flujos de salida dejan de afectar al flujo perturbador.

En el siguiente gráfico se muestra la relación entre  $\alpha$  y  $l$  según la velocidad de circulación de la calzada anular. En él se puede apreciar que para velocidades mayores de circulación, el flujo de salida tiene una mayor participación en la fórmula del flujo perturbador ( $Q_d$ ). La línea "a" fue modelada para velocidades entre 20 y 25 km/h, mientras que las líneas "b" para velocidades mayores y menores a las de "a", respectivamente.

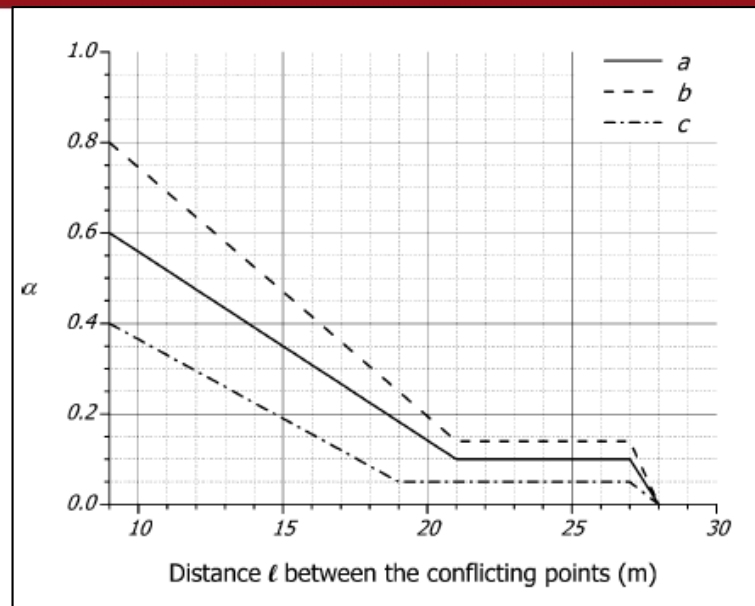


Figura 7. Variación de  $\alpha$  según la separación de los puntos de conflicto. Fuente: Mauro, 2010

Los valores de  $\beta$ , están ligados al número de carriles de la calzada circular de la rotonda. Mientras mayor sea éste, el flujo perturbador será menor, ya que intuitivamente habrá más espacio para que circulen los vehículos. Así, se tienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \beta &= 0.9 - 1.0 && \text{para 1 carril} \\ \beta &= 0.6 - 0.8 && \text{para 2 carriles} \\ \beta &= 0.5 - 0.6 && \text{para 3 carriles} \end{aligned}$$

Además, a diferencia de la relación tradicional de la demanda y capacidad para hallar el grado de saturación de una entrada, se proponen dos indicadores de eficiencia que deben ser usados conjuntamente con la capacidad hallada por el método recientemente explicado.

Grado de saturación de entrada ( $CRU_e$ , por sus siglas en inglés):

$$CRU_e = \left( \gamma \cdot \frac{Q_e}{C_e} \right) \cdot 100(\%)$$

Grado de saturación en el punto de conflicto ( $CRU_c$ , por sus siglas en inglés):

$$CRU_c = \left( \frac{\gamma \cdot Q_e + \frac{8}{9} \cdot Q_d}{1500} \right) \cdot 100(\%)$$

Dónde:

$Q_e$ : Flujo de entrada a la rotonda (pcu/h)

$C_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_d$ : Flujo perturbador (pcu/h)

## 2.2. Modelos teóricos basados en la teoría de brechas

### 2.2.1. Modelo de Brilon-Wu (Alemania)

Como se mencionó anteriormente, este modelo se basa en el propuesto anteriormente por Tanner en 1962. De hecho, es el resultado de la modificación realizada por Brilon & Wu (1997). Toma en cuenta algunos aspectos geométricos de la rotonda, así como el comportamiento de los conductores a través del tiempo de seguimiento ( $T_f$ ) y la brecha crítica ( $T_c$ ). Esta fórmula, actualmente, es recomendada por el manual de capacidad vial de Alemania, HBS 2001 (FGSV, 2006), citado en Mauro (2010). Además, es incluida en el software KREISEL (2015).

$$C = 3600 \cdot \left(1 - \frac{\Delta \cdot Q_c}{3600 n_c}\right)^{n_c} \cdot \frac{n_e}{T_f} \cdot e^{\frac{-Q_c}{3600} \cdot (T_c - \frac{T_f}{2} - \Delta)}$$

Dónde:

$Q_c$ : Flujo circulante al frente de la entrada (pcu/h)

$n_c$ : Número de carriles de la calzada anular

$n_e$ : Número de entradas a la rotonda

$T_c$ : Brecha crítica (s)

$T_f$ : Tiempo de seguimiento (s)

$\Delta$ : mínimo intervalo promedio entre dos vehículos de la calzada anular (s)

El comportamiento de los conductores para Alemania fue estudiado por Brilon et al. (1993) y se obtuvieron los valores de  $T_c=4.12s$ ,  $T_f=2.88s$  y  $\Delta=2.10s$

De este modo, utilizando la fórmula de Brilon y Wu, se obtienen las siguientes curvas, según el número de carriles de entrada y de circulación.

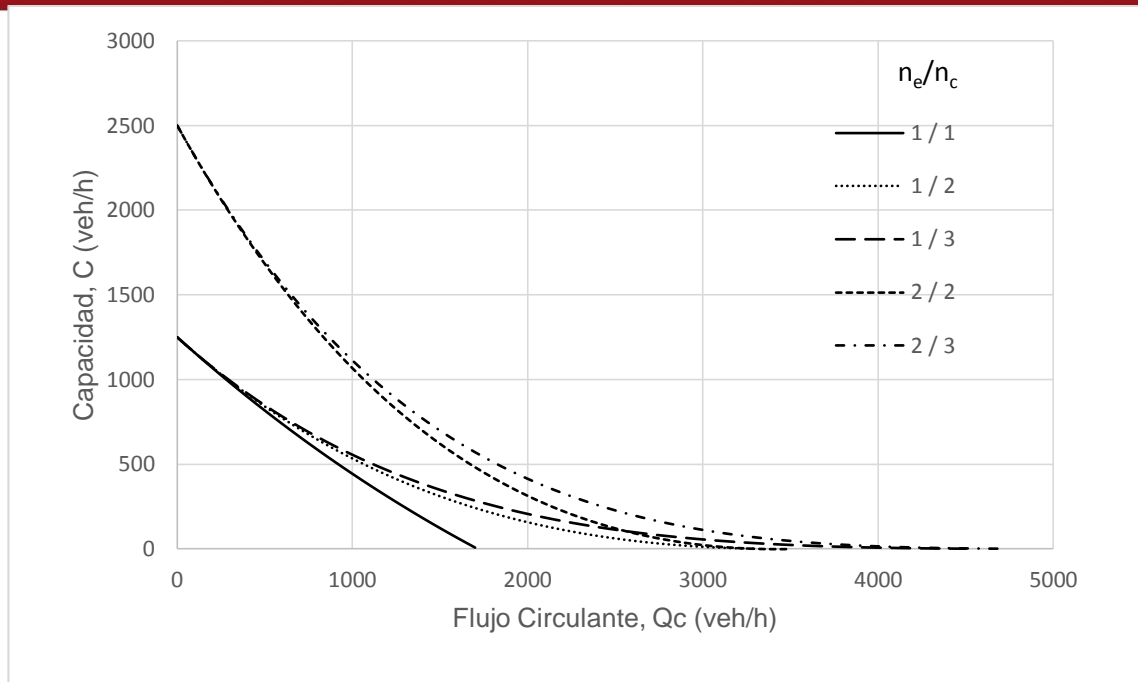


Figura 8. Curvas de capacidad de Brilon-Wu. Fuente: Brilon et al., 1997

Por otro lado, otro de los modelos teóricos de brechas es presentado en el Highway Capacity Manual (HCM) del *Transportation Research Board* (TRB). En su edición del año 2000 estuvo limitado a rotondas de un solo carril de entrada y un solo carril de la calzada circular; sin embargo, en la última edición del HCM (2010) se ha ampliado el modelo para considerar un mayor número de carriles de entrada y circulantes.

### 2.2.2. Modelo del HCM 2000 (Estados Unidos)

El modelo propuesto en el HCM (2000) está basado en la teoría de aceptación de brechas; así, toma en cuenta los tiempos de seguimiento y brechas críticas para las rotondas en estudio. Por otro lado, debido a la naturaleza de las rotondas con un solo carril de circulación, las características de la aceptación de brechas se asemejan a una intersección controlada por dos paradas (TWSC, por sus siglas en inglés). De hecho, en rotondas en las que hay más carriles circulantes, se generan más interacciones y las consideraciones tomadas en las intersecciones TWSC no podrán ser aplicadas. A continuación, se muestra la expresión sugerida por el TRB para la determinación de la capacidad de una de las entradas.

$$Q_e = \frac{Q_c \cdot e^{-Q_c t_c / 3600}}{1 - e^{-Q_c t_f / 3600}}$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada (veh/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (veh/h)

$t_c$ : Brecha crítica (s)

$t_f$ : Tiempo de seguimiento (s)

Aunque fueron pocos los estudios realizados en Estados Unidos a la fecha de publicación del HCM (2000) se estimaron los valores de la brecha crítica y el tiempo de seguimientos, los cuales definen dos curvas: un límite superior y uno inferior. En el siguiente cuadro se muestran los valores propuestos.

Tabla 6. Brecha crítica y tiempo de seguimiento para rotondas estadounidenses

Límite	Brecha Crítica (s)	Tiempo de Seguimiento (s)
Superior	4.1	2.6
Inferior	4.6	3.1

Fuente: HCM, 2000

Al utilizar los valores del cuadro anterior, se obtienen las siguientes curvas del flujo circulante versus la capacidad de entrada.

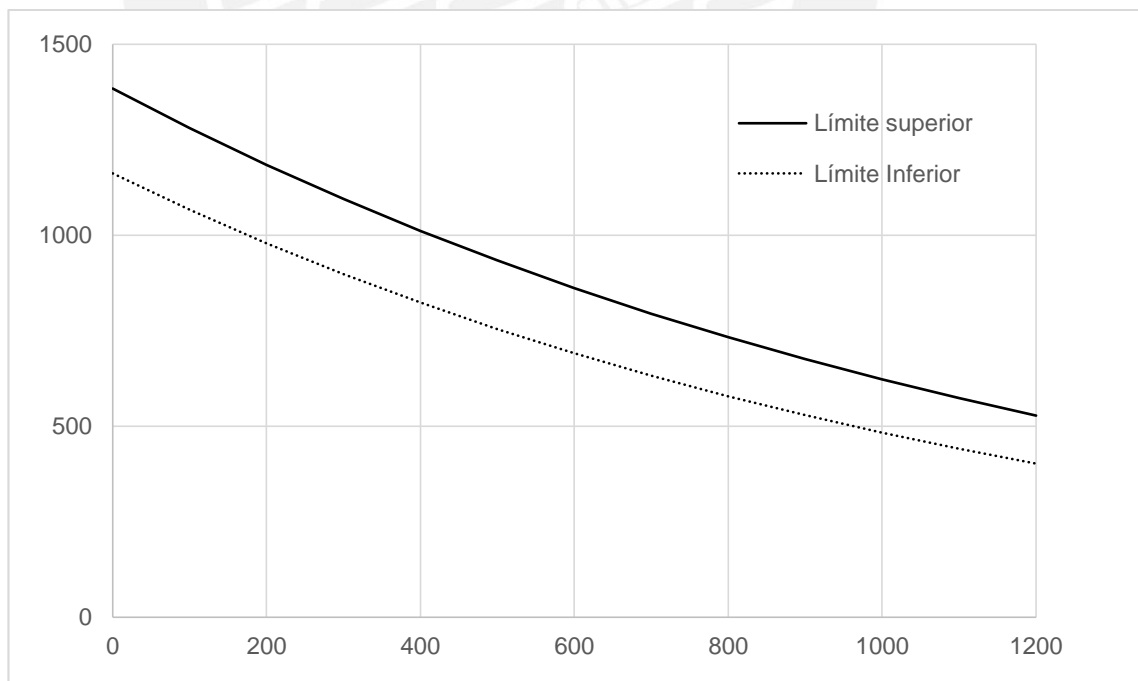


Figura 9. Capacidad de entrada (ordenadas) versus el flujo circulante. Fuente: HCM, 2000

Por lo tanto, la capacidad de entrada variará entre el área encerrada por los dos límites, según el comportamiento particular de los conductores de la rotonda en estudio.

Este modelo cubre algunas rotondas de Estados Unidos; no obstante, debido a la poca investigación realizada para rotondas de más de un carril de circulación. Solo se intuía, por experiencias de estudios en otros países, que al incrementar los carriles la capacidad de entrada aumentaría.

