

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



**PUCP**

**ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA HCM 2010 EN  
UNA ROTONDA EN LA CIUDAD DE LIMA**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Renzo Freddy Angeles Ortega

**ASESOR:**

Dr. Félix Israel Cabrera Vega

**Lima, Septiembre, 2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi asesor por haberme guiado en el desarrollo de la presente investigación y haber motivado mi interés en el área de transporte y movilidad.

Asimismo, agradezco especialmente a Michel Nieto Medina por haber compartido el material de video que permitió desarrollar y publicar la presente investigación.



## RESUMEN

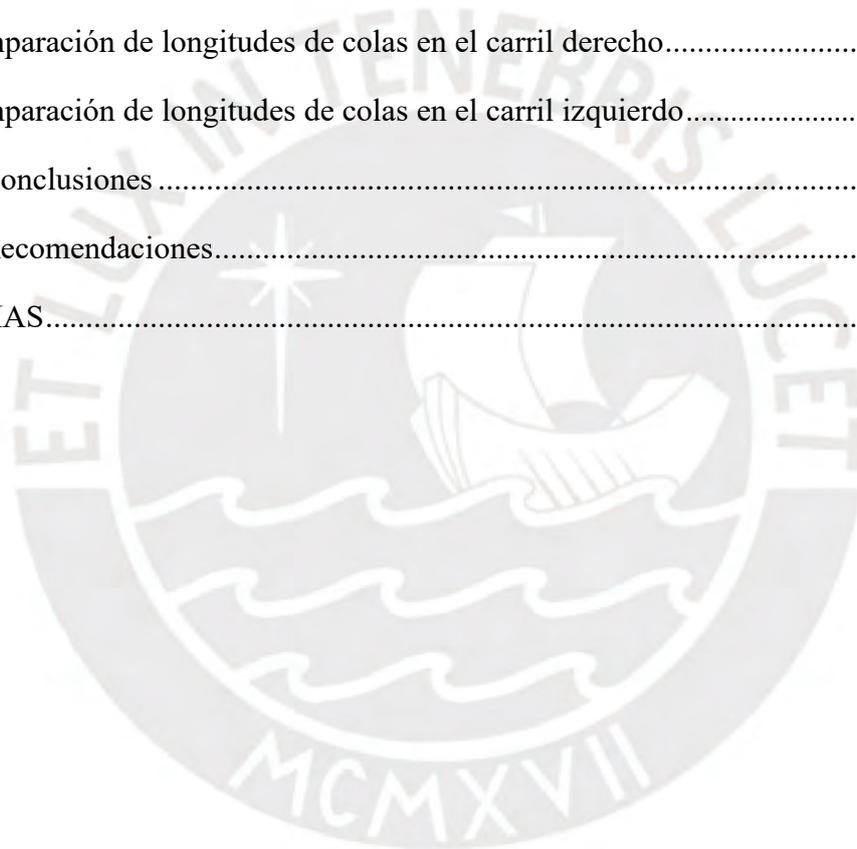
El transporte urbano en la ciudad de Lima posee, en la actualidad, una serie de falencias como es la saturación de sus vías; razón por la cual, se debe buscar medidas de mitigación. Para ello se debe analizar los flujos vehiculares en los diferentes tipos de intersecciones, pues son en estas donde el flujo se ve interrumpido. Entre estas se encuentran las rotondas, que son dispositivos viales bastante comunes en nuestra ciudad. Las intersecciones se analizan mediante modelos vehiculares y se clasifican en dos tipos: determinísticos y micro-simulación. La mayoría de las metodologías de tipo determinístico han sido desarrolladas en países del extranjero y calibradas de acuerdo a su realidad. En nuestro medio, es bastante utilizado el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, siglas en inglés), un manual de metodologías determinísticas de los Estados Unidos.

Por esa razón, la presente tesis tiene como finalidad analizar la aplicabilidad de la metodología HCM 2010 para determinar la capacidad de entrada a la rotonda “Los Delfines”, en la ciudad de Lima. Para ello, se aplicó esta metodología en diferentes periodos de tiempo tanto en el carril derecho como izquierdo de una entrada a esta rotonda y se obtuvo los grados de saturación y longitudes de cola en ellos, variables dependientes de la capacidad. Asimismo, se midió las longitudes de cola reales formadas en los mismos periodos para cada carril. Estas se compararon con las colas estimadas mediante la metodología respecto al grado de saturación correspondiente a cada periodo. A partir de esta comparación, se desarrolló un análisis estadístico que demostró que las longitudes de cola medidas y calculadas no son similares. Por lo tanto, se pudo concluir que la metodología HCM 2010 no resultó aplicable para el cálculo de capacidad del carril derecho e izquierdo de una entrada de la rotonda “Los Delfines”.

## TABLA 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 .....	3
1.4. Alcance y Limitaciones .....	4
Capítulo 2. Marco Teórico .....	6
2.1. Rotondas .....	6
2.1.1. Concepción y tramos de trenzado .....	6
2.1.2. Prioridad de paso en rotondas .....	7
2.1.3. Capacidad y Demanda de rotondas .....	8
2.1.4. Grado de saturación y nivel de servicio .....	9
2.2. Modelos Determinísticos .....	10
2.2.1. Modelos basados en la teoría de Aceptación de Brechas .....	11
2.2.2. Modelos de Regresión Lineal.....	16
2.2.3. Modelo Mixtos .....	27
2.3. Parámetros de eficiencia en rotondas .....	31
2.3.1. Longitud de colas en entradas a rotondas .....	32
2.3.2. Demoras en entradas a rotondas .....	32
Capítulo 3. Metodología .....	33
3.1. Enfoque de la investigación.....	33
3.2. Diseño de la investigación .....	35
3.3. Área de estudio .....	36
3.4. Población, muestra y muestreo .....	38
3.5. Técnica de recolección de datos .....	39

3.6. Aplicación de la Metodología HCM 2010.....	42
3.6.1. Datos de entrada.....	42
3.6.2. Cálculo de la capacidad de entrada y grado de saturación .....	42
3.6.3. Cálculo de la longitud de cola.....	45
3.7. Comparación de longitudes de cola medidas y calculadas .....	46
Capítulo 4. Resultados y análisis .....	48
4.1. Características de tráfico en el carril derecho.....	49
4.2. Características de tráfico en el carril izquierdo .....	54
4.3. Comparación de longitudes de colas en el carril derecho.....	60
4.4. Comparación de longitudes de colas en el carril izquierdo.....	65
Capítulo 5. Conclusiones .....	70
Capítulo 6. Recomendaciones.....	72
REFERENCIAS.....	74



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Curva de capacidad del modelo de Troutbeck para entradas a rotondas de un carril</i> .....	13
<i>Figura 2. Curva de capacidad del modelo de Troutbeck para entradas a rotondas multicarril</i> .....	14
<i>Figura 3. Capacidad de entrada versus el flujo circulante</i> .....	16
<i>Figura 4. Parámetros geométricos del Modelo de Philbrick</i> .....	17
<i>Figura 5. Curvas de capacidad del modelo de Philbrick</i> .....	19
<i>Figura 6. Parámetros geométricos del Modelo de Kimber</i> .....	21
<i>Figura 7. Curvas de capacidad de Sieglösch</i> .....	23
<i>Figura 8. Curvas de capacidad de Brilon y Bondzio</i> .....	25
<i>Figura 9. Parámetros incluidos en el modelo del CETUR</i> .....	26
<i>Figura 10. Parámetros incluidos en el modelo de Guichet</i> .....	29
<i>Figura 11. Curvas de flujo de circulación versus capacidad de carril según en los casos presentados en el HCM 2010</i> .....	31
<i>Figura 12. Proceso Cuantitativo</i> .....	34
<i>Figura 13. Ronda "Los Delfines"</i> .....	37
<i>Figura 14. Video de la rotonda "Los Delfines"</i> .....	41
<i>Figura 15. Carriles de la entrada 1 de la rotonda "Los Delfines"</i> .....	48
<i>Figura 16. Demanda (<math>q_e</math>) vs flujo de circulación (<math>q_c</math>) en el carril derecho</i> .....	52
<i>Figura 17. Grado de saturación y sus variables de dependencia en el carril derecho</i> .....	52
<i>Figura 18. Demanda (<math>q_e</math>) vs flujo de circulación (<math>q_c</math>) en el carril izquierdo</i> .....	57
<i>Figura 19. Grado de saturación y sus variables de dependencia en el carril izquierdo</i> .....	58
<i>Figura 20. Demanda (<math>q_e</math>) vs capacidad (<math>Q_e</math>) en el carril izquierdo</i> .....	58

*Figura 21. Comparación gráfica entre las longitudes de colas medidas y calculadas del carril derecho.....61*

*Figura 22. Regresión lineal de longitudes de cola medidas y calculadas para grados de saturación menores a uno en el carril derecho .....64*

*Figura 23. Comparación gráfica entre las longitudes de colas medidas y calculadas del carril izquierdo .....66*

*Figura 24. Regresión lineal de longitudes de cola medidas y calculadas para grados de saturación menores a 0.9 en el carril izquierdo.....69*



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Niveles de Servicios en entradas a rotondas .....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2. Valores límites para rotondas de Estados Unidos .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Constantes de Siegloch .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4. Constante de Brilon y Bondzio .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 5. Parámetros a y b del modelo CETUR .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 6. Carriles de entrada en las rotondas seleccionadas.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7. Días y horas de las grabaciones.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 8. Factor de ajuste por peatones para entradas de dos carriles.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 9. Resultados de flujos vehiculares y colas en el carril derecho de la entrada 1 a la rotonda “Los Delfines” .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 10. Resultados de flujos vehiculares y colas en el carril izquierdo de la entrada 1 a la rotonda “Los Delfines” .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 11. Longitudes de colas medidas y calculadas con grado de saturación menor a uno en el carril derecho.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 12. Longitudes de colas medidas y calculadas con grado de saturación menor a 0.9 en el carril izquierdo .....</i>	<i>67</i>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Capacidad de Tramo de Trenzado de Wardrop (1957) .....	7
(2) Factores que afectan la capacidad de la rotonda.....	9
(3) Grado de Saturación .....	9
(4) Modelo de Tanner (1962).....	11
(5) Modelo de Troutbeck (1989).....	12
(6) Factor $\lambda$ del modelo del modelo de Troutbeck.....	12
(7) Porción de vehículos libres del modelo de Troutbeck .....	13
(8) Modelo HCM 2000.....	15
(9) Modelo de Philbrick (1977) .....	17
(10) Intercepto F del modelo de Philbrick.....	18
(11) Pendiente fc del modelo de Philbrick.....	18
(12) Modelo de Kimber (1980) .....	20
(13) Factor k del modelo de Kimber.....	20
(14) Intercepto F del modelo de Kimber.....	20
(15) Pendiente fc del modelo de Kimber.....	20
(16) Constante TD dependiente del diámetro inscrito.....	20
(17) Constante X2 del modelo de Kimber.....	20
(18) Agudeza de la entrada a la rotonda .....	20
(19) Modelo de Siegloch (1973) .....	22
(20) Modelo de Brilon y Bondzio (1997) .....	24
(21) Modelo CETUR (1999) .....	25
(22) Límite del flujo perturbador para el modelo CETUR.....	25
(23) Flujo perturbador para el modelo CETUR.....	26
(24) Modelo de Guichet (1997).....	27

(25) Constante A del modelo de Guichet .....	27
(26) Flujo perturbador del modelo de Guichet.....	28
(27) Factor ka del modelo de Guichet .....	28
(28) Factor Limax del modelo de Guichet.....	28
(29) Factor kti del modelo de Guichet.....	28
(30) Factor kte del modelo de Guichet .....	28
(31) Modelo HCM 2010 para rotondas de un carril de circulación .....	29
(32) Modelo HCM 2010 para rotondas de un carril de entrada y dos de circulación.....	30
(33) Modelo HCM2010 para rotondas de dos carriles de entrada y dos de circulación.....	30
(34) Longitud de cola en entradas a rotondas para el modelo HCM 2010.....	32
(35) Demoras en entradas a rotondas para el modelo HCM 2010.....	32
(36) Factor de ajuste por vehículo pesados en el flujo de entrada .....	43
(37) Factor de ajuste por vehículo pesados en el flujo de circulación.....	43
(38) Flujo circulante total (pcu/h).....	43
(39) Capacidad del carril derecho con dos carriles de circulación mediante modelo HCM 2010.....	43
(40) Capacidad del carril izquierdo con dos carriles de circulación mediante modelo HCM 2010.....	44
(41) Ajuste de capacidad de carril.....	44
(42) Grado de saturación.....	45
(43) Longitud de cola en accesos a rotondas según el modelo HCM 2010 .....	45
(44) Ecuación de la recta relacionada a la regresión lineal.....	46

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Los viajes realizados por los ciudadanos en las ciudades de Lima y Callao han aumentado 3.3% anualmente en los últimos años, aproximadamente. Ello representa un crecimiento de 20% entre los años 2004 y 2018. Esta tasa es superior al crecimiento poblacional, el cual asciende a 1.25% anual (Transitemos, 2018). Esta información refleja el aumento anual de la necesidad de desplazamiento de los ciudadanos y sugiere que el sistema de transporte urbano aumente su capacidad para satisfacer esta creciente demanda.