### 2.2.3. Modelo de Troutbeck (Australia)

Por su parte, Troutbeck (1989), desarrolló un modelo actualmente utilizado en el *software* SIDRA, utilizado ampliamente en Australia. La fórmula de capacidad de entrada será detallada a continuación.

$$Q_e = \frac{3600 \cdot \varphi \cdot q_c \cdot e^{-\lambda(\alpha - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda\beta}}$$

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot q_c}{1 - \Delta q_c}$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (veh/h)

$q_c$ : Flujo circulante total (veh/s)

$\beta$ : Tiempo de seguimiento (s)

$\alpha$ : Brecha crítica media (s)

$\varphi$ : Proporción de vehículos libres

$\Delta$ : Intervalo promedio entre grupos de vehículos, toma un valor constante igual a 2s

Los valores de  $\beta$  y  $\alpha$ , con valores de  $q_c$  en veh/h, pueden ser estimados con las siguientes expresiones:

$$\beta = 2,819 - 3,94 \cdot 10^{-4} \cdot q_c$$

$$\alpha = (1,641 - 3,137 \cdot 10^{-4} \cdot q_c) \cdot \beta$$

Además,  $\varphi$  representa la proporción de vehículos no incluidos para el cálculo de  $\Delta$  y se determina con la siguiente expresión, usando  $q_c$  en veh/s:

$$\varphi = 0,75 \cdot (1 - \Delta q_c)$$

Así, se puede obtener la siguiente curva con los valores de capacidad de entrada según el flujo circulante:

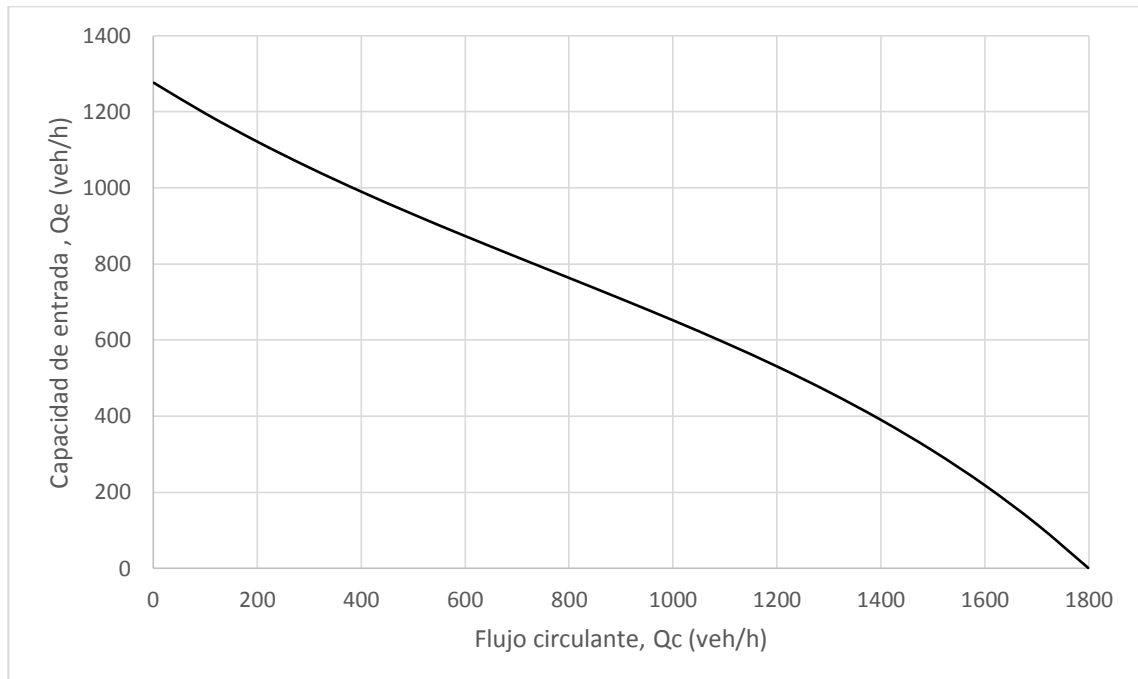


Figura 10. Curva de capacidad para el modelo de Troutbeck. Fuente: Chung et al., 1992

Por su parte, Guichet (1997); modificó la fórmula propuesta por el Centro de Estudios de Técnica de Equipos del Oeste de Nantes (CETE de l'Ouest), para plantear una expresión que es aceptada por el Centro de Estudios de las redes, el transporte, la planificación urbana y la construcción pública (CERTU, 1999). Este modelo está incluido en el *software* GIRABASE, y será desarrollado a continuación.

### 2.3. Modelos mixtos

#### 2.3.1. Modelo de Guichet (Francia)

Este modelo es aplicable para rotondas pequeñas o grandes; ubicadas en zonas urbanas o rurales; con un número de entradas variable entre tres y ocho; y hasta tres carriles en la calzada circular (Guichet, 2005). Además, es incluido en el *software* GIRABASE (2014).

La siguiente figura muestra los parámetros geométricos y de flujo incluidos en el modelo de Guichet.

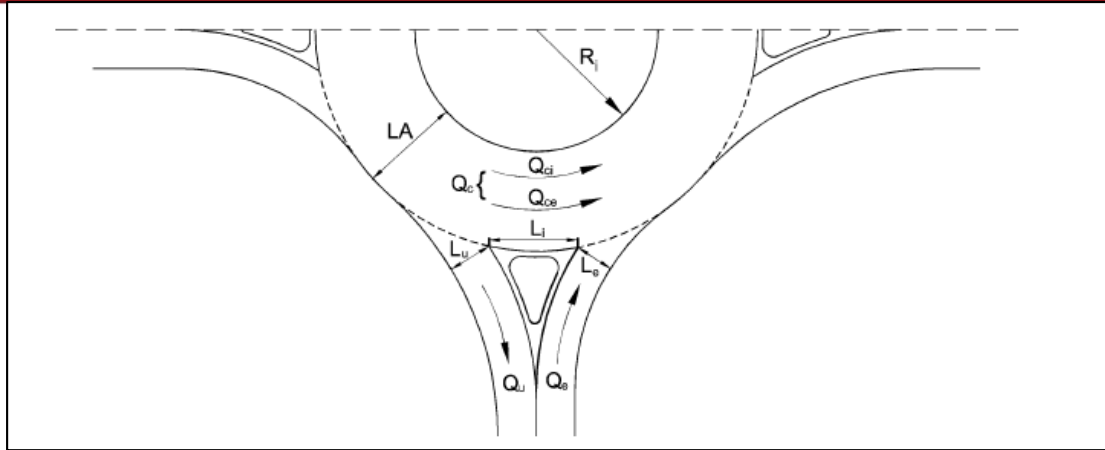


Figura 11. Parámetros incluidos en el modelo de Guichet. Fuente: Mauro, 2010

Es importante mencionar que la fórmula para la determinación de la capacidad, al igual que la del modelo de Sieglösch, se basa en una regresión exponencial. Esta se muestra a continuación.

$$C = A \cdot e^{-C_B \cdot Q_d}$$

$$A = \frac{3600}{T_f} \cdot \left(\frac{L_e}{3.5}\right)^{0.8}$$

Dónde:

C: Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_d$ : Flujo perturbador (pcu/h)

$T_f$ : Tiempo de seguimiento, 2.05s

$L_e$ : Ancho de entrada a la rotonda determinado perpendicularmente a la dirección de entrada (m)

$C_B$ : Coeficiente de ajuste, 3.525 para zonas urbanas y 3.625 para zonas rurales.

Para poder aplicar el modelo de Guichet, los elementos geométricos deben estar incluidos en los rangos que se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 7. Rangos para los cuales el modelo de Guichet es válido

Variable	Símbolo	Rango
Ancho de entrada (m)	$L_e$	3 - 11
Longitud de la isla divisoria de carriles de entrada a la rotonda (m)	$L_i$	0 - 70
Ancho de salida (m)	$L_u$	3,5 - 10,5
Ancho de la calzada circular (m)	LA	4,5 - 17,5
Radio de la isla central (m)	$R_i$	3,5 - 87,5

Fuente: Mauro, 2010

Guichet propone que el flujo perturbador ( $Q_d$ ) que circula frente a una entrada es el resultado de la combinación lineal del flujo circulante del carril interno de la calzada circular ( $Q_{ci}$ ), el flujo circulante del carril exterior de la calzada circular ( $Q_{ce}$ ) y el flujo de salida ( $Q_u$ ). Además, sugiere que el flujo circulante ( $Q_c$ ) total resulta de la suma de  $Q_{ci}$  y  $Q_{ce}$ . A continuación se muestran las ecuaciones que relacionan los flujos mencionados:

$$Q_d = Q_u \cdot k_a \cdot \left(1 - \frac{Q_u}{Q_c + Q_u}\right) + Q_{ci} \cdot k_{ti} + Q_{ce} \cdot k_{te}$$

$$k_a = \begin{cases} \frac{R_i}{R_i + LA} - \frac{L_i}{L_{imax}} & \text{para } L_i < L_{imax} \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

Dónde:

 $R_i$ : Radio de la isla central (m)

LA: Ancho de la calzada circular (m)

 $L_i$ : Longitud de la isla divisoria de carriles de entrada a la rotonda (m)

$$L_{imax} = 4,55 \cdot \sqrt{R_i + \frac{LA}{2}}$$

$$k_{ti} = \min \left\{ \frac{160}{LA \cdot (R_i + LA)}, 1 \right\}$$

$$k_{te} = \min \left\{ 1 - \frac{(LA - 8)}{LA} \cdot \left(\frac{R_i}{(R_i + LA)}\right)^2, 1 \right\}$$

Como puede apreciarse, el modelo de Guichet toma en cuenta a profundidad las variables geométricas de la rotonda, lo cual le da un grado de confiabilidad mayor, pues se puede obtener la capacidad con mayor precisión. En efecto, esta fórmula es utilizada actualmente en Francia para la determinación de la capacidad en rotondas.

Sin embargo, el CERTU (1999) valida el uso de la fórmula alternativa empírica para calcular la capacidad de rotondas francesas que se mostró anteriormente.

Por otro lado, en la nueva edición del manual estadounidense, HCM (2010), se realiza un análisis más profundo de las rotondas; de hecho, la fórmula de capacidad para rotondas de un solo carril de circulación es replanteada y se añaden formulaciones para rotondas con más carriles de entrada y circulación.

### 2.3.2. Modelo del HCM 2010 (Estados Unidos)

El *National Cooperative Highway Research Program Project* (NCHRP) en su reporte número 572 (2007) indica que se recolectaron datos en 31 ciudades, para la evaluación de rotondas de más de un carril de circulación. A continuación, se presenta la fórmula de capacidad planteada en el HCM (2010), el cual es el resultado de una combinación de análisis de regresión basada en el flujo de los carriles y elementos de los modelos de aceptación de brechas.

#### Rotondas con un carril de entrada y un carril de circulación

$$Q_e = 1130. e^{-\frac{Qc}{1000}}$$

#### Rotondas con dos carriles de entrada y un carril de circulación

La capacidad para cada carril de entrada es la misma que para el caso anterior.

#### Rotondas con un carril de entrada y dos carriles de circulación

En la edición anterior del HCM, se había intuido que la capacidad de entrada aumentaría si se aumentaba el número de carriles de circulación. Esto, en efecto se cumple y se refleja en la siguiente ecuación:

$$Q_e = 1130. e^{-\frac{7.Qc}{10000}}$$

## Rotondas con dos carriles de entrada y dos carriles de circulación

Según datos de campo, se ha encontrado que los conductores del carril izquierdo tienen intervalos promedios más largos, lo cual implica una menor capacidad de entrada.

En efecto, la capacidad del carril izquierdo es ligeramente menor a la del carril contiguo.

$$Q_e = 1130 \cdot e^{-\frac{7,5 \cdot Q_c}{10000}}$$

La capacidad del carril derecho de entrada queda definida según la ecuación 33.

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada de un carril (pcu/h)

$Q_c$ : Flujo circulante total (pcu/h)

En el siguiente gráfico se aprecian las curvas que relacionan la capacidad de entrada con el flujo circulante según las fórmulas anteriormente descritas.

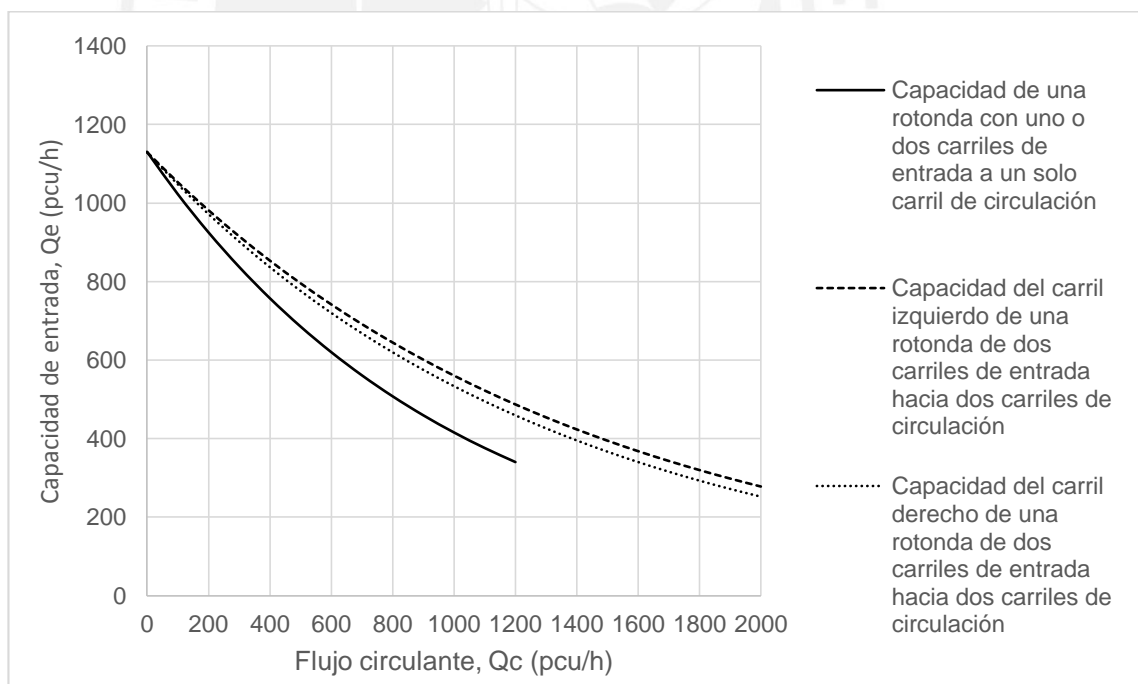


Figura 12. Curvas de capacidad para el modelo. Fuente: HCM, 2010

Por último, recientemente Shi et al. (2014) han desarrollado un modelo utilizando la relación entre los intervalos promedio y el radio de la rotonda en análisis. Su estudio

estuvo orientado al análisis de las interferencias producidas por los cruces de flujos vehiculares en 21 rotondas urbanas de Beijing. Este será detallado a continuación.

### 2.3.3. Modelo de Shi-Wang-Yang (China)

El modelo propuesto por Shi et al. (2014) presenta, al igual que el HCM (2010), dos fórmulas de capacidad según el número de carriles de circulación. Se basa en la relación de que la capacidad es inversamente proporcional a los intervalos promedio para grados de saturación cercanos a la unidad. Luego, por un análisis estadístico relaciona los intervalos promedio de las rotondas estudiadas según los radios de estas. A continuación, se detallarán sus resultados.

#### Rotondas con un solo carril de circulación

$$C = \frac{3600}{3,185 \cdot e^{-0,0368(R_o + \frac{W}{2})} + 3,142}$$

Dónde:

C: Capacidad de entrada a la rotonda (veh/h)

R<sub>o</sub>: Radio de la isla central (m)

W: Ancho del carril de circulación (m)

#### Rotondas con varios carriles de circulación

$$C = \frac{3600}{3,185 \cdot e^{-0,0368(R_o + \frac{2n_1-1}{2}W)} + 3,142} + \sum_{n_2=1}^{n_2} \frac{3600 \left[ \left( R_o + \frac{2n_2-1}{2} W \right) + 5,98 \right]}{2,556 \left( R_o + \frac{2n_2-1}{2} W \right) + 67,91}$$

Dónde:

C: Capacidad de entrada a la rotonda (veh/h)

R<sub>o</sub>: Radio de la isla central (m)

W: Ancho de los carriles de circulación (m)

n<sub>1</sub>: Número de carriles de circulación

n<sub>2</sub>: Número de carriles interiores, n<sub>2</sub>=n<sub>1</sub>-1

## 2.4. Medidas de eficiencia en rotondas

En los párrafos anteriores, se han mostrado diversos modelos para la estimación de la capacidad en rotondas, pero para poder aplicarlos se debe tener la certeza de que la estimación de la capacidad es cercana al valor real. Este valor calificado como real es difícil de ser calculado de manera precisa, pues las condiciones del tiempo, la proporción de vehículos pesados y el comportamiento de los conductores la modifican constantemente. Por ello, se describirán tres medidas de efectividad: las longitudes de cola, las demoras y los las demoras geométricas en la rotonda. De esta manera, mediante la determinación de al menos uno de estos tres parámetros y la comparación de sus valores calculados teóricamente con los observados en campo, se podrá determinar de manera indirecta si el modelo de capacidad es adecuado para la entrada en análisis. En efecto, en el presente trabajo se utilizarán las longitudes de cola como medida de efectividad. A continuación, se detallarán tres medidas de eficiencia: la longitud de colas, las demoras de servicio y las demoras geométricas.

### 2.4.1. Longitudes de cola en rotondas

Inicialmente, se plantearon dos casos de evaluación del crecimiento de colas en intersecciones no semaforizadas. El primero, aplicable para grados de saturación menores a 1, mostraba un crecimiento exponencial y donde la longitud de cola tiende a crecer indefinidamente; en cambio, para el segundo, se tiene un crecimiento constante. Sin embargo, ambos planteamientos son incompatibles entre sí, pues para grados de saturación cercanos a la unidad las longitudes de cola difieren enormemente. Así, la solución a esta discrepancia es resuelta con la función transformada de Whiting (Kimber & Hollis, 1979). Así las fórmulas para calcular la longitud de cola de un acceso es la siguiente:

$$L_t = \frac{1}{2}(\sqrt{U_L^2 + V_L} - U_L)$$

Donde  $U_L$  y  $V_L$  se calculan según:

$$U_L = \frac{(1-x)(Qt)^2 + (1-L_o)Qt - 2(1-c)(L_o + xQt)}{Qt + (1-c)}$$

$$V_L = \frac{4(L_o + xQt)[Qt - (1-c)(L_o + xQt)]}{Qt + (1-c)}$$

Dónde:

$L_t$ : Longitud de cola (veh)

$x$ : Grado de saturación de la vía

$Q$ : Capacidad de la intersección (veh/h)

$c$ : Parámetro en función del tiempo de servicio (1 para rotondas)

$L_o$ : Longitud de la cola al inicio del periodo de análisis

$t$ : Periodo en el que se asume que la capacidad es igual a la demanda (h)

Se ha determinado que  $L_t$  es una buena aproximación para tiempos de análisis no mayores a 15 minutos. Si se deseara trabajar con periodos más largos, se pueden trabajar con intervalos de 10 a 15 minutos haciendo que la longitud inicial de cola,  $L_o$ , de cada periodo sea igual al  $L_t$  calculado del periodo anterior (Fernández & Dextre, 2011).

Estas fórmulas se pueden simplificar considerablemente si se tiene en cuenta que los tiempos de servicio para rotondas son aleatorios; es decir,  $c \approx 1$ . Consecuentemente se obtienen las siguientes expresiones:

$$U_L = (1 - x)Qt + 1 - L_o$$

$$V_L = 4(L_o + xQt)$$

#### 2.4.2. Demoras en rotondas

Por otro lado, la función transformada también sirve para la estimación de las demoras en las rotondas, el cual es el tiempo que un vehículo permanece en la cola esperando a poder ingresar a la rotonda. Ellas se calculan según las siguientes expresiones (Fernández & Dextre, 2011).

$$d_t = \frac{1}{2} \left( \sqrt{U_d^2 - V_d} - U_d \right)$$

Donde  $U_D$  y  $V_D$  se calculan de la siguiente manera:

$$U_d = \frac{t}{2}(1 - x) - \frac{1}{Q}(L_o - c + 2)$$

$$V_d = \frac{2}{Q} \left[ (1 - x)t + cxt - 2(1 - c) \left( \frac{L_o + 1}{Q} \right) \right]$$

Dónde:

dt: Demora promedio por vehículo (h) o (s)

x: Grado de saturación de la vía

Q: Capacidad de la intersección (veh/h)

c: Parámetro en función del tiempo de servicio

L<sub>o</sub>: Longitud de la cola al inicio del periodo de análisis

t: Periodo en el que se asume que la capacidad es igual a la demanda (h)

### 2.4.3. Demoras geométrica en rotondas

Por otro lado, en las rotondas, se presentan demoras adicionales generadas por las características geométricas de este tipo de intersección. Estas se conocen como demoras geométricas; dependen del tiempo de aceleración y frenado ante la intersección, y del tiempo adicional de viaje al interior de la intersección Fernández (2011). Así, Mc Donald et al. (1984) proponen los siguientes valores de demora según los tipos de movimiento presentes en la rotonda. Para giros a la izquierda, 10 segundos; para giros a la derecha, 28 segundos y; por último, para movimientos directos, 11 segundos. Además, propone dos fórmulas sencillas para la estimación de las demoras a partir de un análisis de regresión para 12 sitios. Así, se presenta la siguiente expresión para calcular los retrasos para rotondas con diámetros menores a 100m.

**Para rotondas con pendiente:**

$$g = 0,11ED + 0,72(Y - V_{BC}) + 3,06$$

...

**Para rotondas en general:**

$$g = 0,07ED + 1,12(Y - V_{BC}) + 3,62$$

Dónde:

g: Retraso (s)

ED: Distancia adicional para negociar la intersección (m)

Y: Promedio de las velocidades de aproximación y salida =  $(V_A + V_D) / 2$

V<sub>BC</sub>: Velocidad promedio en la intersección (m/s)

Para giros a la izquierda:

$$V_{BC} = 0,84(\sqrt{ER} + \sqrt{EXR})$$

Dónde:

ER: Radio de curvatura de entrada (m)

EXR: Radio de curvatura de salida (m)

Para movimientos directos con  $ENA + EXA \leq 40$

$$V_{BC} = 0,47Y + 0,035SD - 1,18$$

Para SD desconocido:

$$V_{BC} = 0,40Y + 2,43$$

Para movimientos directos con  $ENA + EXA > 40^\circ$

$$V_{BC} = 0,96\sqrt{ICD} + 2,03$$

Dónde:

ENA: Ángulo de entrada a la rotonda

EXA: Ángulo de salida a la rotonda

Y: Promedio de las velocidades de aproximación y salida =  $(V_A + V_D) / 2$

SD: Distancia de visibilidad hacia la derecha (m)

ICD: Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)

### Capítulo 3: Metodología de trabajo

La presente tesis tiene como objetivo analizar el modelo empírico británico para el cálculo de la capacidad de rotondas (Kimber, 1980) y establecer su aplicabilidad a la ciudad de Lima. Esto se hará a través de cuatro etapas claramente definidas: la definición de las zonas de estudio, la obtención de los parámetros geométricos, la obtención de información de flujo vehicular y el análisis estadístico de los resultados obtenidos con el modelo lineal de Kimber y los datos recolectados en las rotondas limeñas.

#### 3.1. Definición de las zonas de estudio

Para la definición de las rotondas a analizar, se tomó en cuenta que la hipótesis afirma que el modelo lineal de Kimber es aplicable para grados de saturación menores a 0.9. Por ello, se seleccionaron óvalos en los cuales se estima que se cumplirá esta condición; sin embargo, es necesario que se aprecie la presencia de colas, para poder verificar que la capacidad es concordante con el número de vehículos en espera. Por otro lado, Kimber propone ciertos rangos, en los cuales deben encontrarse las dimensiones de la rotonda y sus entradas. Esto fue explicado con mayor detenimiento en el capítulo II.

Mediante el uso de Google Maps se pudo obtener, de forma inicial, la información de los dos óvalos en estudio. De hecho, la información recopilada para los diámetros de los círculos inscritos son 50 m y 35 m aproximadamente para los óvalos Villarreal y Los Delfines respectivamente. Sin embargo, la estimación de los demás parámetros no se pudo hacer a través de la misma vía, pero se pudo observar que los ramales de entrada eran constituidos por dos carriles; así, tanto el ancho de entrada ( $e$ ) como la mitad del ancho de la calzada de aproximación ( $v$ ) se encontraban dentro del rango establecido, ya que se asumió que el ancho de un carril era 3.5 m aproximadamente. Como los demás parámetros relacionados a la curva de entrada ( $l$ ,  $S$ ,  $\phi$  y  $r$ ) no pudieron ser medidos empleando la misma herramienta. Entonces se decidió medir todos los parámetros en campo mediante un levantamiento topográfico.

El levantamiento topográfico fue realizado con un teodolito electrónico marca TBT modelo DJD5-E, el cual tiene una precisión de 5", un máximo de 30 aumentos en la lente, pero no cuenta con compensador electrónico.

A continuación se muestra una imagen del topógrafo haciendo uso del equipo en la rotonda Los Delfines.

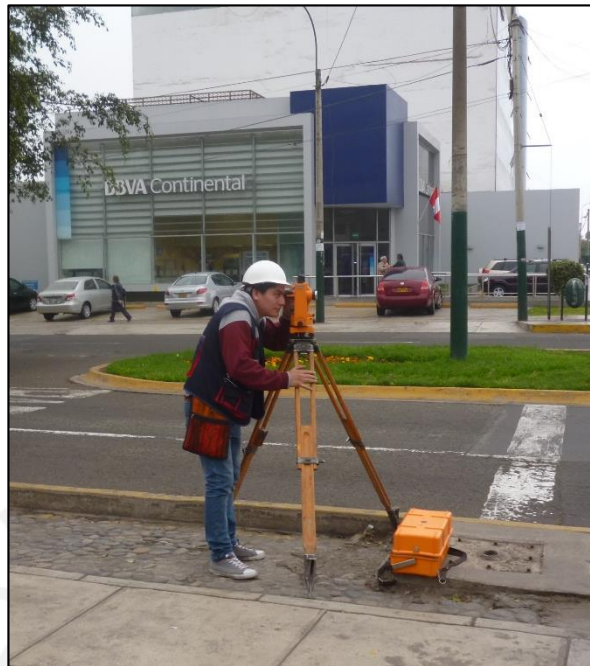


Figura 13. Topógrafo haciendo uso del teodolito electrónico. Fuente: propia

Para el levantamiento del Óvalo Villarreal se planificó la toma de datos de 46 puntos, pero en campo, se añadieron 4 más debido a que el mapa de Google no consideraba la presencia de una mediana en una de sus entradas. Para ello, se tomó como referencia al punto X de la figura 14.

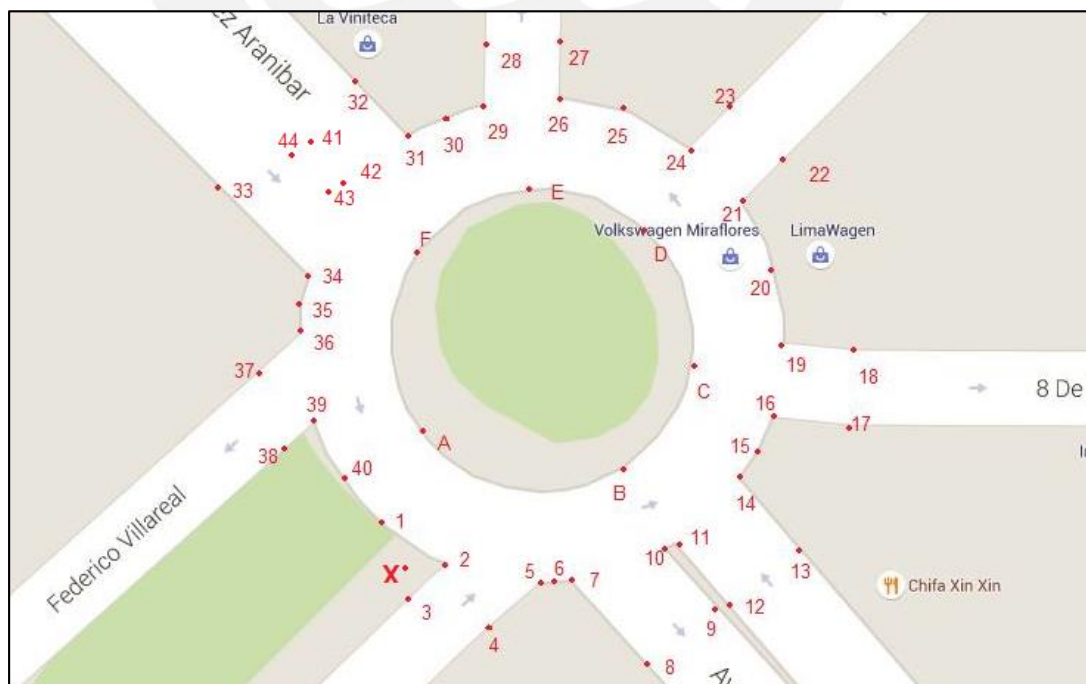


Figura 14. Puntos tomados de la rotonda Villarreal. Fuente: propia (adaptado de Google Maps)

Para el levantamiento del Óvalo Los Delfines se planificó la toma de datos de 68 puntos. Para ello, se tomó como referencia al punto X de la figura 15.

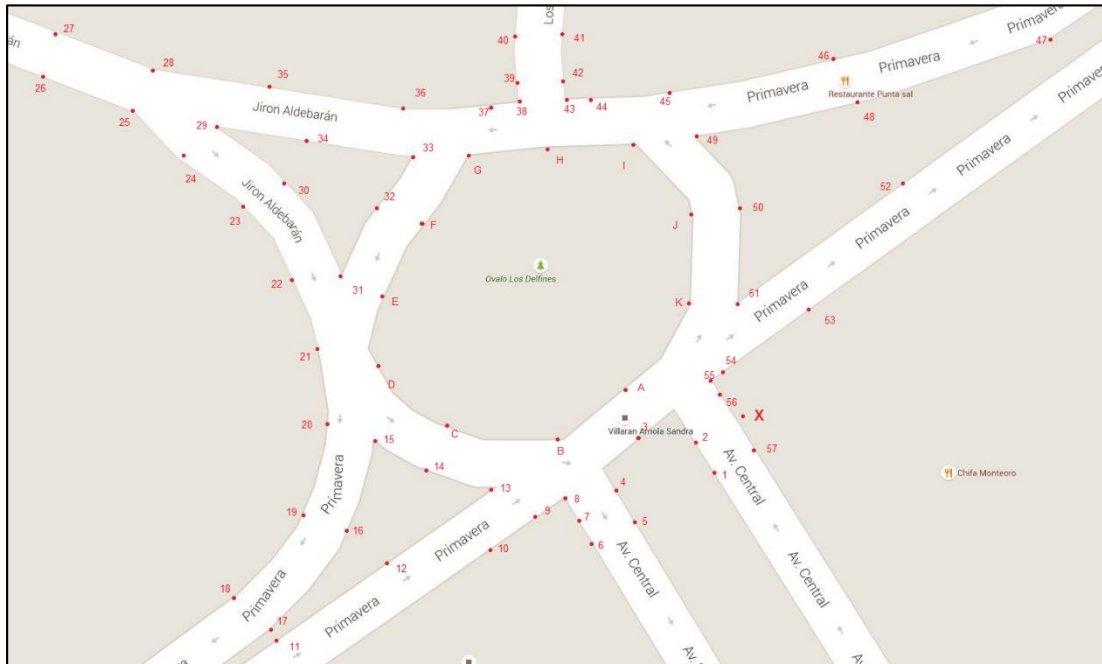


Figura 15. Puntos tomados de la rotonda Los Delfines: Fuente: propia (adaptado de Google Maps)

### 3.2. Obtención de los parámetros geométricos

Utilizando los planos obtenidos de los levantamientos topográficos, anteriormente mencionados, se obtuvieron los valores de los anchos de los carriles y los diámetros de cada una de las rotondas, así como los demás parámetros requeridos por el modelo de Kimber. Las construcciones geométricas necesarias para ello se detallan a continuación:

#### 3.2.1. Ángulo de entrada a la rotonda ( $\varphi$ )

Para la determinación de este parámetro se pueden aplicar 3 procedimientos diferentes que dependen de la configuración de los elementos que componen la rotonda. Los dos primeros métodos son aplicables para rotondas convencionales; estos son prácticamente iguales entre sí y se exponen a continuación.