Debido a la creciente demanda de los viajes en la ciudad y, por ende, el crecimiento de los flujos vehiculares, cantidad de vehículos que transitan por una vía por unidad de tiempo; se debe realizar Estudios de Impacto Vial (EIV) para cada nuevo proyecto a construir (desarrollo residencial, negocios, almacenes, mercados, centros comerciales, industrias, etc.). Los EIV tienen como finalidad conocer los efectos que ocasiona un proyecto sobre un área de influencia (vías adyacentes e intersecciones), a través de la comparación entre la situación actual del tráfico y la situación del tráfico generado por el proyecto. En base a esa información, estos proponen medidas de mitigación que, en su mayoría, sugieren incrementar la capacidad de las vías evaluadas, a fin de mantener buenas condiciones de circulación vehicular, sin considerar los efectos en la movilidad (ITE, 2006).

La metodología para realizar el análisis de la circulación vehicular es la modelación del tráfico, y se clasifica en modelos determinísticos y micro-simulación. Cabrera (2015) menciona que los primeros son estáticos y no contemplan las transiciones en operación de un estado a otro; mientras que los segundos consideran comportamientos individuales y por ende analizan el tráfico de manera más detallada. Los modelos vehiculares también se pueden clasificar,

según Fernández (2011), a partir del tipo de conflicto que presentan los dispositivos viales: modelamiento de vías, presenta conflictos concurrentiales; modelamiento de intersecciones, conflictos direccionales; y modelamiento de estaciones de transferencia, conflictos funcionales. El análisis de intersecciones, las cuales son definidas según AASHTOO (2001) como unión o cruce de diferentes movimientos direccionales vehiculares, es de vital importancia, pues en estas se originan puntos de conflictos de divergencia, convergencia y cruce, los cuales no permiten un flujo vehicular continuo.

Un tipo de intersección muy utilizada y compleja son las rotondas, definidas por Bared (2000) como un tipo especial de intersección caracterizada por la confluencia de tramos en él, los cuales se comunican a través de un anillo en el que se establece una circulación rotatoria alrededor de una isleta central. Estas intersecciones son un tipo de intersección de prioridad de paso, es decir, la preferencia de paso la tiene la vía principal ante la vía secundaria. Sin embargo, el caso de las rotondas es particular, pues, como explica Darder (2005), un vehículo antes de ingresar a una rotonda se encuentra en una vía secundaria y, al estar dentro de ella, se encuentra en una vía prioritaria. Por esta razón, son analizadas como una asociación de intersecciones en forma de T.

El análisis de rotondas mediante modelos determinísticos tiene como finalidad el cálculo de la capacidad de sus ramales de entrada y parámetros de eficiencia como colas y demoras. Estos modelos de análisis han sido desarrollados en países extranjeros y suelen dividirse en modelos de regresión lineal y aquellos basados en aceptación de brechas. Los primeros relacionan características geométricas de la intersección con la capacidad; mientras que los segundos relacionan la capacidad de entrada con parámetros que reflejan el comportamiento de los conductores. Por ejemplo, en nuestro país, según Cabrera (2010), los modelos más utilizados para el modelamiento del tráfico de intersecciones de prioridad de paso

son los modelos del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, siglas en inglés) y micro-simulación con los softwares VISSIM Y SIMTRAFFIC, en menor nivel de uso.

La aplicación directa de estas metodologías en una rotonda en la ciudad Lima significa la asunción de las mismas características de las ciudades en donde fueron calibradas. Asumir ciertas características sin conocerlas, como el nivel y forma de manejo para determinar las brechas entre vehículos, podría concluir en la obtención de valores bastantes alejados a nuestra realidad. Por esa razón, es sumamente importante analizar si la metodología HCM 2010 es aplicable eficientemente en una rotonda en la ciudad de Lima.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar la aplicabilidad de la metodología HCM 2010 para determinar la capacidad de entrada a una rotonda en la ciudad de Lima.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Se han planteado dos objetivos específicos. El primero, analizar la calidad de la circulación vehicular en los carriles de una entrada a la rotonda “Los Delfines”, mediante la metodología HCM 2010. El segundo, comparar los valores de las longitudes de cola formadas en los carriles de entrada a la rotonda con los valores obtenidos según la metodología HCM 2010.

## **1.3. Hipótesis**

Se han planteado dos hipótesis. La primera, la calidad de la circulación vehicular es afectada por los peatones con los que se entra en conflicto y difiere en ambos carriles por la presencia de vehículos pesados. La segunda, las longitudes de cola medidas son similares a las obtenidas mediante la metodología HCM 2010 hasta un grado de saturación igual a 1 para el carril derecho y hasta 0.9 para el carril izquierdo.

#### **1.4. Alcance y Limitaciones**

La presente investigación analiza la aplicación de la metodología HCM 2010 en una rotonda en la ciudad de Lima, mediante el análisis de flujos vehiculares en una entrada a la rotonda “Los Delfines”. Se reconoce que los alcances de estudiar una sola rotonda no determinan por completo la aplicabilidad de esta metodología en la ciudad de Lima, pero sí brinda información relevante para analizar, en un caso específico, la aplicabilidad de esta metodología bajo condiciones de tráfico de nuestra realidad. Cabe señalar que el objeto de estudio de la presente investigación es la metodología HCM 2010 y los flujos vehiculares presentados en la rotonda evaluada son los datos de entrada de esta metodología, lo cuales permiten analizar la aplicabilidad de esta en dicha rotonda.

Asimismo, la metodología estudiada contempla la influencia de vehículos pesados para el cálculo de la capacidad. Sin embargo, esta se limita a una equivalencia para vehículos pesados y otra para vehículos livianos, sin considerar la gran variedad de tipos de vehículos que existen en nuestro medio, como son las motos, mototaxis, autos, camionetas, combis, microbuses, buses, trailers, etc. Por tal motivo, este porcentaje de vehículos pesados se puede ver afectado por las consideraciones tomadas en la aplicación de estas equivalencias. Cabe señalar que la metodología no considera a las bicicletas como flujos que entren en conflicto con los flujos vehiculares de las entradas; a diferencia de los peatones, flujo que si es considerado en la metodología.

Finalmente, es importante señalar que el desarrollo de la presente investigación coincidió con la etapa de confinamiento de la crisis sanitaria mundial generada por el Covid-19. Dicha situación no permitió que se realice una recolección de data propia para la investigación; razón por la cual se tuvo que solicitar el material de video de las rotondas evaluadas por Nieto (2015) en su investigación acerca del modelo lineal de Kimber, el cual permitió realizar la medición de variables necesarias. Sin embargo, este material limitó la

cantidad de periodos de análisis y entradas a evaluar, dado que la naturaleza de este material no es la medición de flujos vehiculares.



## **Capítulo 2**

### **Marco Teórico**

#### **2.1. Rotondas**

Las rotondas fueron propuestas por M. Eugene Henard, en 1906, como una forma conveniente para el control del tráfico en zonas ocupadas donde convergen diferentes caminos (Citado de Darder, 2005). Con el pasar de los años y la experiencia de uso de las rotondas, la concepción de funcionamiento de estas ha variado con la finalidad de mejorar su eficiencia. Por ello, en el presente capítulo se detalla el cambio de funcionalidad de las rotondas y, a partir de este, la forma de análisis de las rotondas modernas.

##### **2.1.1. Concepción y tramos de trenzado**

Henard (1906) precisó que los problemas presentados en las intersecciones típicas, tales como la saturación de vías y accidentes de tránsito, se debían a la gran cantidad de puntos de conflictos generados por los movimientos que se realizan en estas. Por lo tanto, propuso que los vehículos ingresen a una intersección siguiendo una trayectoria circular en un solo sentido y alrededor de un obstáculo, lo cual reduciría los puntos de conflicto únicamente a las entradas y salidas de las intersecciones. Bajo esta idea, se diseñaron las primeras rotondas en Europa durante las primeras décadas del siglo XX.

Hacia 1929, el Ministerio de Transporte de Reunido Unido dio algunas recomendaciones técnicas acerca del diseño de este tipo de intersecciones, pero no es hasta 1957 cuando Wardrop (1957) desarrolla una fórmula para el cálculo de la capacidad de trenzado (Citado en Troubeck, 1984). La zona de trenzado es aquella zona donde existe interferencia entre un flujo de entrada a una rotonda y un flujo de salida de esta, existente siguiente a la entrada, la cual se formaba debido a que la circulación en las rotondas se regía por la norma de prioridad a la izquierda (a la derecha en el resto de países). La expresión de

Wardrop relaciona la capacidad de trenzado con parámetros geométricos de esta zona y el flujo que realizaba una maniobra de trenzado.

$$Q_t = \frac{K * w * \left(l + \frac{e}{w}\right) * \left(l - \frac{p}{3}\right)}{l + \frac{w}{l}} \quad (1)$$

Dónde:

$Q_t$ : Capacidad de tramo de trenzado

w: Longitud de zona de trenzado

l: Ancho de la zona de trenzado

e: Ancho medio entre entrada y salida de la vía

p: porcentaje de vehículos que realizan la maniobra de trenzado

K: Coeficiente que varía según las unidades empleadas.

Esta concepción del funcionamiento de las rotondas originaba demasiados conflictos en la zona de trenzado, pues cuando los vehículos entrantes se adentran cada vez más en la intersección, la bloqueaban y no permitían la salida de los vehículos que circulaban por la rotonda, lo cual podía detener ambos flujos y bloquear las entradas. Sin embargo, Darder (2005) explica que la creencia en esta concepción del funcionamiento de las rotondas, a partir de tramos de trenzado a lo largo de ella, se sostenía en que el tramo de entrada debía ser lo más tangente posible a la calzada anular. Por lo tanto, con la finalidad de evitar el problema de autobloqueo e ineficiencia, se planteaban tramos de trenzado más largos y, por ende, rotondas cada vez más grandes.