En la figura 16, se muestra la construcción geométrica para calcular el ángulo de entrada a la rotonda. Este ángulo resulta de la intersección de una línea paralela al borde de la rotonda y otra línea tangente a la curva paralela a la mediana del carril de entrada ubicada equidistantemente a la curva de entrada a la rotonda y a la mediana.

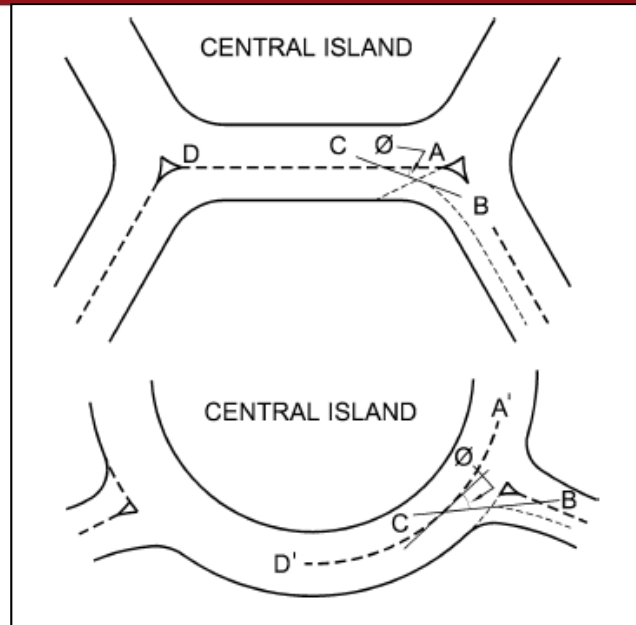


Figura 16. Construcción geométrica para hallar el valor de  $\Phi$ . Fuente: Kimber, 1980

Como se pudo observar anteriormente, la única diferencia entre los dos métodos es el borde de la rotonda; no obstante, la construcción realizada es la misma.

En cambio, el tercer procedimiento, aplicable a rotondas con formas más irregulares, tales como se muestra en la figura 17, consiste en restar de  $90^\circ$  la mitad del ángulo que forman las líneas tangentes a dos curvas en los puntos de intersección de éstas con el borde exterior de la rotonda. Estas curvas son equidistantes a las medianas y a los bordes exteriores del carril de entrada y el carril de salida contiguo.

$$\phi = 90^\circ - \frac{\widehat{GLB}}{2}$$

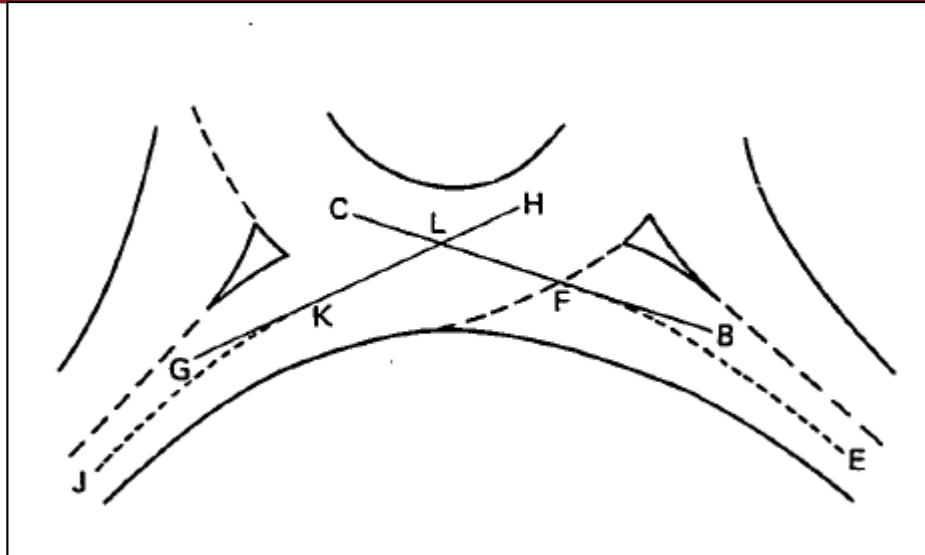


Figura 17. Ángulo de entrada a la rotonda. Fuente: Kimber, 1980

### 3.2.2. Radio de curvatura de la curva de entrada ( $r$ )

El radio de la curva de entrada se calcula como el mínimo radio de curvatura del círculo que se pueda inscribir en la curva de entrada a la rotonda.

### 3.2.3. Ancho de entrada a la rotonda ( $e$ )

El ancho de entrada equivale a la longitud del segmento perpendicular a la curva de entrada construido a partir del punto A de la isla ubicada en la entrada a la rotonda. En caso de que no haya isla, o la forma de ésta sea diferente a la mostrada en la figura 18, se prolongará la mediana de la entrada hacia el borde exterior de la rotonda; así, el punto de intersección será el que reemplace al punto A.

### 3.2.4. Mitad del ancho del carril de aproximación ( $v$ )

La mitad del ancho del carril de aproximación equivale al ancho de la entrada a la rotonda antes de que empiece a desarrollarse la curva de entrada.

### 3.2.5. Diámetro inscrito en la rotonda ( $D$ )

Se define como el máximo valor del diámetro de la circunferencia que puede ser inscrita en la rotonda. No obstante, debido a la geometría irregular que puedan presentar, se pueden utilizar diferentes valores de  $D$  locales para cada entrada de la rotonda.

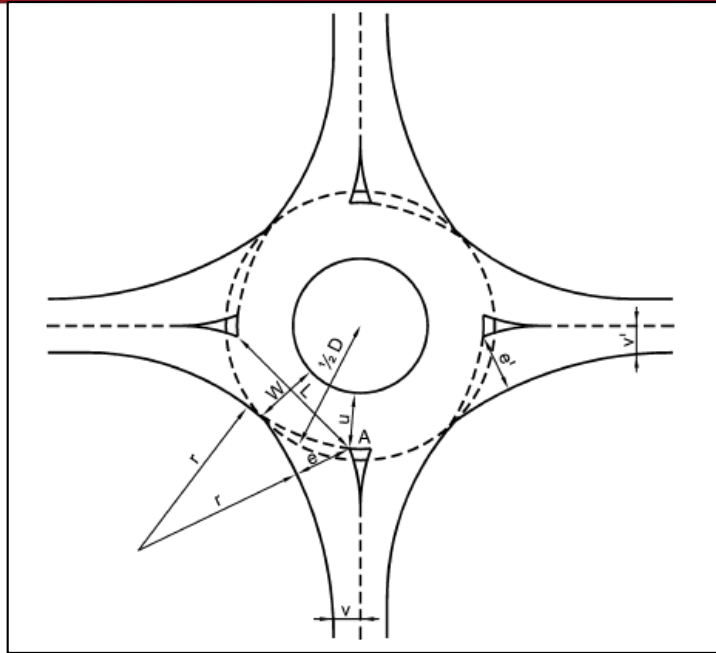


Figura 18. Parámetros geométricos de una rotonda. Fuente: Kimber, 1980

### 3.2.6. Longitud de la curva de entrada (l)

En la figura 19, se muestra la ubicación de la longitud de la curva de entrada “l” en la rotonda. Esta se calcula al trazar una curva paralela a HA desplazada una distancia igual a “v”. Esta curva interseca en D al segmento que define al ancho de entrada “e”. Se ubica el punto medio C de BD y se traza un segmento perpendicular a BD que pase por C (mediatriz). La longitud del segmento determinado por C y el punto de intersección de la mediatriz y la curva GD será la longitud “l”, definida como la longitud de desarrollo de la curva de entrada. El valor de “l” se halla de forma similar, pero en vez de trazar la mediatriz, se trazará una curva paralela a BG que pase por C. El segmento determinado por C y el punto de intersección de GD con la curva paralela a BG será la longitud de “l”.

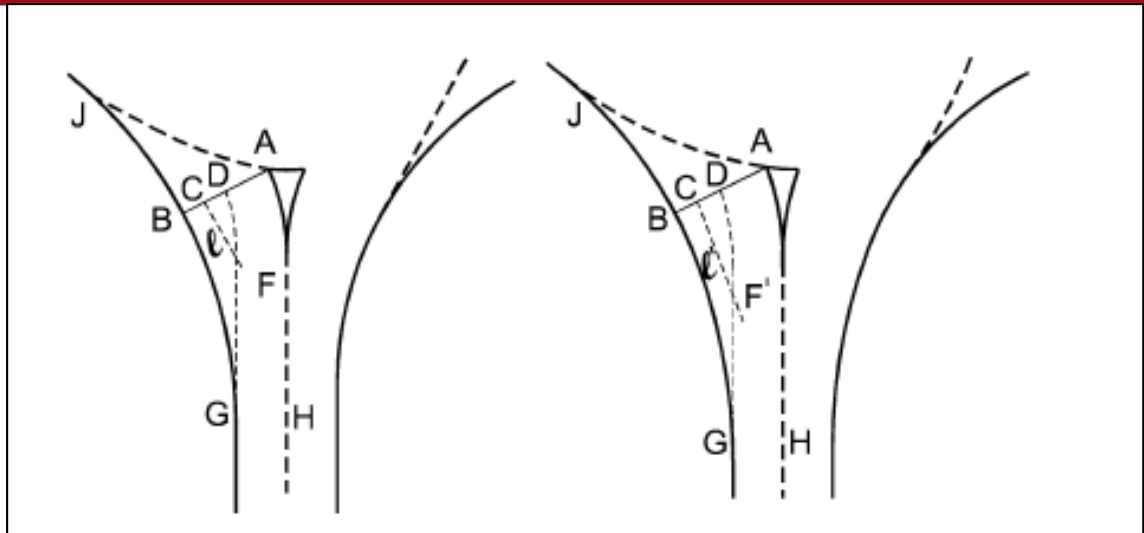


Figura 19. Construcción geométrica para hallar el valor de  $l$  y  $l'$ . Fuente: Kimber, 1980

Una vez calculados estos parámetros, los demás que son necesarios para el cálculo de la capacidad de entrada serán obtenidos según las fórmulas mostradas a continuación.

$$k = 1 - 0,00347 \cdot (\varphi - 30) - 0,978 \cdot \left(\frac{1}{r} - 0,05\right)$$

$$t_D = 1 + \frac{1}{2 \cdot \left(1 + e^{\frac{D-60}{10}}\right)}$$

$$x_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2S}$$

$$S = \frac{e - v}{l} = 1,6 \frac{e - v}{l'}$$

Dónde:

$v$ : Mitad del ancho del carril de aproximación (m)

$e$ : Ancho de entrada a la rotonda (m)

$S$ : Agudeza de la entrada

$x_2$ : Constante dependiente de  $e$ ,  $v$  y  $S$

$D$ : Diámetro del círculo inscrito en la rotonda (m)

$t_D$ : Constante dependiente de  $D$

$r$ : Radio de curvatura de la curva de entrada a la rotonda (m)

$\varphi$ : Ángulo de entrada

### 3.3. Características geométricas de la rotonda Villarreal

Esta rotonda está ubicada en el distrito de Miraflores, cuenta con 4 entradas y 6 salidas. Tiene un diámetro promedio de 40 m; además, cuenta con dos carriles de circulación de 5.5 m de ancho cada uno aproximadamente. Asimismo, conecta las avenidas Villarreal, Del Ejército, Hipólito Unanue y la calle 8 de octubre. Las dos últimas vías mencionadas solo funcionan como salidas, mientras que las demás permiten la entrada y salida de vehículos a la rotonda. Por ello, dado que el modelo lineal de Kimber está orientado a calcular la capacidad de una entrada, no se han calculado los parámetros geométricos de las vías 3 y 5, es decir, la calle 8 de octubre y la avenida Hipólito Unanue. En la figura 21, se muestran detalladamente las características geométricas de esta rotonda. Asimismo, en la tabla 8, se muestran sus valores numéricos de manera ordenada. Además, en el anexo A, se adjunta el plano de esta rotonda para su mejor visualización.