### **2.1.2. Prioridad de paso en rotondas**

Hacia 1956, el Road Research Laboratory identificó los problemas mencionados líneas arriba y propuso la inversión de prioridades a través de la regla de prioridad del anillo (Citado de Darder, 2005). Esta regla de prioridad consiste en que la calzada anular es la vía prioritaria

frente al ramal de entrada; por lo cual, los vehículos deben esperar una brecha lo suficientemente larga como para poder ingresar a la rotonda sin generar ningún conflicto. Bajo este criterio se realizaron diferentes pruebas por varios años, pero recién en 1966, tras comprobar el funcionamiento de esta regla en 83 rotondas se instauró como tal en Reino Unido (Darder,2005)

Sin embargo, hasta los años 70 no existió otra fórmula para el análisis de rotondas que no implique el análisis de tramos de trenzado como era la expresión de Wardrop, razón por la cual, se siguió usando dicha expresión. Ello ocurrió hasta que Ashworth y Field (1973) descubrieron que la capacidad de trenzado era insensible a los cambios en la proporción del tráfico de trenzado, pues el tejido ya no era el patrón de comportamiento dominante, ya que la mayoría de los conductores ingresaban a la intersección solo si había una gran brecha en el tráfico circulante. A partir del cambio en la concepción de las rotondas y de las investigaciones que desacreditaron los tramos de trenzado, se pudo plantear el análisis de las rotondas como una asociación de intersecciones en forma de T. Estos análisis se realizaron tanto en base a parámetros relevantes como la geometría de las intersecciones, así como en base a enfoques de aceptación de brechas.

### **2.1.3. Capacidad y Demanda de rotondas**

Esta nueva forma de analizar las rotondas significó un cambio hacia el análisis de la capacidad de entrada a una rotonda (vía secundaria) y el flujo circulante por la calzada anular de una rotonda (vía principal), del mismo modo como se realiza el análisis de intersecciones de prioridad de paso en forma de T. La capacidad de la entrada a una rotonda es definida por Cabrera (2015) como la cantidad de vehículos que pueden ser atendidos por esta entrada en la misma unidad de tiempo, sin saturarse, sin formar colas permanentes y bajo condiciones normales. Estas condiciones normales se refieren a condiciones típicas de clima, tipo de conductores, tipos de vehículos, etc.

Mauro (2010) explica cuáles son los factores que afectan la capacidad de entrada a una rotonda, a partir de los cuales se formulan los modelos para determinarla, para lo cual plantea la ecuación (2). En dicha ecuación,  $Q_e$  es la capacidad de entrada a la rotonda;  $G$  representa los parámetros geométricos de la intersección; y  $Q_d$  es el flujo perturbador del tráfico al entrar a la rotonda, el cual es función del flujo circulante frente a la entrada y el flujo de salida previo a la entrada. Asimismo,  $\tau$  representa los tiempos relacionados al comportamiento del conductor, como lo son el tiempo de seguimiento, la brecha crítica y el intervalo promedio; y  $S$  es el conjunto de constantes numéricas resultado de la calibración del modelo.

$$Q_e = f(G, Q_d, \tau, S) \quad (2)$$

Por otro lado, Fernández (2011) define la demanda de la entrada a una rotonda como la cantidad de vehículos que desean transitar por una sección de la entrada por unidad de tiempo. Esta es medida en campo mediante aforos, los cuales pueden ser manuales o electrónicos y deben realizarse cuando el tráfico presenta condiciones normales, como explica Cabrera (2015).

#### **2.1.4. Grado de saturación y nivel de servicio**

El grado de saturación es aquel parámetro que relaciona la demanda de un carril de entrada a una rotonda con su capacidad, como se observa en la ecuación (3). Este parámetro evidencia a grandes rasgos la eficiencia de la intersección y sirve para el cálculo de otros parámetros de eficiencia como son las longitudes de cola y las demoras.

$$x = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidad}} \quad (3)$$

Asimismo, la Junta de Investigación de Transporte (TRB, siglas en inglés) plantea niveles para clasificar la eficiencia de servicio en las entradas a las rotondas por medio de las

demoras presentadas en ellas (TRB, 2000; TRB, 2010). La tabla 1 contempla estos niveles y los rangos de demoras que representan cada uno de ellos.

*Tabla 1. Niveles de Servicios en entradas a rotondas*

Nivel de Servicio	Demoras (s/veh)
A	0-10
B	>10-15
C	>15-25
D	>25-35
E	>35-50
F	>50

Nota. Tomado de “Highway Capacity Manual”, por TRB, 2010.

## **2.2. Modelos Determinísticos**

Los modelos determinísticos para el análisis de rotondas tienen como finalidad el cálculo de la capacidad de sus ramales de entrada y parámetros de eficiencia como longitudes colas y demoras. Estos modelos han sido desarrollados en países extranjeros y suelen dividirse en modelos de regresión lineal y modelos basados en la teoría aceptación de brechas. Fernández (2011) explica la diferencia entre ellos: los primeros relacionan la capacidad de entrada con parámetros que reflejan el comportamiento de los conductores como la brecha crítica, tiempo de seguimiento e intervalo promedio; mientras que los segundos relacionan características geométricas de la intersección con la capacidad de entrada, tras una regresión lineal. Asimismo, existen algunos modelos que relacionan la capacidad de los ramales tanto con parámetros de comportamiento, como con características geométricas de la intersección y son llamados modelos mixtos.

### 2.2.1. Modelos basados en la teoría de Aceptación de Brechas

#### a) Modelo de Tanner (Reino Unido)

Hacia 1962, no se había propuesto una metodología de cálculo de capacidad de rotondas distintas al modelo de Wardrop, cuando Tanner (1962) propuso un modelo basado en aceptación de brechas. Este modelo parte del análisis de retraso en una intersección de una corriente principal y una secundaria, en la que la llegada en ambas es aleatoria, pero supone que un vehículo que transita por la vía secundaria no ingresa a la intersección hasta encontrar un espacio mayor a T segundos disponibles y, si el flujo continúa, los vehículos de la vía secundaria transitarán a intervalos iguales a  $T_0$  segundos. Asimismo, supone que los vehículos de la corriente principal circulan en pelotones en intervalos iguales a  $\Delta$  segundos (Taekratok, 1998). La ecuación (4) muestra la expresión planteada por Tanner (1962).

$$Q_s = \frac{qp * (1 - \Delta * qp) * e^{qp*(\alpha-\Delta)}}{1 - e^{-qp*\beta}} \quad (4)$$

Dónde:

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

$\beta$ : Tiempo de seguimiento (s), igual a  $T_0$ .

$\alpha$ : Brecha crítica (s), igual a T.

$\Delta$ : Intervalo promedio entre pelotones de vehículos (s)

$q_p$ : Flujo circulante en la rotonda (veh/h)

$\phi$ : Proporción de vehículos libres, igual a  $q_p/\Delta$ .

Esta primera metodología basada en aceptación de brechas, a pesar de no estar diseñada exclusivamente para las rotondas, ha servido para analizar la capacidad de entradas de rotondas pues, el flujo de entrada se estudia como un flujo secundario y el flujo circulante, como un flujo principal. Por esa razón, se han desarrollado investigaciones y formulado nuevas expresiones para el cálculo de capacidad de rotondas a lo largo del mundo a partir de este modelo. Por

ejemplo, Horman and Turnbull, tras investigaciones en rotondas en Australia, sugirieron valores entre tres y cuatro segundos para la brecha crítica; dos segundos para el tiempo de seguimiento y; entre uno y dos segundos para el intervalo promedio (Troutbeck 1984). Asimismo, en Estados Unidos, hacia finales del siglo XX, se realizaron investigaciones en rotondas y las metodologías más aceptadas fueron las basadas en aceptación de brechas (Taekratok, 1998).

**b) Modelo de Troutbeck (Australia)**

Troutbeck, en Australia, realizó una exhaustiva investigación para desarrollar un modelo que ha sido adoptado en su momento por la guía de caminos de Australia (AUSTROADS GUIDE) y ha sido la base del software SIDRA (Yap, Gibson & Waterson, 2013). Troutbeck (1989) midió los tiempos de seguimiento de avance y brechas críticas en 55 carriles de entradas a rotondas en Australia y desarrolló relaciones respecto al flujo circulante, las cuales presentó partir de ratios y una serie de tablas complejas. La ecuación (5) y (6) fueron las planteadas por Troutbeck para el cálculo de la capacidad de entrada a una rotonda.

$$Q_e = \frac{3600 * \varphi * q_c * e^{-\lambda * (\alpha - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda * \beta}} \tag{5}$$

$$\lambda = \frac{\varphi * q_c}{1 - \Delta * q_c} \tag{6}$$

Dónde:

Q<sub>e</sub>: Capacidad de la entrada a la rotonda (veh/h)

q<sub>c</sub>: Flujo circulante en la rotonda (veh/h)

φ: Proporción de vehículos en pelotón en el flujo de circulación

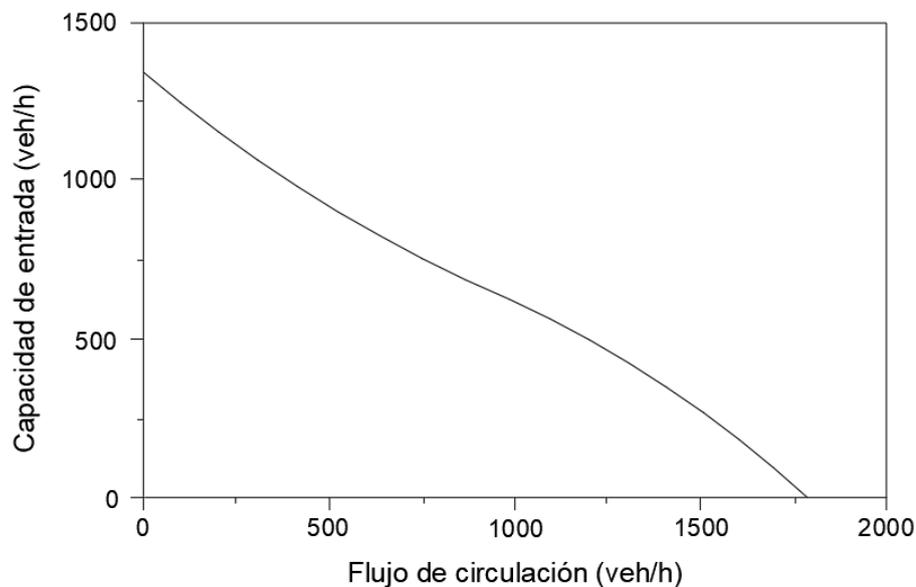
β: Tiempo de seguimiento (s)

α: Brecha crítica (s)

$\Delta$ : Intervalo promedio entre grupos de vehículos (s), el cual será 2s para rotondas de un solo carril y 1s para rotondas de varios carriles.

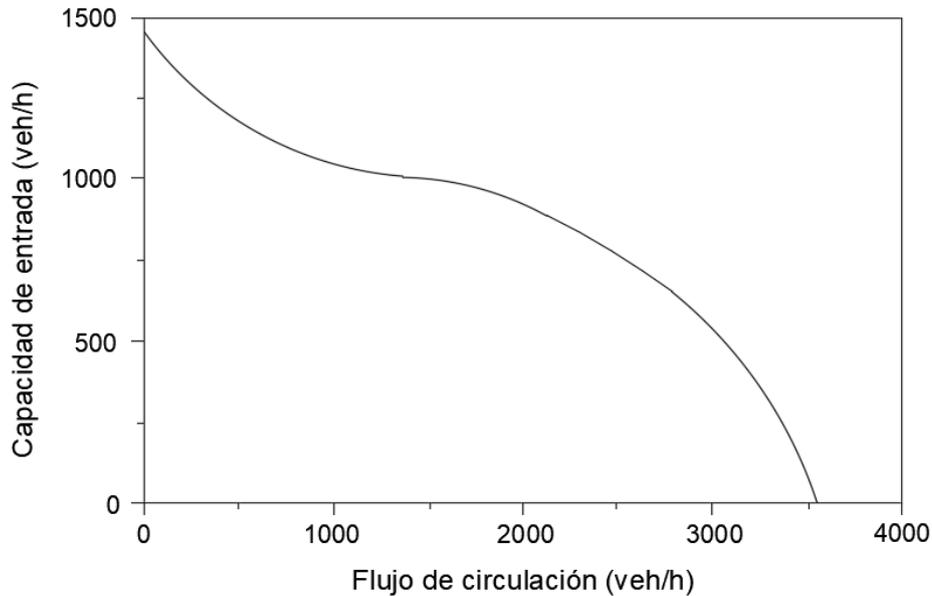
Años más tarde, Troutbeck (1992) presenta algunos ajustes a las relaciones para la obtención de los parámetros de los cuales depende la capacidad, tras la adopción de su modelo por el AUSTROADS. Entre ellas podemos destacar la ecuación (7), la cual permite obtener la proporción de vehículos pelotón por medio de otras dos variables mediables. Asimismo, las figuras 1 y 2 muestran las curvas de capacidad de entrada versus flujo de circulación del modelo de Troutbeck para entradas a rotondas de un solo carril y multicarril, respectivamente.

$$\phi = 0.75 * (1 - \Delta * q_c) \quad (7)$$



*Figura 1. Curva de capacidad del modelo de Troutbeck para entradas a rotondas de un carril*

Tomado de “Changes to the analysis and design of roundabouts initiated in the AUSTROADS guide”, por Troutbeck, 1992.



*Figura 2. Curva de capacidad del modelo de Troutbeck para entradas a rotondas multicarril.*

Tomado de “Changes to the analysis and design of roundabouts initiated in the AUSTROADS guide”, por Troutbeck, 1992.

**c) Modelo HCM 2000 (Estados Unidos)**

En Estados Unidos, hacia 1998, las guías de diseño de carreteras proponían seguir metodologías extranjeras, por ejemplo, en Florida, se recomendaba usar el software SIDRA desarrollado en Australia y en Maryland se seguía el Manual de Transporte y Tráfico de Carreteras de Australia “Austroads” (Taekratok, 1998). Por esa razón, se empezó a estudiar la capacidad de rotondas en este país. Entre los primeros estudios encontramos los realizados por Flannery y Datta (1996, 1997), quienes observaron tres rotondas en Florida y una en Maryland. La investigación se basó en la teoría de aceptación de brechas por la falta de variación de parámetros geométricos en las rotondas evaluadas; sin embargo, vale decir que estas teorías eran las más aceptadas en E.E.U.U. (Taekratok, 1998).

Recién en 1997, Kyte (1997) propone la ecuación (8) para el cálculo de la capacidad de entrada. Este modelo tuvo como premisa que las características de aceptación de brechas de los conductores son similares a las presentadas cuando los conductores giran a la derecha en

las intersecciones de prioridad de paso. TRB (2000) adoptó este modelo y lo presentó en el Manual de Capacidad de Carreteras 2000 (HCM 2000). Vale decir que esta expresión se limita a rotondas de un solo carril de calzada anular y un solo carril de entrada, así como para flujos de circulación menores a 1200 unidades de vehículos de pasajeros por hora (pcu/h)

$$Q_e = \frac{q_c * e^{-\frac{q_c * t_c}{3600}}}{1 - e^{-\frac{q_c * t_f}{3600}}} \quad (8)$$

Dónde:

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

$q_c$ : Flujo circulante (pcu/h)

$t_c$ : Brecha crítica (s)

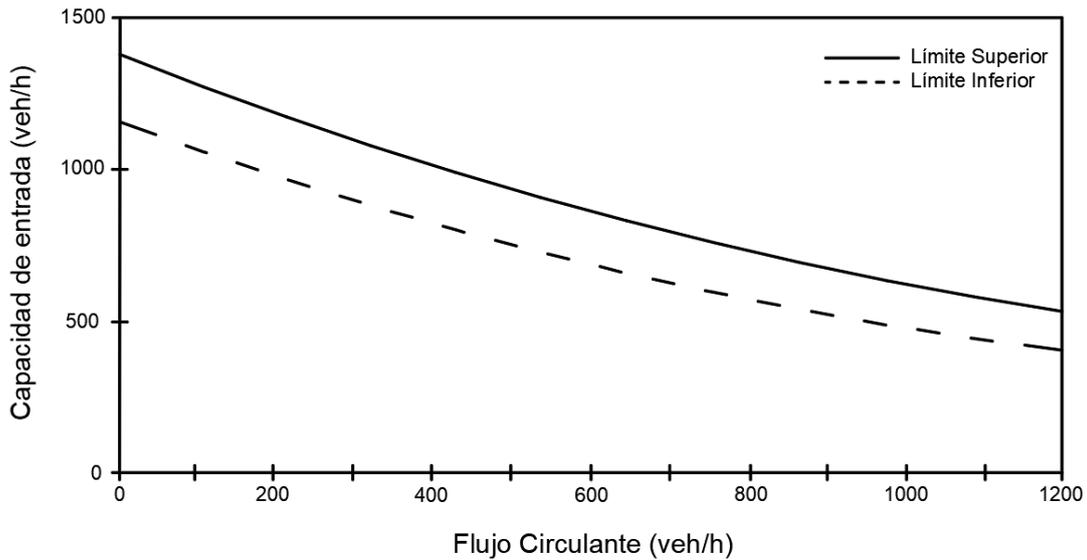
$t_f$ : Tiempo de seguimiento (s)

A pesar de que no se habían realizado muchos estudios en Estados Unidos hasta ese momento, el TRB (2000) planteó valores límites de brecha crítica y tiempo de seguimiento, los cuales se observan en la tabla 2. Asimismo, la figura 3 muestra las curvas límites que relacionan el flujo de circulación con la capacidad de entrada en una rotonda de un carril, a partir de dichos valores límite. En base a estos límites, se puede evidenciar que, a menor brecha crítica, mayor capacidad de entrada y; que, a menor tiempo de seguimiento, mayor capacidad de entrada.

*Tabla 2. Valores límites para rotondas de Estados Unidos*

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

Nota. Tomado de “Highway Capacity Manual”, por TRB, 2000.



*Figura 3. Capacidad de entrada versus el flujo circulante*

Tomado de “Highway Capacity Manual”, por TRB, 2010.

Es importante señalar que en este modelo se utiliza como unidad de medida la unidad de vehículo de pasajeros por hora (pcu/h) para medir el flujo circulante y la capacidad de entrada. Esta unidad fue propuesta por la Junta de Investigación de Carreteras (1965) en el HCM 1965 como un vehículo equivalente para uniformizar la medición de cantidad vehículos respecto a los tipos de vehículos existentes. Por ejemplo, para el presente modelo, el TRB (2000) propone que un vehículo liviano, como un auto, posee una equivalencia de un pcu; mientras que un vehículo pesados equivale a dos pcu.

### **2.2.2. Modelos de Regresión Lineal**

#### **a) Modelo de Philbrick (Reino Unido)**

Tras el cambio de prioridad en rotondas, Ashworth & Field (1973) presentaron evidencia sobre la irrelevancia del factor de trenzado para el cálculo de capacidad de las rotondas modernas. En base a ello, el Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL, siglas en inglés) propuso una relación lineal entre la capacidad de la entrada a una rotonda y el flujo de circulación frente a esta, como se muestra en la ecuación (9). Philbrick

(1977) planteó relaciones para el cálculo del intercepto (F) y la pendiente (fc) de aquella relación a partir de diez parámetros geométricos de la zona de trenzado, los cuales se muestran en la figura 4. Con la finalidad de comprobar la validez de sus relaciones, desarrolló una investigación en once rotondas de diámetros alrededor a 60 metros. Sin embargo, los resultados indicaron que la gran mayoría de estos parámetros eran irrelevantes para el cálculo del intercepto F y la pendiente fc.

$$Q_e = F + f_c * q_c \quad (9)$$

Dónde:

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

$q_c$ : Flujo circulante en la rotonda frente a la entrada (veh/h)

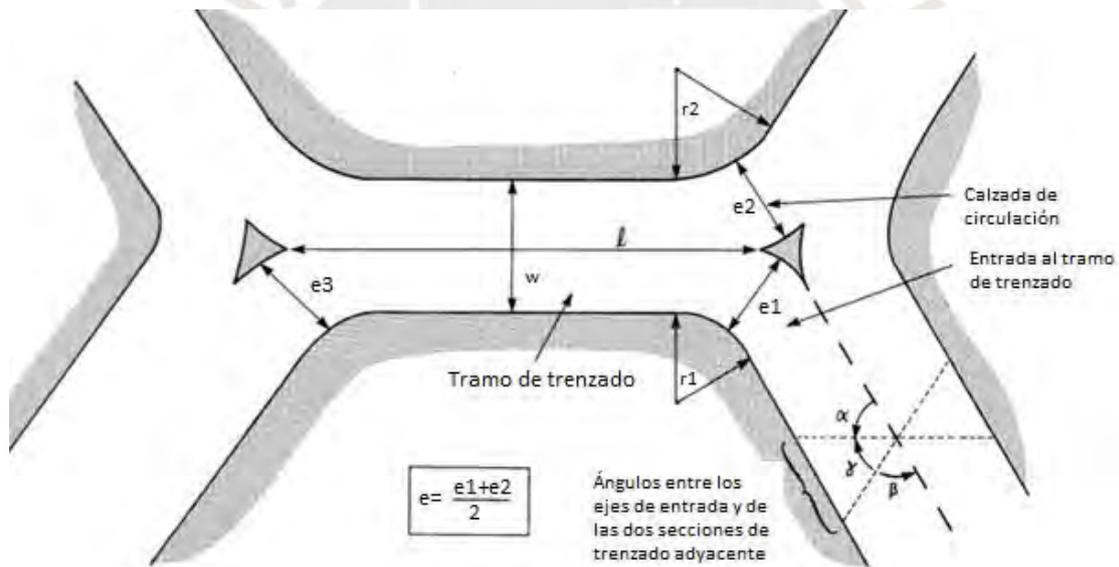


Figura 4. Parámetros geométricos del Modelo de Philbrick

Tomado de “In search of a new capacity formula for conventional roundabouts, LR 773”, por Philbrick, 1977.

Por lo tanto, Philbrick (1977) replanteó sus relaciones y propuso las ecuaciones (10) y (11). La primera muestra que el valor de F depende de dos parámetros geométricos propios de la entrada: el ancho y el radio de curvatura de la entrada. La segunda muestra que el valor de fc depende de un parámetro propio de la entrada a la rotonda, el ancho de la entrada, y del

ancho de la zona de trenzado. De esta manera, Philbrick demostró que los parámetros a lo largo de la zona de trenzado son irrelevantes para el cálculo de la capacidad de los accesos a rotondas (Troutbeck, 1984).

$$F = 233 * e * \left(1.5 - \frac{1}{\sqrt{r}}\right) - 255 \quad (10)$$

$$f_c = 0.0449 * (2 * e - w) + 0.282 \quad (11)$$

Dónde:

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

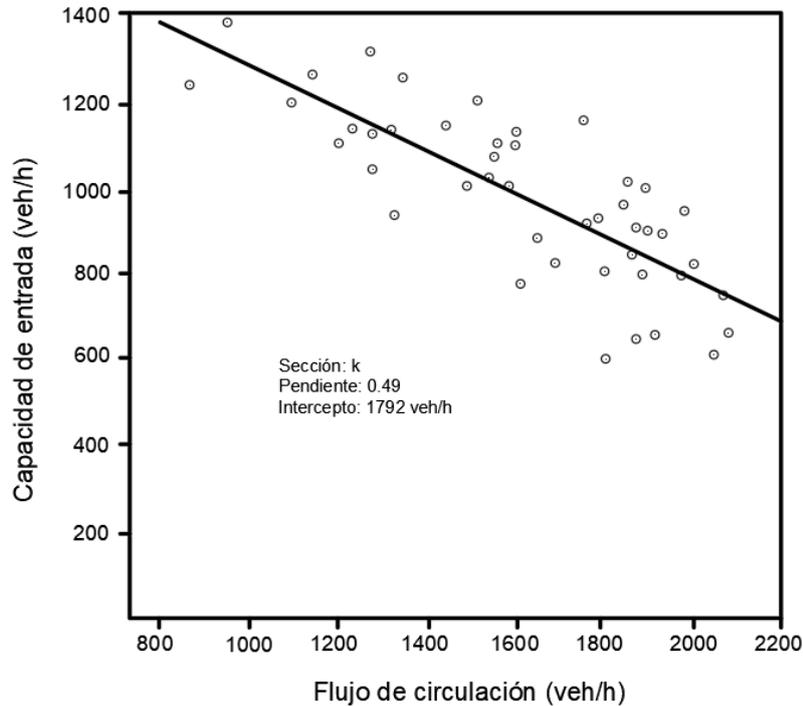
$f_c$ : Pendiente de la recta

e: Ancho de la entrada (m)

w: Ancho de la zona de trenzado (m)

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

La figura 5 muestra la curva de capacidad de entrada versus flujo circulante para una de las entradas evaluadas en la investigación de Philbrick (1977). En esta se puede evidenciar los datos medidos, los cuales se representan como puntos, y la función lineal propuesta por este modelo, la cual se ha ajustado a los datos medidos. Este gráfico es típico de los análisis de regresión lineal, pues muestra la calibración del modelo respecto a los datos medidos en campo en una de las rotondas evaluadas y sirven para conocer gráficamente la dispersión entre el modelo y la realidad.