Figura 20. Foto de la rotonda Villarreal. Fuente: propia

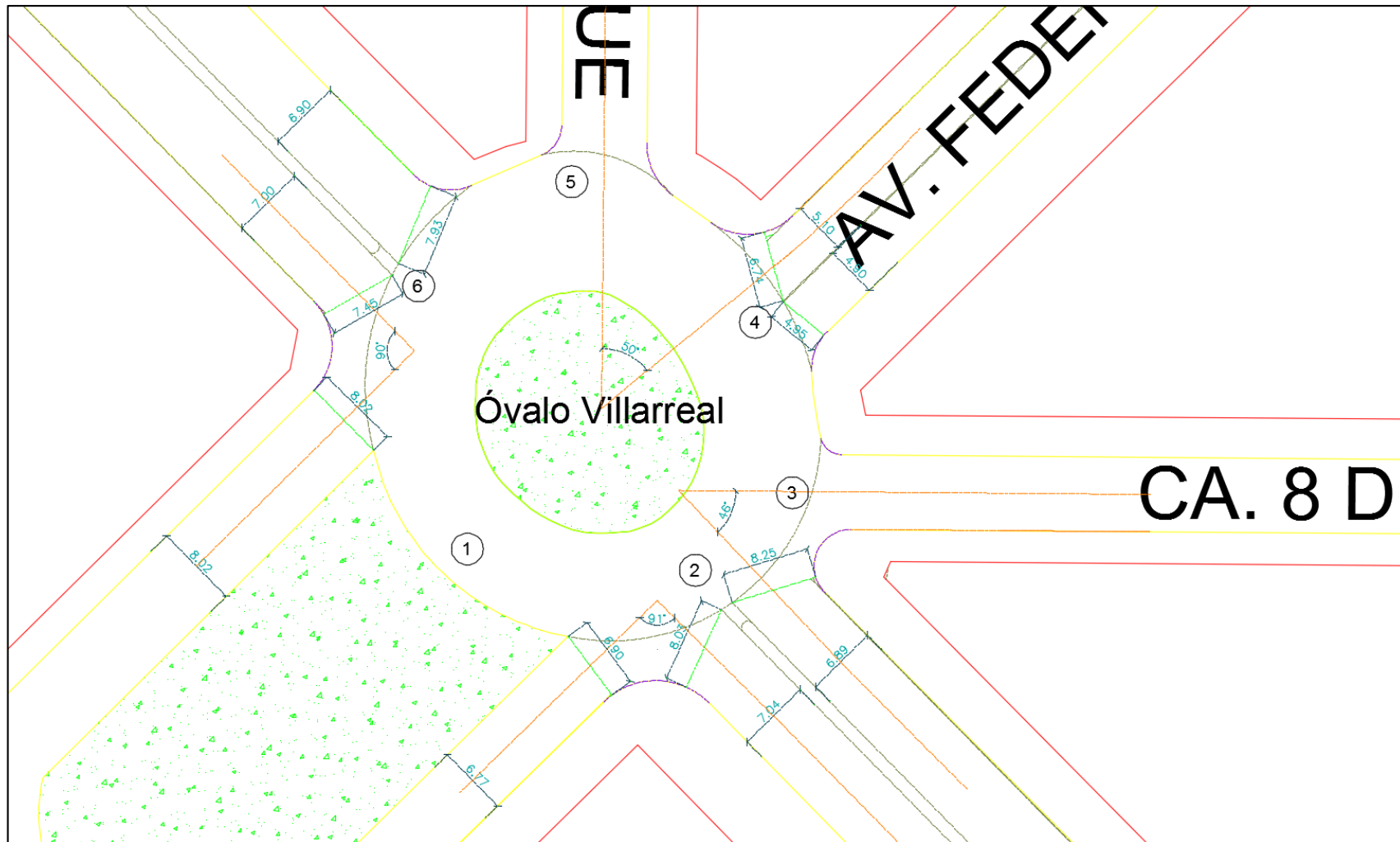


Figura 21. Dibujo de la rotonda Villarreal. Fuente propia

Tabla 8. Parámetros geométricos de la rotonda Villarreal

		Entrada					
	Símbolo	1	2	3	4	5	6
Angulo de entrada (°)	$\phi$	44.5	67		65		45
Radio de curvatura de la curva de entrada (m)	r	7.00	3.50		6.00		6.00
Ancho de entrada a la rotonda (m)	e	6.90	8.25		6.74		7.45
Mitad del ancho del carril de aproximación (m)	v	6.77	6.89		5.10		7.00
Longitud de desarrollo de la curva de entrada (m)	l	0.24	0.45		0.79		0.40
Diámetro inscrito (m)	D	36.37	36.37		44.14		44.14
Parámetros dependientes	tD	1.495	1.497		1.477		1.480
	S	0.5417	3.0222		2.0759		1.1250
	x2	6.832	7.083		5.418		7.138
	k	0.859	0.641		0.764		0.834
	fc	0.743	0.759		0.654		0.762
	F	2070.2	2146.2		1641.8		2163.0

Fuente: propia

Nota: Las celdas sombreadas representan valores que no se encuentran en el rango de valores propuestos por Kimber según se muestra en la Tabla 3.

### 3.4. Características geométricas de la rotonda Los Delfines

Esta rotonda está ubicada en el distrito de Santiago de Surco, cuenta con 5 entradas y 5 salidas; sin embargo, una de ellas tiene acceso restringido debido a que los propietarios colocaron una reja metálica que impide el ingreso y salida directos de los vehículos, siendo la número 4 la que se encuentra restringida. Tiene un diámetro promedio de 38 m; además cuenta con dos carriles de circulación de 4 m de ancho aproximadamente. Asimismo, conecta las avenidas Primavera y Central, y las calles Aldebarán y Los Narcisos. En la figura 23, se muestran detalladamente las características geométricas de esta rotonda. Asimismo, en la tabla 9, se muestran sus valores numéricos de manera ordenada. Además, en el anexo B, se adjunta el plano de esta rotonda para su mejor visualización.



Figura 22. Foto de la rotonda Los Delfines. Fuente propia



Figura 23. Dibujo de la rotonda Los Delfines. Fuente propia

Tabla 9. Parámetros geométricos de la rotonda Los Delfines

	Símbolo	Entrada				
		1	2	3	4	5
Angulo de entrada (°)	$\phi$	47.5	42.5	48	41	9.5
Radio de curvatura de la curva de entrada (m)	r	6.00	5.99	69.74	9.22	31.94
Ancho de entrada a la rotonda (m)	e	6.03	6.88	6.70	3.94	5.85
Mitad del ancho del carril de aproximación (m)	v	5.80	5.92	5.85	2.97	2.90
Longitud de desarrollo de la curva de entrada (m)	l	15.85	0.56	8.99	0.93	9.32
Diámetro inscrito (m)	D	41.21	36.48	36.48	36.48	41.21
Parámetros dependientes	$t_D$	1.483	1.495	1.494	1.481	1.483
	S	0.0145	1.7143	0.0945	1.0430	0.3165
	x2	6.024	6.137	6.565	3.284	4.706
	k	0.825	0.842	0.972	0.905	1.089
	$f_c$	0.687	0.694	0.721	0.516	0.605
	F	1825.1	1859.4	1989.1	995.1	1426.1

Fuente: propia

Nota: Las celdas sombreadas representan valores que no se encuentran en el rango de valores propuestos por Kimber según se muestra en la Tabla 3.

### 3.5. Obtención de la información del flujo vehicular

La recopilación de información de los flujos vehiculares circulantes a través de las rotondas se realizó mediante las cámaras de video de las municipalidades de los distritos de Miraflores y Santiago de Surco. La solicitud de esta información fue realizada a cada uno de los municipios, en virtud de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública. A continuación, se muestran dos imágenes obtenidas de las cámaras cuyas grabaciones fueron solicitadas.



Figura 24. Captura de cámara de la rotonda Villarreal. Fuente: Municipalidad de Miraflores



Figura 25. Captura de cámara de la rotonda Los Delfines. Fuente: Municipalidad de Santiago de Surco

Los días en que se solicitaron las grabaciones fueron los días martes 18, miércoles 19 y jueves 20 de agosto de 2015, pues en estos días laborables se consideran que las condiciones de tráfico fueron normales (Cabrera, 2015). Sobre la base de esto, se procedió a contar la cantidad de vehículos que pasa por cada entrada en intervalos de 15 minutos. Luego, se evaluaron los flujos de entrada de aquellos periodos donde se formaban colas; y, por último, el valor de estos fue multiplicado por 4 para obtener la demanda horaria, con la que fue calculada la capacidad de cada uno de los ramales de entrada. Este procedimiento fue repetido para ambas rotondas y solamente para los periodos que presenten colas medibles. En caso contrario, no se hubiera podido comprobar la validez del modelo de Kimber, ya que no se tendría ningún parámetro de eficiencia para poder comparar.

### 3.6. Cálculo de la capacidad

El cálculo de la capacidad se realizó para la entrada 6 de la rotonda Villarreal y la entradas 1,3 y 5 de la rotonda Los Delfines, pues se registraron longitudes de colas significativas. Se utilizaron las características geométricas y la información del flujo vehicular de cada una de ellas, según las siguientes fórmulas.

$$Q_e = k \cdot (F - f_c \cdot Q_c)$$

$$F = 303 \cdot x_2$$

$$f_c = 0,210 \cdot t_D \cdot (1 + 0,2 \cdot x_2)$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de entrada a la rotonda (pcu/h)

$Q_c$ : Flujo circulante (pcu/h)

F: Punto de intersección de la recta de regresión con el eje de ordenadas (pcu/h)

$f_c$ : Pendiente de la recta de regresión

### 3.7. Validación del modelo

Debido a que se tuvo que comprobar si la rotonda realmente tiene la capacidad obtenida por el modelo lineal de Kimber, fue necesario establecer un parámetro de eficiencia, de manera que se obtengan resultados coherentes entre el grado de saturación obtenido y las longitudes de cola de los ramales de entrada para la validación del modelo.

La fórmula planteada para la longitud de cola al final del periodo de análisis incluye parámetros tales como la capacidad y el grado de saturación. Así, se puede corroborar mediante éste parámetro si la capacidad utilizada es adecuada para la rotonda, pues además se puede verificar visualmente si la longitud de cola es parecida a la obtenida con la fórmula. Esta se muestra a continuación:

$$L_t = \frac{1}{2} (\sqrt{U_L^2 + V_L} - U_L)$$

Donde  $U_L$  y  $V_L$  se calculan según:

$$U_L = \frac{(1-x)(Qt)^2 + (1-L_o)Qt - 2(1-c)(L_o + xQt)}{Qt + (1-c)}$$

$$V_L = \frac{4(L_o + xQt)[Qt - (1-c)(L_o + xQt)]}{Qt + (1-c)}$$

Dónde:

$x$ : Grado de saturación de la vía

$Q$ : Capacidad de la intersección (veh/h)

$c$ : Parámetro en función del tiempo de servicio

$L_o$ : Longitud de la cola al inicio del periodo de análisis

$t$ : Periodo en el que se asume que la capacidad es igual a la demanda (h)

Es importante mencionar que con la fórmula de capacidad de Kimber se obtienen capacidades en pcu/h. Sin embargo, la fórmula transformada requiere que la capacidad sea transformada a veh/h. Para ello, se usa la siguiente relación.

$$\mu = \frac{\mu'}{(1-p_h) + \alpha p_h}$$

Dónde:

$\alpha$ : factor de conversión de *veh* a *pcu* para vehículos pesados ( $\alpha = 2$ )

$p_h$ : porcentaje de vehículos pesados

$\mu'$ : capacidad de entrada en pcu/h

$\mu$ : capacidad de entrada en veh/h

## Capítulo 4: Resultados

Se agruparon los valores de colas obtenidas en campo y las calculadas con la expresión de Whiting. Para el cálculo de longitud de colas se usó un porcentaje promedio de 95% de vehículos pesados para la conversión de la capacidad a vehículos por hora. A continuación, se muestran los resúmenes de los flujos vehiculares para las entradas analizadas de cada rotonda de estudio.

### 4.1. Características del tráfico de la rotonda Villarreal

Tabla 10. Resumen de flujos vehiculares y colas de la rotonda Villarreal

Periodo (h)	Entrada	Demanda (veh/h)	Flujo Circulante (veh/h)	Cola Inicial (veh)	Cola final (veh)	Capacidad de entrada (veh/h)	Grado de saturación	Cola calculada (veh)
07:00 - 07:15 19/08	6	572	16	1	0	1781	0.32	1
07:00 - 07:15 18/08	6	588	128	0	2	1722	0.34	1
18:15 - 18:30 20/08	6	1108	36	1	1	1781	0.62	2
07:45 - 08:00 20/08	6	1560	68	3	2	1760	0.89	8
18:15 - 18:30 19/08	6	1576	112	1	2	1732	0.91	9
07:45 - 08:00 19/08	6	1672	84	4	0	1750	0.96	14
07:15 - 07:30 18/08	6	1700	100	2	2	1740	0.98	17
07:30 - 07:45 20/08	6	1780	76	2	3	1755	1.01	25
18:30 - 18:45 20/08	6	1848	48	1	2	1773	1.04	32
18:30 - 18:45 18/08	6	1888	20	3	1	1791	1.05	38
18:15 - 18:30 18/08	6	1868	68	2	3	1760	1.06	39
07:15 - 07:30 20/08	6	1894	164	2	2	1699	1.11	56

Fuente: propia

Como se puede apreciar en la tabla 10, los grados de saturación observados en la rotonda Villarreal varían desde 0.32 hasta 1.11, lo cual refleja que las condiciones de circulación son variables según la hora y el día en los que éstas son analizadas. Asimismo, la capacidad de entrada de la entrada número 6 oscila entre 1699 veh/h y 1781 veh/h, presenta una media de 1754 veh/h, una desviación estándar de 26.98 veh/h y un coeficiente de variación de 1.54%. La menor demanda registrada en la entrada 6 se dio en el periodo de 07:00h - 07:15h del día miércoles 19 de agosto. Mientras que la mayor intensidad de flujo se dio en el periodo de 07:15h – 07:30h del día 20 de agosto. Por otro lado, se observa que las colas al final del periodo de estudio no superan los 3 vehículos, lo cual probablemente es consecuencia del reducido flujo que circula en frente de la entrada 6.

También, es importante mencionar que la entrada 6 tiene una longitud de desarrollo de curva de entrada que no se encuentra dentro del rango sugerido por Kimber. Sin embargo, se utilizó debido a que Kimber señala que los parámetros más importantes son el ancho de entrada y la agudeza de la entrada. De esta manera, el valor de “I” es importante en medida que éste afecta a “S”, cuyo valor de 1.125 sí se encuentra en el rango sugerido, por lo que el modelo aún es aplicable a esta entrada.

#### 4.2. Características del tráfico de la rotonda Los Delfines

Tabla 11. Resumen de flujos vehiculares y colas de la rotonda Los Delfines

Periodo (h)	Entrada	Demanda (veh/h)	Flujo Circulante (veh/h)	Cola Inicial (veh)	Cola final (veh)	Capacidad de entrada (veh/h)	Grado de saturación	Cola calculada (veh)
19:45 - 20:00 18/08	5	364	628	0	1	1140	0.32	1
19:30 - 19:45 19/08	3	672	348	0	2	1690	0.40	1
20:15 - 20:30 20/08	5	472	584	0	1	1169	0.40	1
18:15 - 18:30 18/08	5	412	836	0	2	1003	0.41	1
18:00 - 18:15 18/08	3	660	488	0	0	1592	0.41	1
06:15 - 06:30 18/08	5	492	564	0	1	1182	0.42	1
13:00 - 13:15 18/08	5	408	872	0	1	979	0.42	1
18:30 - 18:45 20/08	3	696	440	0	1	1626	0.43	1
10:15 - 10:30 18/08	5	416	1012	0	1	887	0.47	1
08:30 - 08:45 20/08	5	392	1120	0	3	816	0.48	1
09:00 - 09:15 20/08	3	1020	200	0	0	1794	0.57	2
10:30 - 10:45 18/08	1	708	568	1	0	1184	0.60	2
10:00 - 10:15 18/08	1	788	440	0	0	1257	0.63	2
08:15 - 08:30 18/08	1	780	512	0	1	1216	0.64	2
07:45 - 08:00 18/08	1	792	588	0	1	1173	0.68	3
08:45 - 09:00 18/08	5	520	1196	0	1	766	0.68	3
08:00 - 08:15 18/08	1	892	480	1	0	1234	0.72	3
07:15 - 07:30 18/08	1	956	420	11	4	1268	0.75	4
09:00 - 09:15 18/08	1	948	512	1	1	1216	0.78	4
09:45 - 10:00 18/08	1	868	700	0	0	1109	0.78	4
08:30 - 08:45 18/08	1	984	540	1	0	1200	0.82	5
12:30 - 12:45 18/08	1	976	584	0	0	1175	0.83	5
07:00 - 07:15 20/08	1	1052	492	0	4	1227	0.86	6
18:45 - 19:00 18/08	5	1060	548	0	7	1195	0.89	7
13:00 - 13:15 20/08	1	1160	408	0	9	1275	0.91	8
07:00 - 07:15 18/08	1	1276	504	17	11	1220	1.05	38
09:00 - 09:15 19/08	1	1184	680	0	0	1121	1.06	26
08:45 - 09:00 19/08	1	1208	680	0	0	1121	1.08	30
06:45 - 07:00 18/08	1	1132	848	0	17	1025	1.10	33
18:00 - 18:15 19/08	1	1464	740	0	9	1087	1.35	93

Fuente: propia

Como se puede apreciar en la tabla 11, los grados de saturación observados en la rotonda Los Delfines varían desde 0.32 hasta 1.35; sin embargo, los grados de saturación mayores a 1 solo fueron registrados en la entrada 1. Por otro lado, los menores grados de saturación fueron registrados en las entradas 3 y 5. El comportamiento del tráfico presente en dichas entradas probablemente se deba a las intensidades de los flujos de entrada, pero también está influenciado por la agudeza de la entrada. En efecto, Kimber, reconoce que los parámetros geométricos más importantes son el ancho y la agudeza de la entrada. De esta manera, las entradas 3 y 5 presentan un mayor valor de  $S$ , lo cual mejora la circulación, pues la capacidad tiende a incrementarse.