*Figura 5. Curvas de capacidad del modelo de Philbrick*

Tomado de “In search of a new capacity formula for conventional roundabouts, LR 773”, por Philbrick, 1977.

**b) Modelo de Kimber (Reino Unido)**

Desde el planteamiento del modelo lineal de Philbrick, diferentes investigadores del TRRL realizaron una serie de ensayos en rotondas con la finalidad de calibrar los parámetros de análisis. Kimber y Semmens (1977) utilizaron experimentos de pista de prueba a escala completa para determinar el efecto de la geometría de entrada en la capacidad de esta. Glen, Sumner y Kimber (1978) usaron datos de campo y analizaron la capacidad de 28 pequeñas rotondas, con diámetros inferiores a 57 metros, para verificar y recalibrar el coeficiente correspondiente al ancho de entrada en las ecuaciones de Kimber y Semmens. A partir de 185 horas de datos obtenidos por Philbrick (1977), Kimber y Semmens (1977), Glen et al. (1978) y Ashworth & Laurence (1977; 1978), Kimber (1980) desarrolló relaciones para el cálculo de la capacidad de entradas en rotondas.

$$Q_e = k * (F - f_c * q_c) \quad (12)$$

$$k = 1 - 0.00347 * (\varphi - 30) - 0.978 * \left(\frac{1}{r} - 0.05\right) \quad (13)$$

$$F = 303 * X_2 \quad (14)$$

$$f_c = 0.21 * t_D * (1 + 0.2 * X_2) \quad (15)$$

$$t_D = 1 + \frac{1}{2 * (1 - e^{\frac{D-60}{10}})} \quad (16)$$

$$X_2 = v + \frac{e - v}{1 + 2 * S} \quad (17)$$

$$S = \frac{e - v}{l} = 1.6 * \frac{e - v}{l'} \quad (18)$$

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

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

e: Ancho de entrada a la rotonda (m)

S: Agudeza de la entrada

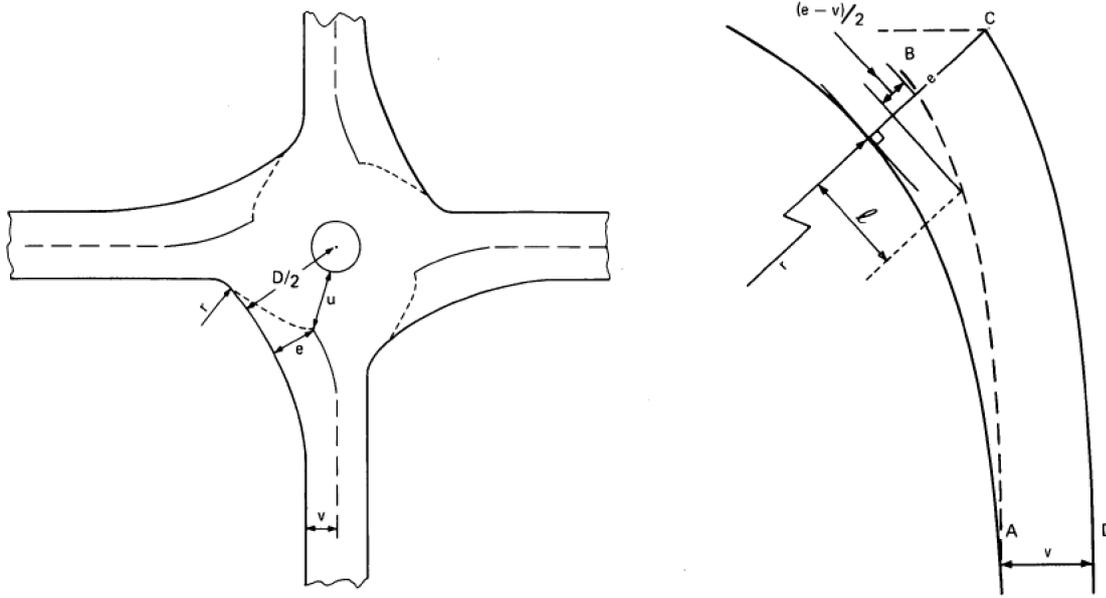
$X_2$ : Constante dependiente de e, v y S

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



*Figura 6. Parámetros geométricos del Modelo de Kimber.*

Tomado de “The traffic capacity of roundabouts, LR 942”, por Kimber, 1980.

Cabe mencionar que Kimber, a lo largo de sus investigaciones acerca del cálculo de capacidad de entradas a rotondas, planteó una postura en contra del modelo de aceptación de brechas. Troubeck (1984) explica las tres objeciones que Kimber plantea hacia este modelo a lo largo de sus publicaciones: Primero, el avance de seguimiento debe depender de los flujos circulantes y no debe ser un valor constante. Segundo, los parámetros de aceptación de brechas no deberían estar relacionados con el diseño geométrico. Tercero, el proceso de aceptación de brechas no aplica a flujos circulantes altos debido al intercambio de prioridades y reversión de brecha.

### c) **Modelo de Brilon y Bondzio (Alemania)**

En el presente acápite se presentará el modelo desarrollado por Brilon y Bondzio y para ello se presentará como antecedente el modelo de regresión exponencial de Sieglösch, el cual, a pesar de no ser modelo de regresión lineal, ayuda al entendimiento del desarrollo del modelo a tratar.

### **Modelo de Siegloch**

Por su parte, en Alemania, se analizó en un principio la capacidad de rotondas basados en la teoría de aceptación de brechas. Sin embargo, como menciona Stuwe (1991), se tuvo diferentes problemas con este tipo de modelos, como fue la definición de la corriente principal en las rotondas de varios carriles (Citado en Yap, Gibson & Waterson, 2013); por esa razón, se optó por seguir modelos de regresión. Por ejemplo, Siegloch en 1973 propone la ecuación (19), un modelo de regresión exponencial (Taekratok, 1998).

$$Q_e = A * e^{-B * \frac{q_c}{1000}} \quad (19)$$

Dónde:

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

$Q_c$ : Flujo circulante (veh/h)

A, B: Constantes empíricas calibradas en Alemania

Los valores de los parámetros A y B de la regresión dependen de la cantidad de carriles de entradas y de carriles en la calzada anular. La tabla 3 muestra los valores de los parámetros en mención para diferentes combinaciones de cantidad de carriles. A partir estos valores, se puede determinar las curvas de capacidad para los diferentes casos que propuso Siegloch en su modelo exponencial, como se muestra en la figura 7. En ella podemos notar que, a mayor cantidad de carriles de entrada, cada uno de ellos posee mayor capacidad; y que, a mayor cantidad de carriles de calzada anular, mayor capacidad de entrada para cada carril.

Tabla 3. Constantes de Siegloch

Condición	Número de carriles de entrada	Número de carriles de calzada anular	A	B
a	1	1	1089	7.42
b	2-3	1	1200	7.30
c	2	2	1553	6.69
d	3	2	2018	6.68

Nota. Tomado de “Modern Roundabouts for Oregon”, por Taekratok, 1998.

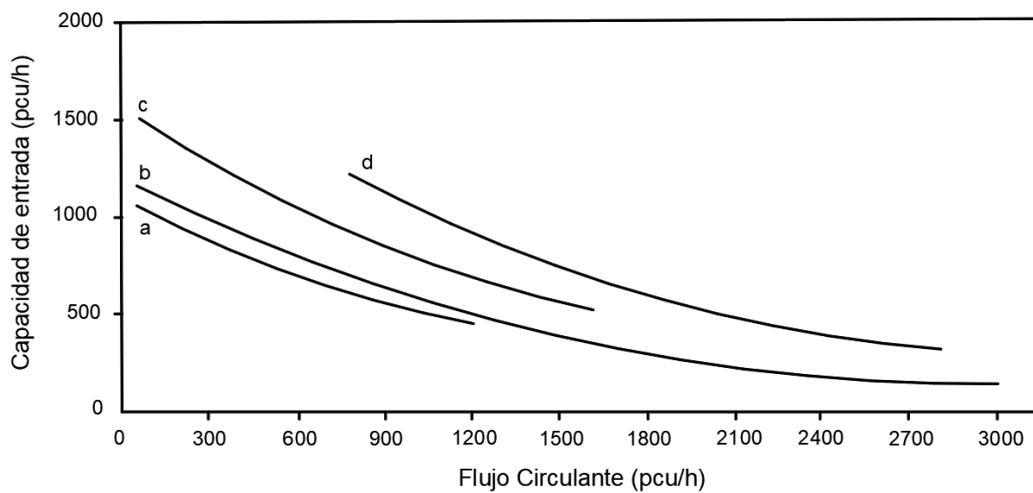


Figura 7. Curvas de capacidad de Siegloch

Tomado de “Modern Roundabouts for Oregon”, por Taekratok, 1998

### Modelo de Brilon y Bondzio

Brilon, Wu y Bondzio (1997) afirmaron que las investigaciones posteriores a la fórmula de regresión exponencial de Siegloch demostraron que una regresión lineal explica mejor la varianza de los datos. Por lo tanto, Brilon y Bondzio propusieron la ecuación (20) para el cálculo de la capacidad de entrada. La calibración de las constantes A y B de dicha ecuación se logró en base a diferentes mediciones con una muestra total de 7252 intervalos en diferentes tipos de rotondas hasta 1996, las cuales fueron financiadas por el Departamento de Transporte (DOT, siglas en inglés) (Brilon, Wu & Bondzio, 1997).

$$Q_e = A - B * q_c \quad (20)$$

Dónde:

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

$q_c$ : Flujo circulante (veh/h)

A, B: Constantes empíricas calibradas en Alemania

La tabla 4 muestra los valores de las constantes A y B para diferentes combinaciones de cantidad de carriles. A partir estos valores, se puede determinar las curvas de capacidad para los diferentes casos que propusieron Brilon, Wu y Bondzio en su modelo lineal, como se muestra en la figura 8. En ella podemos notar que, al igual que en modelo de Sieglösch, a mayor cantidad de carriles de entrada, cada uno de ellos posee mayor capacidad; y que, a mayor cantidad de carriles de calzada anular, mayor capacidad de entrada para cada carril.

*Tabla 4. Constante de Brilon y Bondzio*

Número de carriles de entrada	Número de carriles de calzada anular	A	B	Tamaño de la muestra usada para la regresión (Número de intervalos observados de 1 minuto)
1	1	1218	0.74	1504
1	2-3	1250	0.53	879
2	2	1380	0.50	4574
2	3	1409	0.42	295

Nota. Tomado de “Unsignalized Intersections in Germany - a State of the Art 1997”, por Brilon et al., 1997.

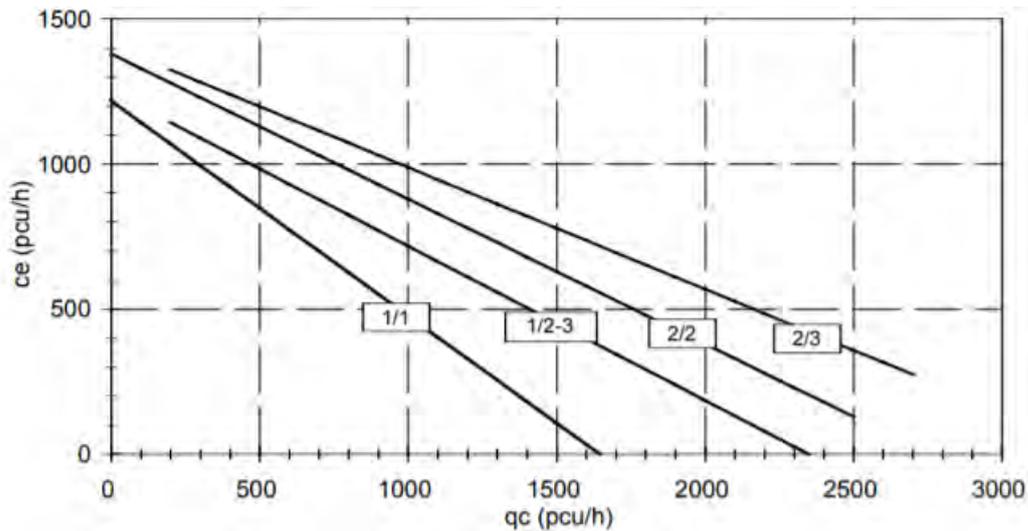


Figura 8. Curvas de capacidad de Brilon y Bondzio.

Nota. Tomado de “Unsignalized Intersections in Germany - a State of the Art 1997”, por Brilon et al., 1997.

**d) Modelo CETUR (Francia)**

En Francia, el Centro de Estudios de Transporte Urbano (CETUR) (1999) presentó la ecuación (21) para el cálculo de capacidad de entradas a rotondas en la Guía de Carreteras Urbanas de dicho país. Esta expresión no contempla parámetros geométricos o de aceptación de brechas que afectan la capacidad, pero es válida para rotondas de 10 a 30 metros de diámetro interno, entradas de un solo carril y de tráfico equilibrado, por lo cual se considera dentro de este tipo de modelos. Asimismo, se precisa en la ecuación (22) que, para valores muy elevados de flujo de perturbación, la capacidad de la entrada sería igual cero y volvería a esta completamente ineficiente.

$$Q_e = 1500 - \frac{5}{6} * q_d \quad (21)$$

$$Q_e = 0 , Q_d > 1800 \left( \frac{veh}{h} \right) \quad (22)$$

Donde:

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

$q_d$ : Flujo perturbador (veh/h)

CETUR (1999) planteó también la ecuación (23), en la cual se muestra que el flujo perturbador depende tanto del flujo de del flujo de circulación ( $q_c$ ) y el flujo de salida ( $q_u$ ), los cuales se muestran en la figura 9. Esto se debe a que, como explica Mauro (2010), la capacidad de entrada depende del flujo perturbador, el cual puede calcularse a partir del flujo de circulación frente a la entrada, el flujo de salida previo a la entrada o una combinación entre ellos. Asimismo, los valores de las constantes  $a$  y  $b$  de dicha ecuación dependen del radio interno de la rotonda ( $R$ ) y del ancho de la isla de separación entre el carril de entrada y salida de cada ramal ( $L_i$ ), respectivamente. Si los valores del radio y ancho de isla se encuentran entre los valores límites, los cuales se anotan en la tabla 5, se debe calcular los parámetros interpolando los valores.

$$q_d = a * q_c + b * q_u \quad (23)$$

Tabla 5. Parámetros  $a$  y  $b$  del modelo CETUR

Parámetro	$R \leq 15$ m	$R \geq 30$ m	Parámetro	$L_i \geq 15$ m	$L = 0$ m
$a$	0.9	0.7	$b$	0	0.3

Nota. Tomado de “Guide des carrefours urbains”, por CETUR, 1999.

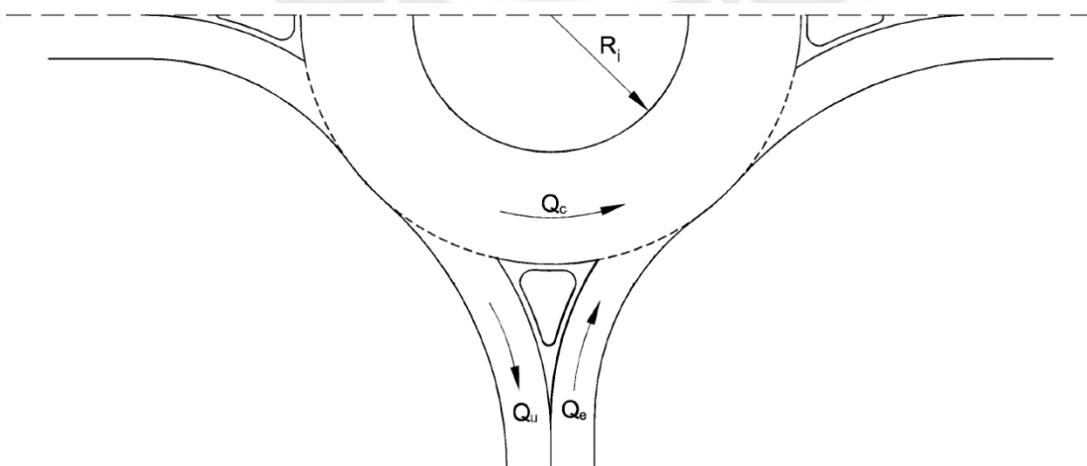


Figura 9. Parámetros incluidos en el modelo del CETUR.

Tomado de “Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability”, por Mauro, 2010.

### 2.2.3. Modelo Mixtos

#### a) Modelo de Guichet (Francia)

En Francia, también se desarrollaron investigaciones basadas en la teoría de aceptación de brechas, pero sin dejar de lado parámetros geométricos de la intersección. Guichet (1997) actualizó y calibró la fórmula escrita por Urbahn en Alemania en 1996, tras el conteo de 63000 vehículos durante 507 períodos de operación saturados entre 5 a 10 minutos en 45 rotondas diferentes, desde pequeñas hasta grandes, ubicadas en zonas urbanas y rurales. En base a ello, Guichet (1997) planteó las ecuaciones (24) y (25).

$$Q_e = A * e^{-C_B * q_d} \quad (24)$$

$$A = \frac{3600}{T_f} * \frac{L_e^{0.8}}{0.35} \quad (25)$$

Dónde:

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

$q_d$ : Flujo perturbador (pcu/h)

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

$T_f$ : Tiempo de seguimiento

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

Guichet (1997) calculó que el tiempo de seguimiento para la realidad francesa era en promedio 2.05 segundos y propone que este valor sea utilizado en su expresión. Asimismo, utiliza en su expresión un flujo perturbador ( $Q_d$ ) que depende linealmente 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 ( $Q_u$ ), como se muestra en la ecuación (26). Esta ecuación

propone coeficientes relacionados a cada uno de estos flujos, los cuales, a su vez, dependen de parámetros geométricos de la rotonda. La figura 10 muestra los flujos planteados por Guichet y su proveniencia, así como las variables geométricas que son consideradas en este modelo.

$$q_d = q_u * k_a * \left(1 - \frac{q_c}{q_u + q_c}\right) + q_{ci} * k_{ti} + q_{ce} * k_{te} \quad (26)$$

$$k_a = \begin{cases} \frac{R_i}{R_i + L_a} - \frac{L_i}{L_{imax}} & , L_i < L_{imax} \\ 0 & , L_i > L_{imax} \end{cases} \quad (27)$$

$$L_{imax} = 4.55 * \sqrt{R_i + \frac{L_a}{2}} \quad (28)$$

$$k_{ti} = \min \left\{ \frac{160}{L_a * (R_i + L_a)} \right. \quad (29)$$

$$\left. 1 - \frac{L_a - 8}{L_a} * \frac{R_i^2}{R_i + L_a} \right\} \quad (30)$$

Dónde:

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

$L_a$ : Ancho de la calzada circular (m)

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

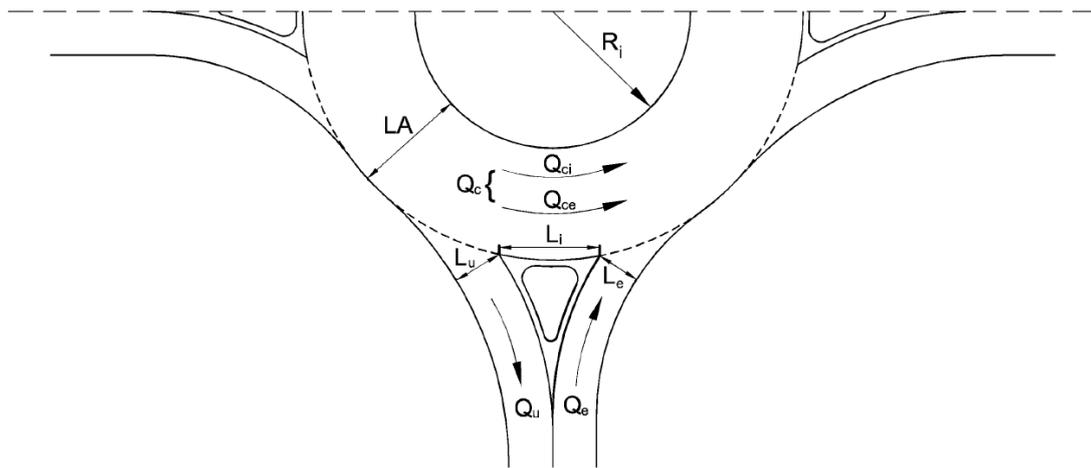


Figura 10. Parámetros incluidos en el modelo de Guichet.

Tomado de “Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability”, por Mauro, 2010.

#### b) Modelo HCM 2010 (Estados Unidos)

Tras la presentación del HCM 2000, se realizaron investigaciones a partir de mediciones a 18 rotondas de un carril y a 7 rotondas de 2 carriles. Estas demostraron una equivalencia entre los coeficientes de un modelo regresión exponencial, como la usada en el modelo de Sieglöch, y parámetros como brecha crítica y tiempo de seguimiento (Rodegerdts et al., 2007, citado en Yap, Gibson & Waterson, 2013). El nuevo modelo presentado por el TRB en el HCM 2010 se basa en estas investigaciones; razón por la cual, las expresiones presentadas son de regresión exponencial. Los coeficientes de estas expresiones han sido calculados bajo parámetros basados en la aceptación de brechas y formuladas en base a la cantidad de carriles de entrada y de circulación (TRB, 2010); por lo cual se puede clasificar al modelo como mixto.

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

La ecuación (31) es la expresión planteada en el HCM 2010 para calcular la capacidad de entrada de un carril a una rotonda de un solo carril de circulación.

$$Q_e = 1130 * e^{-\frac{q_c}{1000}} \quad (31)$$

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

La capacidad para cada carril del ramal de entrada se calcula utilizando la ecuación (31).

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

La ecuación (32) es la expresión planteada en el HCM 2010 para el cálculo de la capacidad de la entrada cuando esta posee un solo carril o para el cálculo de la capacidad del carril derecho cuando la entrada posee dos carriles. Como se mencionó en el HCM 2000, la capacidad de la entrada aumentaría cuando los carriles de circulación fuesen mayores a uno (TRB, 2000), como se puede observar en dicha ecuación.

$$Q_e = 1130 * e^{-\frac{7*q_c}{10000}} \quad (32)$$

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

La ecuación (33) es la expresión planteada en el HCM 2010 utilizada para el cálculo de la capacidad del carril izquierdo del ramal de entrada cuando esta posee dos carriles. En ella se puede notar que la capacidad es ligeramente mayor en comparación al carril derecho, debido a que los tiempos de seguimiento son menores para el carril izquierdo (TRB, 2010). Cabe señalar que para el carril derecho se utiliza la ecuación (32).

$$Q_e = 1130 * e^{-\frac{7.5*q_c}{10000}} \quad (33)$$

Dónde:

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

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

La figura 11 muestra las curvas de flujo de circulación versus capacidad de carril de entrada para cada uno de los casos mostrados anteriormente. En ella podemos observar gráficamente la anotación anterior, al tener la curva de capacidad del carril izquierdo ligeramente por encima de la curva del carril derecho.