Respecto al flujo circulante, el mínimo valor se registró en el periodo de 07:15h – 07:30h del martes 18 de agosto. Este valor es considerablemente mayor a los flujos circulantes registrados en la rotonda Villarreal. Asimismo, el máximo flujo circulante se obtuvo en el periodo de 08:45h – 09:00h del martes 18. No obstante, se puede apreciar que los grados de saturación no alcanzan valores cercanos a 1.

#### **4.3. Comparación de longitudes de cola**

En lo que respecta a las longitudes de cola calculadas y medidas para grados de saturación cercanos a 0.9 se observa que la diferencia entre las colas medidas y las calculadas es pequeña. En cambio, para condiciones de sobresaturación, la diferencia entre las colas finales observadas y las colas calculadas se hace evidentemente mayor. En la figura 26, se muestran de manera gráfica estos resultados.

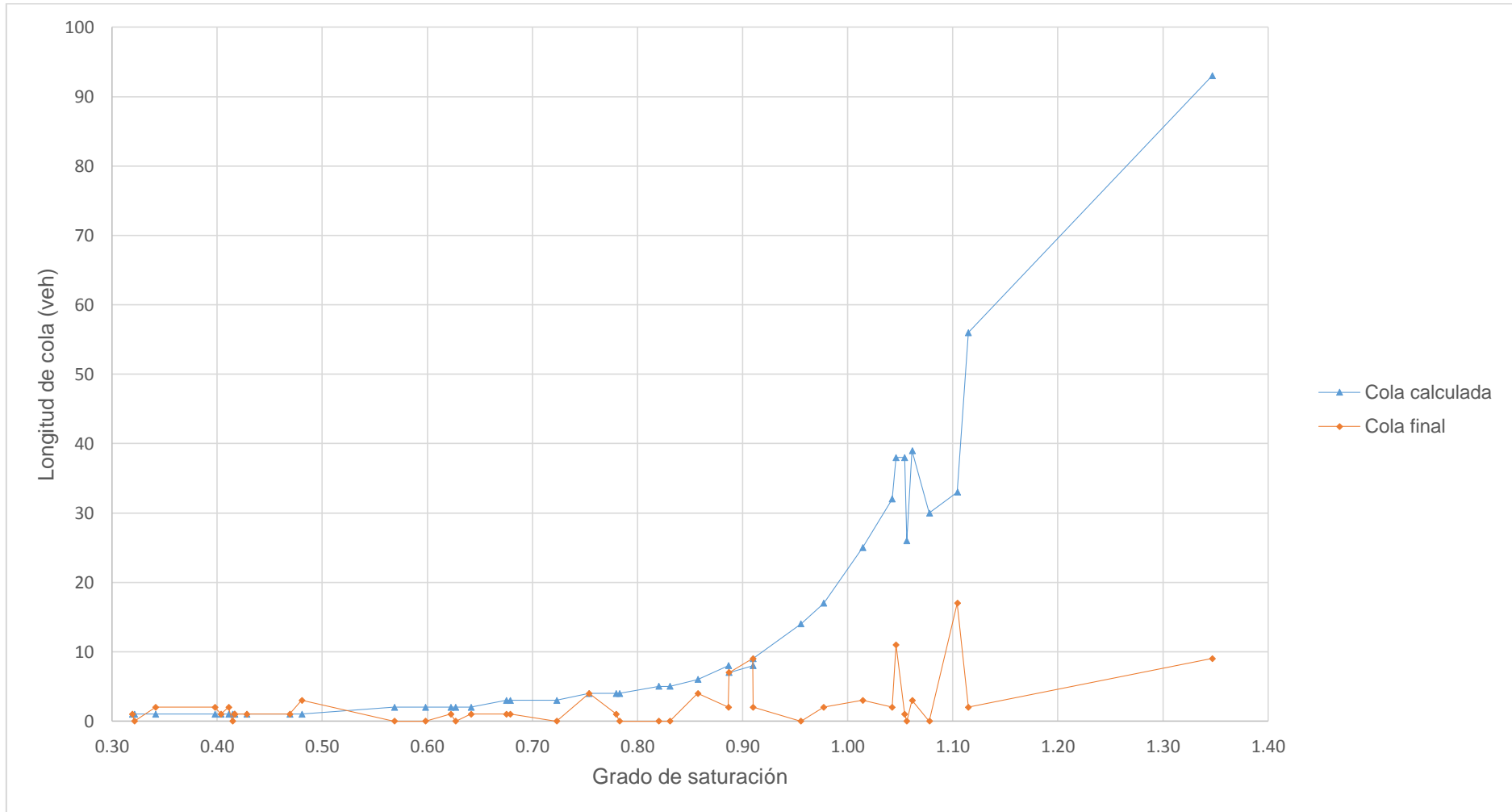


Figura 26. Gráfico del grado de saturación versus longitud de cola. Fuente: propia

En efecto, como se puede apreciar en la figura anterior, las colas calculadas tienden a ser sobreestimadas para grados de saturación cercanos y mayores a la unidad. Esta afirmación es respaldada por la figura 27, donde se muestra la curva de la ecuación transformada de Whiting. Ésta trata de compatibilizar los resultados de la teoría del estado estable y la teoría determinística de formación de colas, ya que en realidad no se forman colas infinitas, como se muestra la curva del estado estable, ni tampoco se tiene una cola del mismo tamaño que al inicio del periodo de estudio ( $L_0$ ), como muestra la recta de la teoría determinística.

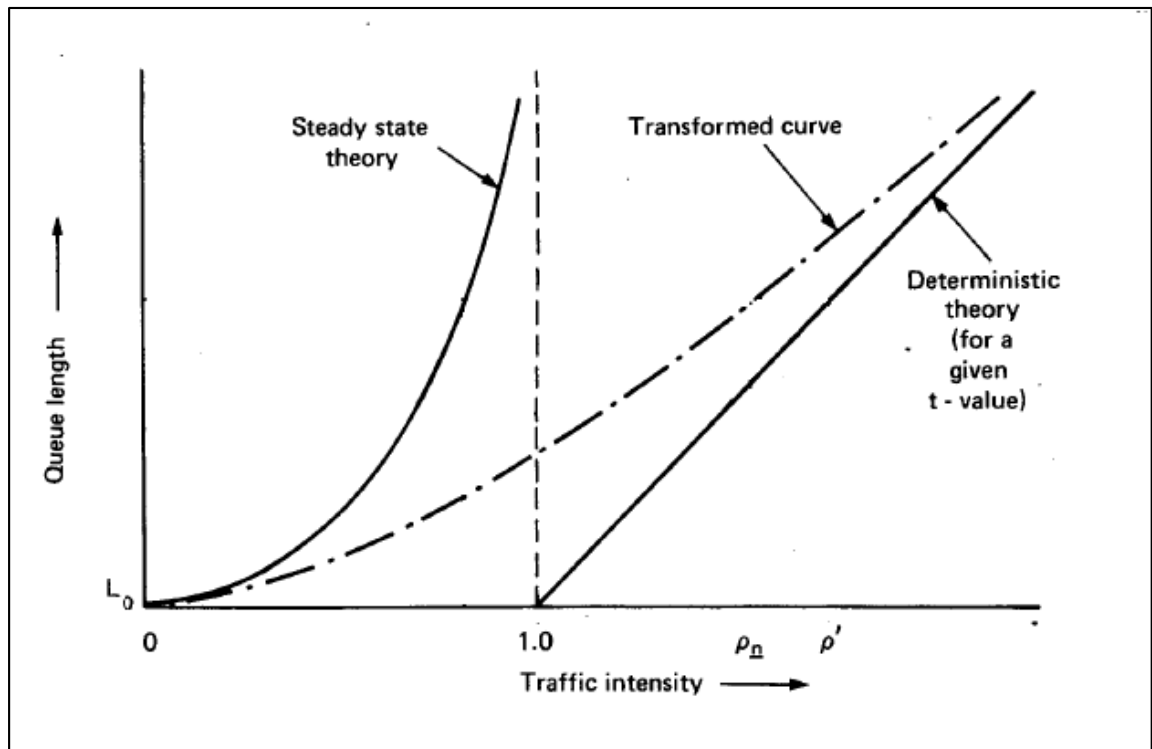


Figura 27. Función transformada de Whiting. Fuente: Kimber & Hollis, 1979

Por ello, debido a que aparentemente la función transformada de Whiting no refleja el comportamiento real del tráfico para grados de saturación elevados, se agruparán nuevamente los datos en un gráfico, pero dejando de lado a los eventos con grado de saturación mayores a 0.9.

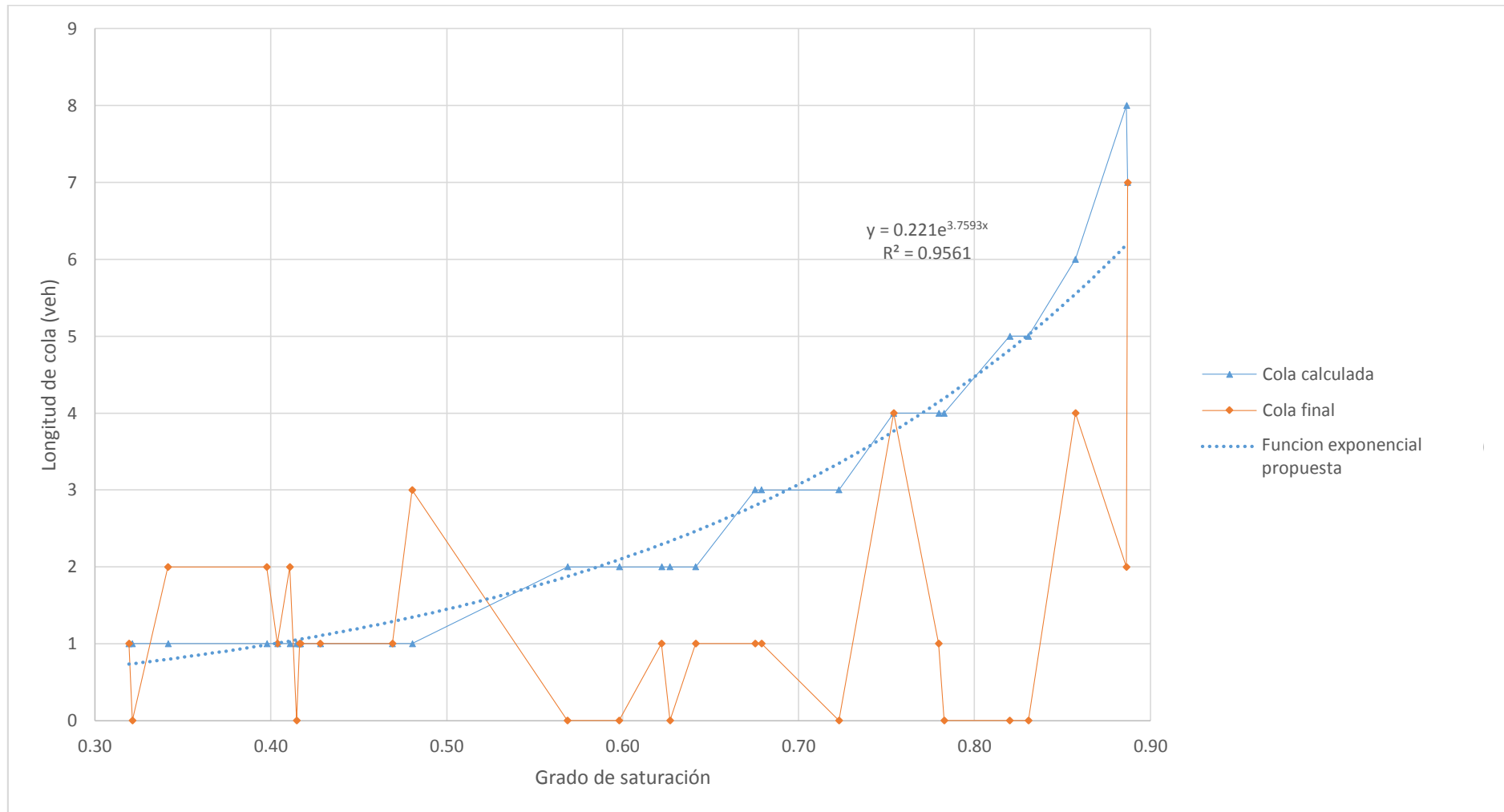


Figura 28. Gráfico del grado de saturación versus longitud de cola para grados de saturación menores a 0.9. Fuente: propia

Como se puede apreciar en la figura 28, el comportamiento de las colas calculadas reflejaría de manera cercana la forma creciente de la función transformada. Además, según el coeficiente de determinación,  $R^2 = 0.96$ , muy cercano a la unidad, se la podría representar con bastante cercanía por la siguiente función exponencial.

$$L = 0.221e^{3.7593\rho}$$

Dónde:

$\rho$ : grado de saturación

L: longitud de cola (veh)

En el gráfico anterior, las colas medidas en campo parecen no tener relación con las calculadas, aunque es razonable que se observen comportamientos distantes de los modelos teóricos debido a la naturaleza estocástica de la formación de colas. En efecto, la longitud de colas es altamente variable según el día y la hora en que éstas sean medidas, por lo podrían realizarse más mediciones para comprobar la validez de las observaciones (Transport Research Laboratory, 2004).

#### 4.4. Randomization test

Para determinar si las colas calculadas son similares a las medidas en campo, los datos recopilados son evaluados con la prueba no paramétrica denominada *Randomization Test*, la cual simula una serie de eventos para comprobar qué tan raros, en términos estadísticos, son los eventos con los que se trabaja. Esta fue realizada mediante la página web StatKey. Para ello, se estudiaron las colas medidas y las colas calculadas como dos grupos de datos independientes.

Así, se definen la hipótesis nula de igualdad de medias y alternativa para la diferencia de las mismas.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

Dónde:

Ho: Hipótesis nula

Ha: Hipótesis alternativa

$\mu_1$ : Media de la población de colas medidas

$\mu_2$ : Media de la población de colas calculadas

Se confirmará que las medias son iguales, con un 95% de nivel de confianza, si la media de la muestra original se encuentra dentro del intervalo de confianza generado por el *randomization test*. El intervalo de confianza define los límites superior e inferior, en los cuales debe estar contenida la diferencia de medias de las muestras originales para poder afirmar que son estadísticamente equivalentes.