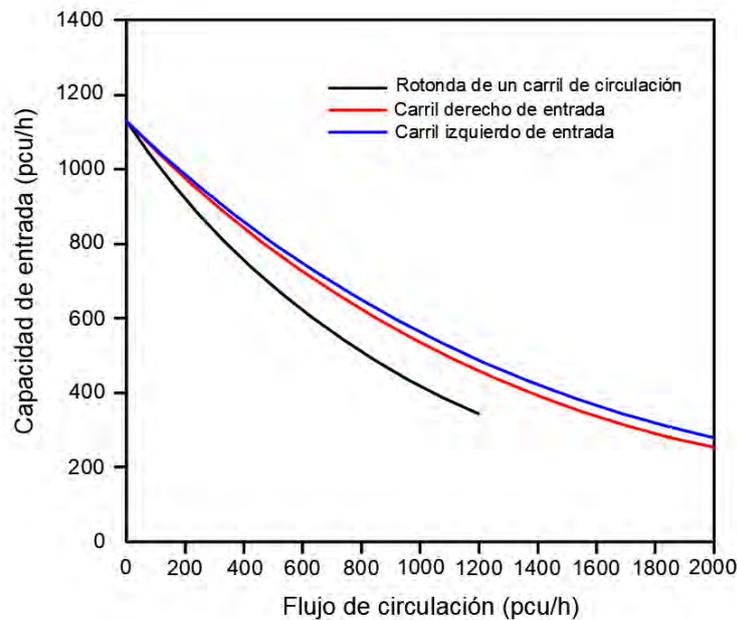


Figura 11. Curvas de flujo de circulación versus capacidad de carril según en los casos presentados en el HCM 2010.

Tomado de “Highway Capacity Manual”, por TRB, 2010.

### 2.3. Parámetros de eficiencia en rotondas

Los diferentes modelos presentados líneas arriba muestran la gran cantidad de investigaciones que se han realizado para lograr un correcto análisis de las rotondas. Sin embargo, para realizar un análisis completo, es necesario evaluar la calidad de la circulación por medio de parámetros de eficiencia como son las longitudes de colas y demoras. Estos parámetros también permiten comparar los valores teóricos de colas y demoras en la entrada a la rotonda analizada con los valores reales medidos en campo, para que, de esa manera, se pueda conocer si los modelos son adecuados para nuestra realidad. A continuación, se detalla

las expresiones propuestas por el TRB (2000, 2010) en el HCM para el cálculo de longitudes de cola y demoras.

### 2.3.1. Longitud de colas en entradas a rotondas

El TRB (2010), en su versión HCM 2010, propone el cálculo de longitud de colas del percentil 95 mediante la ecuación 34, la cual depende de la capacidad de entrada y el grado de saturación medido.

$$Q_{95} = 900 * T * \left( X - 1 * + \sqrt{(1 - X)^2 + \frac{3600}{150 * T} * X} \right) * \frac{Q_e}{3600} \quad (34)$$

Dónde:

Q95: Longitud de cola del percentil 95 (veh)

X: Grado de Saturación

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

T: Periodo de tiempo de análisis (h)

### 2.3.2. Demoras en entradas a rotondas

Asimismo, para el cálculo de demoras en entradas a rotondas, el TRB (2010) propone, en su versión HCM 2010, la ecuación 35, la cual depende de la capacidad de entrada y el grado de saturación medido.

$$d = \frac{3600}{Q_e} + 900 * T * \left( X - 1 * + \sqrt{(1 - X)^2 + \frac{3600}{450 * T} * X} \right) + 5 \quad (35)$$

Dónde:

d: Demora (s/veh)

X: Grado de Saturación

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

T: Periodo de tiempo de análisis (h)

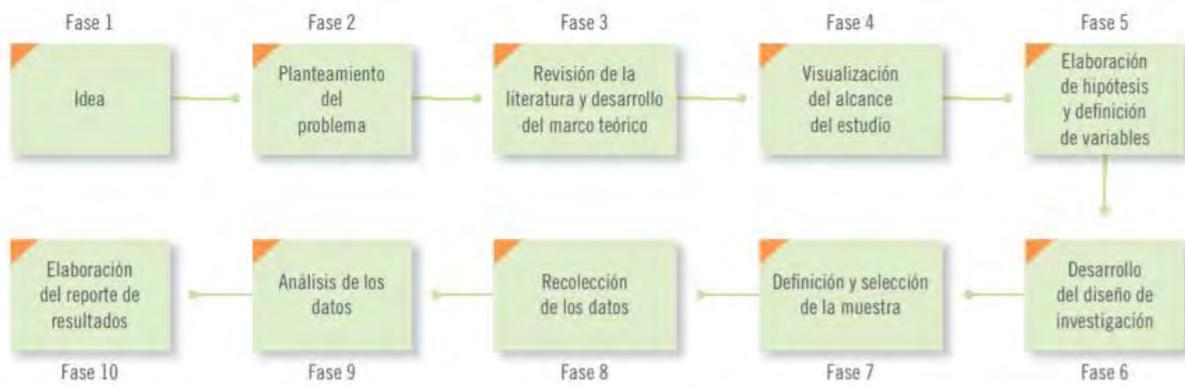
## Capítulo 3

### Metodología

La presente tesis tiene como objetivo principal analizar la aplicabilidad de la metodología HCM 2010 (TRB, 2010) para analizar la capacidad de entradas a una rotonda en la ciudad de Lima, para lo cual se evaluó la rotonda “Los Delfines”. En ella se midió los flujos vehiculares de circulación y demanda de las entradas a esta rotonda, así como las longitudes de cola formadas en estas. Además, se calculó la capacidad de cada entrada y sus longitudes de cola mediante la metodología HCM 2010. Posterior a ello, se comparó las longitudes de cola medidas con las calculadas, mediante un análisis estadístico. Finalmente, se analizó estos resultados con el fin de evaluar el nivel de eficiencia de dicha metodología al ser aplicado en una rotonda en la ciudad de Lima.

#### 3.1. Enfoque de la investigación

La presente investigación posee un enfoque cuantitativo, el cual, según Hernández, Fernández & Baptista (2010), tiene como características principales ser secuencial y probatorio. Estas características refieren el proceso estructurado que sigue este tipo de investigación, el cual no puede ser eludido. La figura 12 muestra el proceso señalado, en el cual evidenciamos que para seguir este enfoque se deben determinar variables, las cuales deben ser medidas y analizadas con la finalidad de probar una hipótesis planteada inicialmente.



*Figura 12. Proceso Cuantitativo*

Tomado de "Metodología de la investigación", por Hernández et al., 2010.

Dicho proceso se ha seguido en la presente investigación, por lo cual se planteó una serie de hipótesis y, con el fin de corroborarlas, se definieron las siguientes variables en torno al objeto de estudio, la metodología HCM 2010:

- $q_e$ : Flujo de demanda de un carril de entrada a una rotonda (veh/h)
- $V_{He}$ : Proporción del flujo de entrada que corresponde a vehículos pesados
- $q_c$ : Flujo de circulación total frente al carril de entrada a evaluar (veh/h)
- $V_{Hc}$ : Proporción del flujo de circulación que corresponde a vehículos pesados
- $N_p$ : Número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada (p/h)
- $Q_e$ : Capacidad de un carril de entrada a una rotonda (veh/h)
- $X$ : Grado de saturación
- $Q_{95}$ : Longitud de cola vehicular del percentil 95(veh)

La variable  $q_e$  representa la cantidad de vehículos que desean ingresar a una rotonda por un carril determinado en un periodo igual a una hora y la variable  $V_{He}$ , la proporción de vehículos considerados pesados en relación al flujo  $q_e$ ; mientras que la variable  $q_c$  representa la cantidad total de vehículos que circulan frente a dicho carril en el mismo periodo y la variable  $V_{Hc}$ , la proporción de vehículos considerados pesados en relación al flujo  $q_c$ . Asimismo, la variable  $N_p$  representa la cantidad de peatones que cruzan frente al mencionado carril en un

periodo igual a una hora; la variable  $Q_e$  representa la cantidad de vehículos que pueden ingresar por este carril hacia la rotonda sin que esta se sature, es decir, sin formas colas permanentes y; la variable  $x$  representa el nivel de saturación del carril. Finalmente, la variable  $Q_{95}$  representa el percentil 95 del número de vehículos que se forman en colas en un periodo de 15 minutos en el carril de entrada frente a una rotonda esperando ingresar a ella

Las cinco primeras variables fueron medidas; las dos siguientes, calculadas; y la última, medida y calculada. Todas ellas fueron analizadas en torno a la metodología HCM 2010 para el cálculo de capacidad de rotondas, a fin de lograr una comparación entre el parámetro de eficiencia “longitud de cola vehicular del percentil 95” ( $Q_{95}$ ) obtenido mediante la metodología y los medidos en campo. Esta comparación permitió comprobar las hipótesis planteadas.

### **3.2. Diseño de la investigación**

Respecto al diseño de la presente investigación, el estudio que se decidió realizar es de tipo no experimental. Estos consisten en la observación de manifestaciones de manera natural, es decir, tal como estas se desarrollan y sin realizar alteraciones sobre estas (Hernández, Fernández & Baptista, 2010). Por lo tanto, la investigación consistió en analizar los resultados de la aplicación de la metodología HCM 2010 para calcular la capacidad de carriles de entrada en una rotonda y las longitudes de cola que se forman en estas, con la finalidad de comparar estos últimos con los valores reales medidos en campo.

Asimismo, los estudios no experimentales pueden clasificarse en dos subtipos: transversales y longitudinales. Estos se diferencian de acuerdo con el periodo de tiempo en el cual se observa un fenómeno determinado. Los transversales tienen como objetivo conocer el estado de las variables en un determinado periodo; mientras que los longitudinales, analizar cambios en el tiempo (Hernández et al., 2010). Por ello, el diseño del presente estudio es no

experimental transversal, ya que se midió las variables en periodos determinados de tiempo para analizar el estado actual de estas, mas no con la finalidad de analizar cambios a lo largo del tiempo.

Finalmente, las investigaciones transversales pueden dividirse en tres grupos: exploratorios, descriptivos y correlacionales-causales. El diseño de la presente investigación es no experimental transversal descriptiva, puesto que las investigaciones de tipo descriptivo tienen como objetivo estudiar la relevancia de las modalidades de una o más variables en una población (Hernández et al, 2010). En relación a ello, la finalidad del presente estudio es evaluar el comportamiento de las variables capacidad de entrada y longitud de cola medida y calculada en torno a la metodología HCM 2010 en rotondas de la ciudad de Lima.

### **3.3. Área de estudio**

Se seleccionó para el análisis de flujo vehicular y parámetros de eficiencia una rotonda en la ciudad de Lima: la rotonda “Los Delfines”, la cual se encuentra ubicada en el distrito de Santiago de Surco. Esta elección se realizó en base a las condiciones de la metodología a evaluar, la cual plantea expresiones para el cálculo de capacidad de carriles de entrada a rotondas que poseen dos carriles de circulación y, como máximo, dos carriles en los ramales de entrada. Asimismo, la elección de esta rotonda se debió a la facilidad de recolección de la información necesaria dada la situación de emergencia sanitaria, punto que es detallado en el subcapítulo 3.4.