A continuación, se muestran los dos grupos de datos (colas finales y calculadas) con los que se realizó el *randomization test*.

Tabla 12. Parámetros estadísticos de las colas medidas y calculadas.

N°	Cola final	Cola calculada
1	1	1
2	0	1
3	2	1
4	2	1
5	1	1
6	2	1
7	0	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	3	1
13	0	2
14	0	2
15	1	2
16	0	2
17	1	2
18	1	3
19	1	3
20	0	3
21	4	4
22	1	4
23	0	4
24	0	5
25	0	5
26	4	6
27	2	8
28	7	7
<b>Media</b>	1.321	2.643
<b>Desviación Estándar</b>	1.588	2.022

Fuente: propia

A partir de la diferencia de las medias de las dos muestras,  $-1.322$ , se puede analizar mediante *randomization test* si está contenida en el intervalo de confianza definido.

### Original Sample

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = -1.322, n_1 = 28, n_2 = 28$$

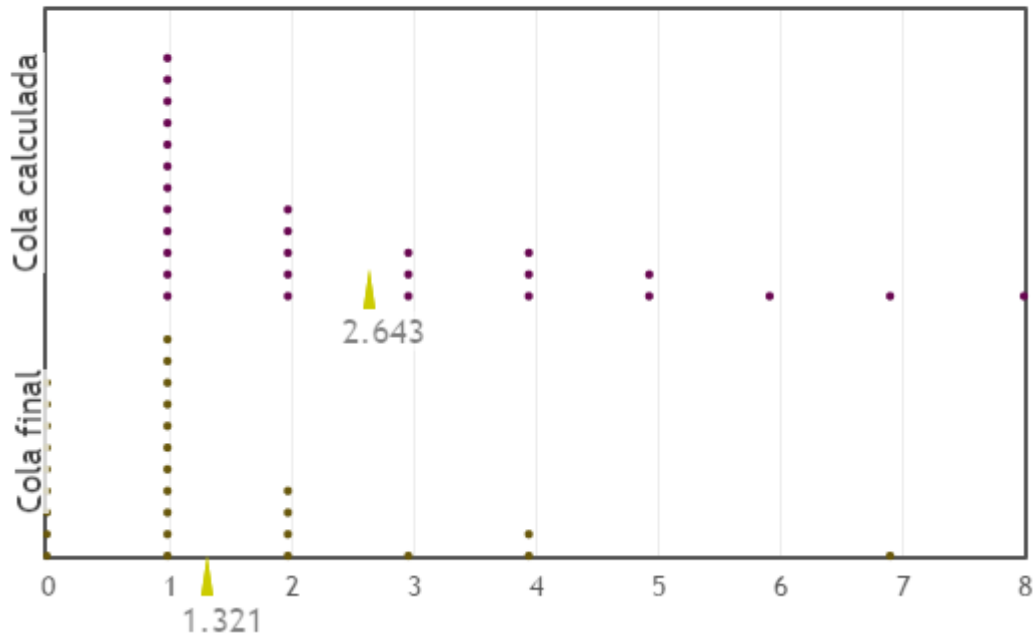


Figura 29. Muestra original de datos para el *randomization test*. Fuente: propia (elaborado en Statkey)

Es importante mencionar que a pesar de que los valores contenidos en las muestras no han sido obtenidos para las mismas entradas, los mismos intervalos de tiempo, ni las mismas rotondas, se realizó el *randomization test* para evaluar la rareza estadística de los datos obtenidos. En consecuencia, no fue relevante que los datos no fueran obtenidos en las mismas condiciones, pues no se buscó analizar la equivalencia entre ellos como valores correspondientes entradas e intervalos específicos, sino como valores pertenecientes a una muestra conformada por datos de campo y a otra de valores calculados teóricamente.

Cabe resaltar que la diferencia de medias,  $-1.322$ , de las muestras originales es un valor importante, pues si éste valor pertenece al intervalo de confianza generado por el test, se afirmará una igualdad de medias con cierto nivel de confianza. Luego, a partir de los datos de colas finales y colas calculadas (muestras originales), se generaron 10000 pares de muestras aleatorias, cuya representación gráfica se muestra a continuación.

Randomization Dotplot of  $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ , Null hypothesis:  $\mu_1 = \mu_2$

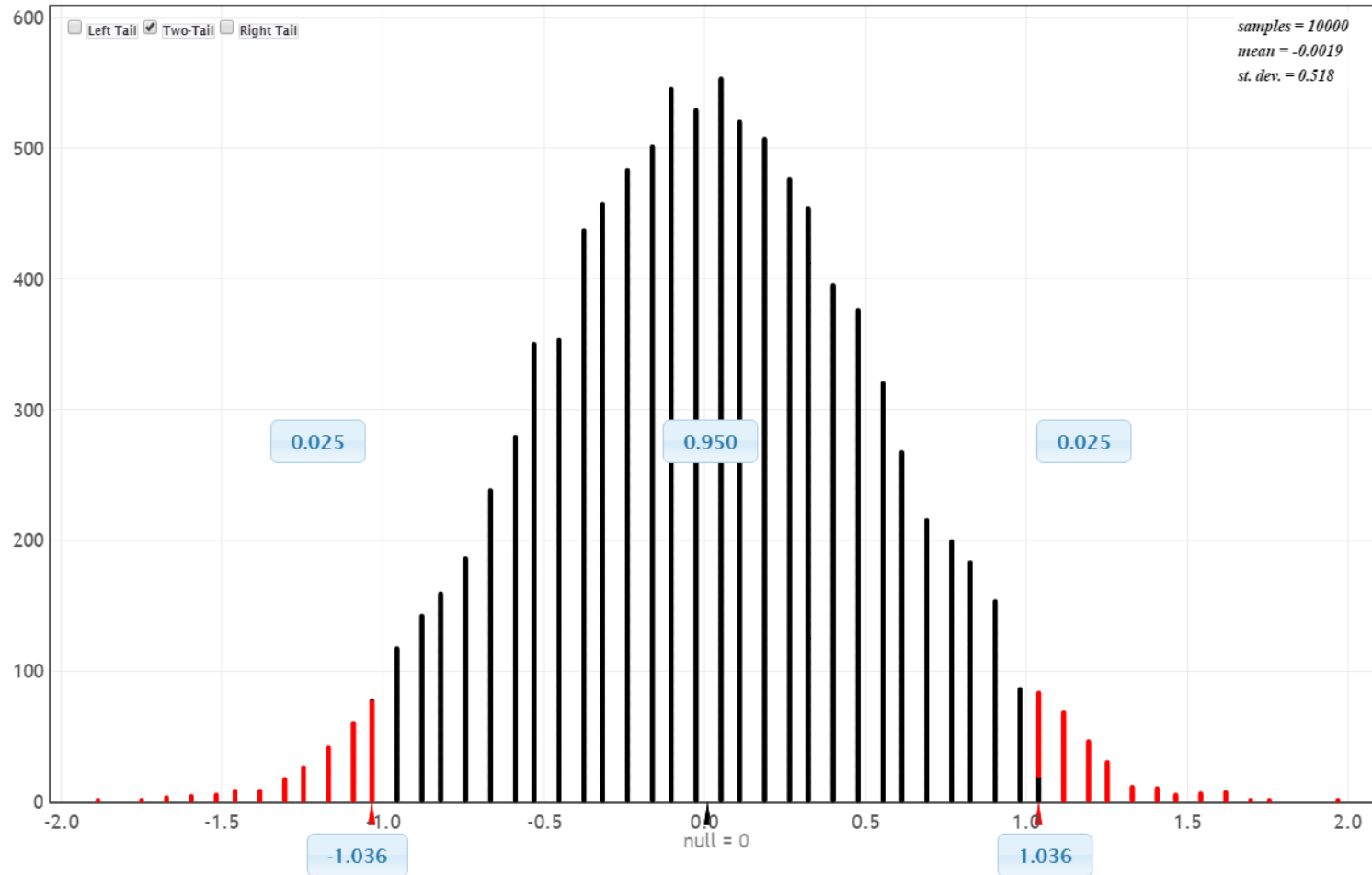


Figura 30. Conjunto de 10000 pares de muestras generadas a partir de las muestras originales. Fuente: propia (elaborado en Statkey)

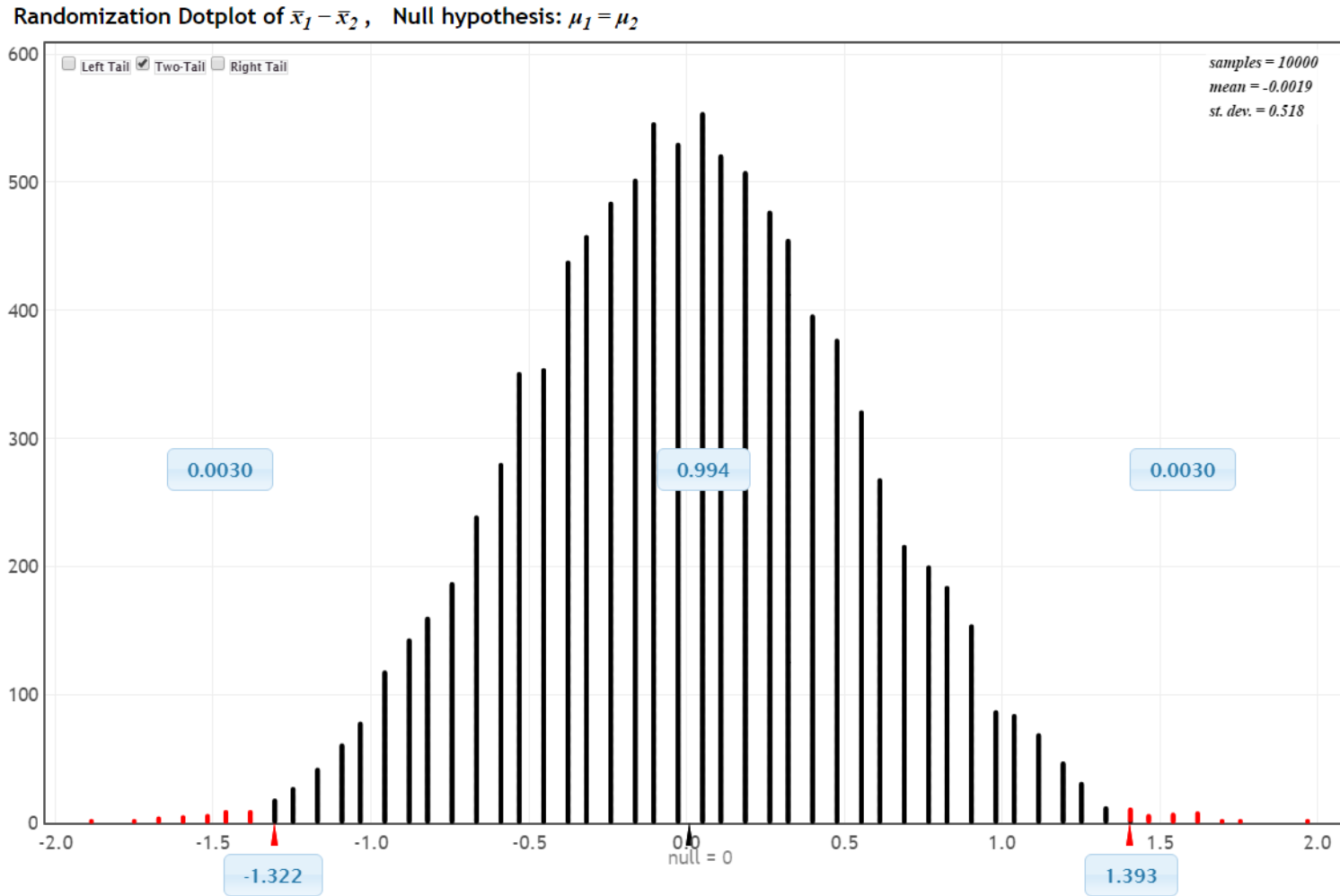


Figura 31. Evaluación del porcentaje de datos menor que la diferencia de medias de las muestras originales. Fuente: propia (elaborado en Statkey)

Como se puede apreciar en la figura 30, el intervalo de confianza generado no contiene el valor de -1.322, lo cual refleja un comportamiento estadístico raro de las muestras originales, pues solamente un 0.3% (figura 31) de las diferencias de medias es menor a este valor. En consecuencia, se puede afirmar, con un 95% de confianza que las medias de los dos grupos, de datos; es decir, colas finales y colas calculadas, son distintas. En efecto, se puede afirmar que las colas medidas y calculadas son estadísticamente diferentes y se confirma la aparente falta de relación entre ellas.

#### 4.5. Teoría probabilística de formación de colas

Por otro lado, la falta de relación entre las colas finales y las calculadas puede explicarse por la teoría probabilística de formación de colas. Esta sostiene que es posible calcular la probabilidad de formación de colas de una determinada longitud (L) al final de un periodo establecido ( $t - t_i$ ) si se conocen la longitud de cola al inicio, la capacidad de entrada y el grado de saturación. Para su elaboración se usó el modelo de arribos aleatorios, servicio aleatorio y un canal de servicio (modelo M/M/1). Es importante mencionar que esta fórmula es aplicable, pues se conoce con certeza cuál es la longitud inicial de la cola en cada uno de los periodos analizados. La expresión para el cálculo de las probabilidades de formación de colas se presenta a continuación.

$$P_n^m(t) = P_n + \frac{2\rho^{1/2(n-m)}}{N+1} \sum_1^N \frac{1}{x_i} \left\{ \text{sen} \frac{im\pi}{N+1} - \rho^{1/2} \text{sen} \frac{i(m+1)\pi}{N+1} \right\} \left\{ \text{sen} \frac{in\pi}{N+1} - \rho^{1/2} \text{sen} \frac{i(n+1)\pi}{N+1} \right\} e^{-\mu x_i(t-t_i)}$$

$$x_i = 1 + \rho - 2\rho^{1/2} \cos \frac{i\pi}{N+1}$$

$$P_n = [(1-\rho)/(1-\rho^{N+1})]\rho^n$$

Dónde:

$P_n^m(t)$ : Probabilidad de que se forme una cola de “m” vehículos en el tiempo  $t_i$  dada una cola inicial “n” en el tiempo t.

$P_n$ : Probabilidad de equilibrio de tener n vehículos en cola, es decir, la probabilidad cuando  $t = \infty$  con un grado de saturación constante

n: número de vehículos al inicio del periodo de análisis

m: número de vehículos al final del periodo de análisis

$\rho$ : grado de saturación

$\mu$ : capacidad de entrada (veh/h)

t: tiempo final del periodo de análisis

$t_i$ : tiempo al final del periodo de análisis

$\mu(t - t_i)$ : producto de capacidad por tiempo de análisis (veh)

N: máximo número de vehículos permitidos (500)

Según la fórmula anterior, se pudieron calcular las probabilidades de formación de colas de los eventos registrados. Estas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13. Probabilidad de formación de colas

Entrada	Cola Inicial	Cola final	Capacidad de entrada	Grado de saturación	Cola calculada	Capacidad por Tiempo	Probabilidad de formación de cola calculada
3	0	2	1690	0.40	1	422.5	23.95%
3	0	0	1592	0.41	1	398	24.27%
3	0	1	1626	0.43	1	406.5	24.48%
5	0	1	1140	0.32	1	285	21.73%
5	0	1	1169	0.40	1	292.25	24.07%
5	0	2	1003	0.41	1	250.75	24.20%
5	0	1	1182	0.42	1	295.5	24.30%
5	0	1	979	0.42	1	244.75	24.31%
5	0	1	887	0.47	1	221.75	24.90%
5	0	3	816	0.48	1	204	24.96%
6	1	0	1781	0.32	1	445.25	21.80%
6	0	2	1722	0.34	1	430.5	22.49%
1	1	0	1184	0.60	2	296	14.38%
1	0	0	1257	0.63	2	314.25	14.66%
1	0	1	1216	0.64	2	304	14.75%
3	0	0	1794	0.57	2	448.5	13.95%
6	1	1	1781	0.62	2	445.25	14.63%
1	0	1	1173	0.68	3	293.25	10.00%
1	1	0	1234	0.72	3	308.5	10.47%
5	0	1	766	0.68	3	191.5	10.05%
1	11	4	1268	0.75	4	317	7.95%
1	1	1	1216	0.78	4	304	8.14%
1	0	0	1109	0.78	4	277.25	8.16%
1	1	0	1200	0.82	5	300	6.68%
1	0	0	1175	0.83	5	293.75	6.71%
1	0	4	1227	0.86	6	306.75	5.69%
5	0	7	1195	0.89	7	298.75	4.91%
6	3	2	1760	0.89	8	440	4.43%

Fuente: propia

Los valores de probabilidad mostrados en la tabla 13 tienen una tendencia decreciente a medida que el grado de saturación se incrementa. En efecto, éstos no sobrepasan el 10% para grados de saturación mayores a 0.7. Por otro lado, Kimber & Hollis (1979), elaboraron un gráfico para un grado de saturación igual a 0.9 y productos de capacidad por tiempo de 10, 20, 50 y 100 vehículos (curvas A, B, C y D respectivamente). Éste se muestra a continuación.

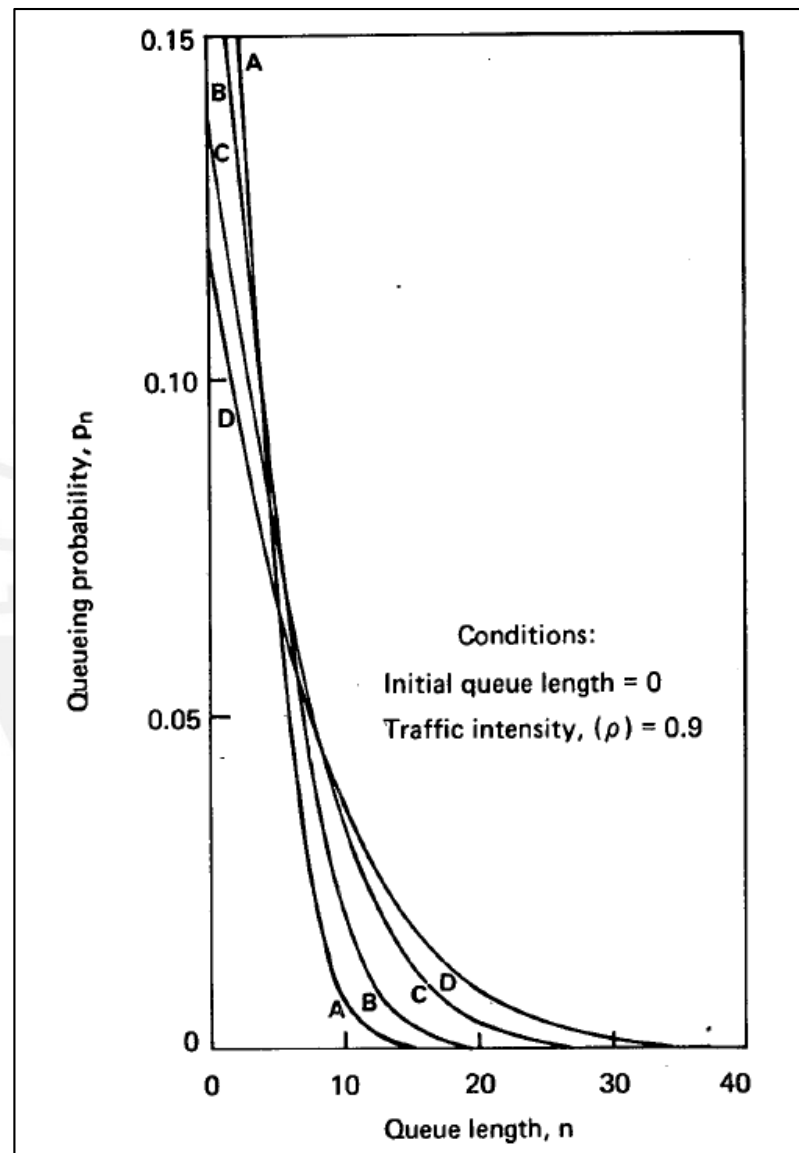


Figura 32. Probabilidad de formación de cola versus longitud de cola. Fuente: Kimber & Hollis, 1979

En la figura anterior se puede comprobar la tendencia decreciente de la probabilidad de formación de colas a medida que su longitud se incrementa. Es importante resaltar que a partir de 10 vehículos, las probabilidades no superan el 5%, lo cual probablemente sea el motivo de que las colas medidas en campo no coincidan con las calculadas con la función transformada.

## Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Durante la visualización de los videos del tráfico de las dos rotondas se observó que los vehículos no cumplen, en su mayoría, con la regla actual de prioridad de tránsito en rotondas. Es decir, los vehículos que se aproximan al carril de entrada no ceden el paso a los vehículos circulantes. Pese a esto, Kimber desarrolló su modelo de capacidad independientemente del funcionamiento de éstas, ya que en los cálculos de regresión se usaron datos de rotondas de los tipos convencional y de prioridad de paso. Por ello, el comportamiento de los conductores no afecta el cálculo de la capacidad de entrada. Es decir, su cálculo no depende de que los usuarios respeten la regla de prioridad o no.

Con respecto a la metodología utilizada, es importante mencionar que no siempre se tendrán cámaras de video disponibles en las zonas de estudio. En caso contrario, es importante tener en cuenta que se necesitaría una cantidad considerable de personas para registrar las condiciones del tráfico de manera efectiva. En cambio, el modelo lineal de Kimber toma en cuenta la configuración geométrica de la rotonda a profundidad, por lo que fue necesario un levantamiento topográfico para cada una de las rotondas de estudio. Esto no siempre será determinante para un estudio de capacidad, pues, según la literatura, existen modelos alternativos que solamente requieren el número de carriles, por ejemplo. Por otro lado, los modelos teóricos basados en la teoría de brechas demandan otros recursos, tales como la medición del tiempo de brecha crítica y el tiempo de seguimiento, los cuales son obtenidos con metodologías que escapan de los objetivos del presente trabajo.

Para la evaluación de las medidas de eficiencia, se consideró que la longitud de colas era un parámetro adecuado y con relativa facilidad para ser medido. Sin embargo, las demoras también pudieron haberse estudiado a partir de los videos provistos por las municipalidades, pero debido a que inicialmente no se tenía la certeza de contar con ellos, se definió que las longitudes de cola iban a usarse para la validación del modelo.

Cuando se ejecuta la medición del flujo vehicular, Kimber sostiene que los vehículos deben ser clasificados solamente en dos categorías: vehículos livianos y vehículos pesados. Esto probablemente sea una clasificación muy alejada de la realidad limeña debido a la gran cantidad de tipos de vehículos que posee su parque automotor, ya que el tráfico no se ve afectado de igual manera por una

*coaster*, un bus o un tráiler. Además, no se considera que las motos, bicicletas y flujos peatonales afecten de manera relevante el funcionamiento de la rotonda.

Por otro lado, Kimber sostiene que la capacidad de una entrada disminuye a medida que el flujo circulante se incrementa. Sin embargo, es importante mencionar que si bien la cantidad de vehículos capaces de entrar al sistema disminuirá, esto no significa que definitivamente la entrada alcanzará grados de saturación elevados. En efecto, estos dependen de la demanda de vehículos así como de la capacidad, no del flujo circulante. No obstante, si este es demasiado elevado, la capacidad podría disminuir tanto, que el grado de saturación crezca en demasía. Asimismo, Kimber señala que la capacidad de una entrada no puede ser negativa, sino como mínimo 0 veh/h. Esto se da cuando el flujo circulante es mayor que el cociente entre  $F$  y  $f_c$ .

Por lo mencionado anteriormente, el contraste entre las colas medidas y calculadas probablemente se deba a que las características geométricas de las rotondas estudiadas difieren de manera significativa de las estudiadas por Kimber. Asimismo, debido a la baja probabilidad de formación de colas (menor a 10%) para grados de saturación mayores a 0.7 se puede explicar la diferencia entre lo observado y lo calculado. Sin embargo, el resultado del *randomization test* señala que la diferencia de medias entre las muestras originales es menor al límite inferior del intervalo de confianza obtenido. En consecuencia, la hipótesis alternativa del análisis es verdadera y se puede afirmar con un 95% de confianza que las medias de las muestras son distintas. Por ello, según los resultados obtenidos, el modelo lineal de Kimber no es aplicable para las rotondas Villarreal ni Los Delfines.

Si bien es cierto, los resultados muestran que el modelo de capacidad de Kimber no es aplicable para los casos de estudio, esto no descalifica su uso para otras rotondas de Lima. No obstante, los modelos determinísticos exigen que ciertas condiciones sean cumplidas para su uso, lo cual restringe su uso a escenarios que no necesariamente son similares a los que se usaron para la calibración del modelo. Por ello, resulta conveniente sugerir una alternativa que permita determinar la capacidad de una rotonda, así como los parámetros de eficiencia y características del tráfico que midan sus condiciones de servicio. Ésta alternativa es la microsimulación vehicular, pues ella permite implementar en el modelo muchas características que el modelo de capacidad de Kimber no toma en cuenta. Por ejemplo, permite incluir los flujos peatonales en cada una de las entradas, permite la inclusión de los diversos tipos de vehículos que no fueron incluidos en los flujos vehiculares y permite modelar la geometría de la rotonda de manera integral.

## Referencias

- Asociación Automotriz del Perú. (2011). *Moviendo al Perú: visión del transporte nacional*. Lima: Walter H. Wust Ediciones S.A.C.
- Bovy, P., De Aragao, P., Harmann, A., & Dietrich, K. (1991). *Guide Suisse des Giratoires*. Lausanne: Institut des Transports et de Planification.
- BPS. (2015). *Software für die Verkehrstechnik*. Obtenido de BPS verkehr: <http://www.bps-verkehr.de/>
- Brilon, W., & Stuwe, B. (1990). Capacity and Safety of Roundabouts in West Germany. *Proceedings 15th Australian Road Research Board Conference* (págs. 275-281). Darwin: ARRB Group Limited.
- Brilon, W., Koenig, R., & Troutbeck, R. (1997a). *Useful estimation procedure for critical gaps*. Bochum: Instituto de Transporte e Ingeniería de Tráfico.
- Brilon, W., Stuwe, B., & Drews, O. (1993). *Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplaetzen*. Bochum: Universidad de Ruhr de Bochum.
- Brilon, W., Wu, N., & Bondzio, L. (1997b). Unsignalized Intersections in Germany - a State of the Art 1997. *Third international symposium on Intersections without traffic signals*, (págs. 61-70). Portland Oregon.
- Cabrera, F. (2015). *Apuntes de clase del curso Ingeniería de Tráfico*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima.
- Cerema. (2014). *Direction technique territoires et ville La Boutique*. Obtenido de <http://www.CERTU-catalogue.fr/>
- CERTU. (1999). *Guide des carrefours urbains*. Lyon: Collections du Certu.
- Chung, E., Young, W., & Akçelik, R. (1992). Comparison of roundabout capacity and delay estimates from analytical and simulation models. *Proceeding 16th ARRB Conference* (págs. 369-385). Perth: ARRB Group Limited.
- Darder, V. (2005). *Funciones de las rotondas urbanas y requerimientos urbanísticos de organización*. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fernández, R., & Dextre, J. (2011). *Elementos de la Teoría del tráfico vehicular*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

- FGSV. (2006). *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. Köln: FGSV Verlag GmbH.
- Glen, M., Sumner, S., & Kimber, R. (1978). *The capacity of offside priority roundabout entries*, SR 346. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Guichet, B. (1997). Roundabouts in France: Development, Safety, Design and Capacity. *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals*, (págs. 100-105). Portland, Oregon, EE.UU.
- Guichet, B. (2005). Roundabouts in France and new use. *National Roundabout Conference Proceedings 2005*. Vail, Colorado: TRB Transportation Research.
- Kimber, R. M. (1 de Enero de 1980). *The traffic capacity of roundabouts*, LR 942. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory. Obtenido de Transport Research Laboratory.
- Kimber, R., & Hollis, E. (1979). *Traffic queues and delays at road junctions*, LR 909. Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- Mauro, R. (2010). *Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability [Libro Electrónico]*. Trento: Springer Science & Business Media.
- McDonald, M., Hounsell, N., & Kimber, R. (1984). *Geometric delay at non-signalised intersections*, SR 810. Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- Philbrick, M. (1977). *In search of a new capacity formula for conventional roundabouts*, LR 773. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Rodegerts, L., Blogg, M., Wemple, E., Myers, E., Kyte, M., Dixon, M., . . . Carter, D. (2007). *NCHRP Report 572: Roundabouts in the United States*. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies. Obtenido de Transportation Research Board.
- Shi, J., Wang, W., & Yang, X. (2014). Model of Capacity Estimation of Roundabout in Beijing. *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (págs. 1808-1813). Qingdao: IEEE.
- Taekratok, T. (1998). *Modern Roundabouts for Oregon*. Salem: Oregon Department of Transportation. Recuperado el 26 de Mayo de 2015, de Oregon State Library.

- Tan, J.-a. (2001). Comparison of capacity between roundabout design and signalised junction design. *Conference paper STRC 2001 Session Engineering* (págs. 2-5). Monte Verità, Ascona: Swiss Transport Research Conference.
- Thomson, I., & Bull, A. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Obtenido de División de Recursos Naturales e Infraestructura: CEPAL - ONU.
- Transport Research Laboratory. (2 de Febrero de 2004). *Transport Research Laboratory Software*. Recuperado el 2015 de Junio de 23, de <https://trlsoftware.co.uk/support/knowledgebase/articles/13>
- Transportation Research Board, T. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: National Research Council.
- Transportation Research Board, T. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: National Research Council.
- Troutbeck, R. (1989). *Evaluating the performance of a roundabout*. Australian Road Research Board, ARRB.