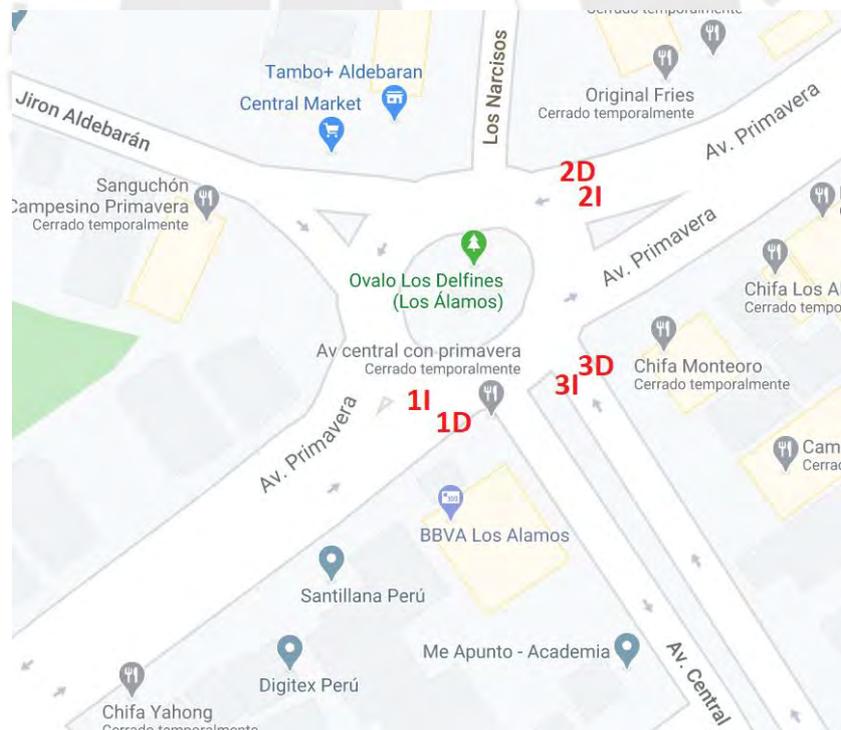
La rotonda “Los Delfines” cuenta con dos carriles de circulación y cinco ramales: dos de entrada y salida de un carril por dirección (Jirón Aldebarán y Calle Los Narcisos) y, tres de entrada y salida de dos carriles por dirección (Avenida Primavera, su continuación y Avenida Central). Cabe señalar que el ramal de la Calle Los Narcisos se encuentra inhabilitado por la presencia de una reja de seguridad y que el ramal del Jirón Aldebarán no cumple con las

características de la metodología a aplicar pues posee una bifurcación a escasos metros de la intersección con la rotonda. Por lo tanto, para el análisis de la capacidad de entrada, se contó con seis carriles de entrada, los cuales son detallados en la tabla 6; asimismo, la figura 13 muestra la ubicación de la rotonda “Los delfines”.

*Tabla 6. Carriles de entrada en la rotonda seleccionada*

Carril de entrada	Denominación de los carriles de entrada
	Rotonda “Los Delfines”
Carril derecho	- Av. Primavera de oeste a este (1D) - Av. Primavera de este a oeste (2D) - Av. Central (3D)
Carril izquierdo	- Av. Primavera de oeste a este (1I) - Av. Primavera de este a oeste (2I) - Av. Central (3I)

Nota. Elaboración propia.



*Figura 13. Rotonda "Los Delfines"*

Tomado de Google Maps, 2020.

Sin embargo, en el capítulo 3.5 se detalla por qué, a pesar de haber recolectado material para realizar los aforos correspondientes, no se pudo medir las variables en las entradas 2 y 3 de la rotonda “Los Delfines”. Por lo tanto, se evaluó únicamente la entrada 1, ubicada en la rotonda “Los Delfines”, la cual cuenta con dos carriles.

### **3.4. Población, muestra y muestreo**

La presente investigación siguió la metodología típica de la ingeniería de tráfico, la cual recomienda que, para realizar una correcta evaluación, se debe contar con información del flujo vehicular en la zona de estudio en tres situaciones: bajo grado de saturación, medio grado de saturación y alto grado de saturación. Asimismo, conforme con lo recomendado por Cabrera (2015), los aforos vehiculares deben realizarse los días martes, miércoles y/o jueves, pues son aquellos días en los que se tienen condiciones normales de tráfico en zonas urbanas. Sin embargo, si se requiriese realizar otro tipo de estudios como demandas hacia centros comerciales o zonas a las afueras de la ciudad, se sugiere realizar las mediciones los fines de semana, pues en estos días se encuentran flujos más altos.

Debido a ello, se requería contar con gran información de los flujos vehiculares en los sujetos de estudio en días de condiciones normales que permita evaluar las tres situaciones mencionadas. Recolectar dicha información en el periodo del desarrollo de la presente investigación, resultó imposible debido al aislamiento social generado por la crisis sanitaria mundial. Por dicha razón, se solicitó el material utilizado para la medición de flujos vehiculares realizado por Nieto (2015), quien investigó acerca de la aplicabilidad del modelo lineal de Kimber para el cálculo de capacidad de rotondas en la ciudad de Lima, la cual posee como sujetos de estudio las rotondas “Los Delfines” y “Villarreal”. Ello permitió contar con material de video de ambas rotondas en los horarios detallados en la tabla 7.

*Tabla 7. Días y horas de las grabaciones*

Día	Martes 18 de agosto del 2015	Miércoles 19 de agosto del 2015	Jueves 20 de agosto del 2015
Horario	6:00 am - 10:00 pm	6:00 am - 10:00 pm	6:00 am - 10:00 pm

Nota. Elaboración propia.

### **3.5. Técnica de recolección de datos**

Para realizar la aplicación de la metodología y la comparación del parámetro de eficiencia real y teórico, se requirió medir una serie de variables. Estas corresponden al flujo de demanda del carril de entrada ( $q_e$ ), el flujo de circulación frente a dicho carril ( $q_c$ ), la proporción del flujo de entrada que corresponde a vehículos pesados (VHe), la proporción del flujo de circulación que corresponde a vehículos pesados (VHc), el número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada ( $N_p$ ) y longitud de cola del percentil 95 formada en cada carril ( $Q_{95}$ ). Con la finalidad de medir estas variables, la recolección de datos de flujo vehicular se realizó por medio de grabaciones de cámaras de seguridad de la Municipalidades de Miraflores y Santiago de Surco, en las rotondas seleccionadas. Como se mencionó anteriormente, estas grabaciones fueron facilitadas por Nieto (2015), quien a su vez las obtuvo por medio de solicitudes realizadas a cada uno de los Municipios, en virtud de la Ley N° 27806, Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Dada la naturaleza de las grabaciones, estas no tienen como finalidad enfocar los flujos vehiculares en las rotondas. Sin embargo, han servido para evaluar periodos de tiempo en los que se enfoca estos flujos en las entradas a las rotondas y en los que fue posible medir cada una de las variables requeridas. Debido a ello, se descartó la utilización de los videos que se encontraban en constante movimiento y no permitía realizar los aforos de 15 minutos en las entradas a las rotondas. Del mismo modo, se descartaron los periodos de tiempo en los que no se enfocaba directamente la intersección entre las entradas y la rotonda, debido a que no se podía realizar la medición de la totalidad de las variables necesarias. Por lo tanto, únicamente

se pudo realizar la recolección de información sobre la entrada 1, ubicada en la rotonda “Los Delfines”.

Tras la revisión de las grabaciones, se aforaron las siguientes características de los flujos vehiculares en cada carril seleccionado durante periodos de 15 minutos correspondientes a diferentes horas del día: la cantidad total de vehículos que circulan en frente a ellos, la cantidad de vehículos que desean ingresar a la rotonda por ellos; así como la composición vehicular del flujo de entrada y flujo de circulación. También, para cada uno de estos periodos, se contó la cantidad de vehículos que se forman en colas en cada carril esperando ingresar a la rotonda y la cantidad de peatones que cruzan frente a cada uno de estos. La figura 14 muestra una captura del material videovigilancia de la entrada 1 de la rotonda “Los Delfines”, entrada evaluada en la presente investigación.

Conocidos estos datos, se depuró aquellos periodos en los que no se formaron colas o no eran medibles, pues sin ese valor, no se contaría con un parámetro de eficiencia para realizar la comparación y no se podría evaluar la aplicación del modelo HCM 2010. Del mismo modo, se depuró aquellas horas de análisis, en los que no se pudo contar con suficientes periodos de 15 minutos que reflejen un periodo de carga máxima, o conocido como periodo pico de 15 minutos. Este periodo se refiere a aquel periodo de 15 minutos que posee mayor flujo de demanda vehicular dentro de una hora de análisis.

Después, para cada hora de análisis, se seleccionó dicho periodo de carga máxima, con la finalidad de obtener los valores máximos por hora, conocidos como flujos de hora pico, necesarios para el análisis de flujo de vehicular propuesto por la metodología evaluada. Finalmente, se determinó los flujos por hora multiplicando por cuatro los valores correspondientes al periodo pico de 15 minutos, con lo cual se obtuvo las siguientes variables

para cada carril y hora evaluada: flujo de circulación ( $q_c$ ), flujo de demanda ( $q_e$ ) y número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada ( $N_p$ ).

Cabe señalar que la variable longitud de cola del percentil 95 en cada carril ( $Q_{95}$ ) será el percentil 95 de todas las colas medidas en cada periodo de 15 minutos seleccionado. Por lo tanto, el valor seleccionado por cada hora de análisis para esta variable será el correspondiente al periodo pico de 15 minutos. Del mismo modo ocurre con las variables proporción del flujo de entrada que corresponde a vehículos pesados ( $V_{He}$ ) y proporción del flujo de circulación que corresponde a vehículos pesados ( $V_{Hc}$ ), por lo que los valores seleccionados por cada hora de análisis para estas variables serán los correspondientes al periodo pico de 15 minutos.



*Figura 14. Video de la rotonda “Los Delfines”*

Tomado de video de la Municipalidad de Santiago de Surco, 2015.

### **3.6. Aplicación de la Metodología HCM 2010**

El TRB (2010), en el Manual de Capacidad de Carreteras 2010 (HCM 2010), plantea una metodología para calcular la capacidad de los carriles de entrada a una rotonda. Esta metodología fue estudiada en la presente investigación, por lo que, el presente acápite detalla la aplicación de la misma.

#### **3.6.1. Datos de entrada**

La metodología HCM 2010 requiere de los siguientes datos para poder calcular la capacidad de cada carril de entrada ( $Q_e$ ) y el parámetro de eficiencia conocido como longitud de cola ( $Q_{95}$ ):

- $q_e$ : Flujo de demanda de un carril de entrada a una rotonda (veh/h)
- $V_{He}$ : Proporción del flujo de entrada que corresponde a vehículos pesados
- $q_c$ : Flujo de circulación total frente al carril de entrada (veh/h)
- $V_{Hc}$ : Proporción del flujo de circulación que corresponde a vehículos pesados
- $N_p$ : Número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada (p/h)

#### **3.6.2. Cálculo de la capacidad de entrada y grado de saturación**

Los siguientes pasos fueron seguidos para la obtención de la capacidad de entrada y grado de saturación de cada carril y hora evaluada:

##### **a) Paso 1: Determinación de factor de ajuste por vehículo pesados**

Dado que los flujos vehiculares medidos contemplan vehículos pesados, es necesario determinar factores de ajustes por esta razón a fin de realizar un estudio que contemple el impacto de ellos. Estos factores dependen de la proporción de vehículos pesados aforados y un valor de vehículo pesado equivalente ( $E_{hv}$ ) a un vehículo estándar denominado “passenger car unit” (pcu). Este tipo de vehículo comprende automóviles y camionetas, por lo tanto, posee una

equivalencia igual a uno; mientras que un vehículo pesado, una equivalencia igual a dos ( $E_{hv}=2$ ). Las ecuaciones (36) y (37) muestran el cálculo de los factores de ajuste:

$$f_{HVe} = \frac{1}{1 + V_{He}(E_{hve} - 1)} \quad (36)$$

$$f_{HVc} = \frac{1}{1 + V_{Hc}(E_{hvc} - 1)} \quad (37)$$

Dónde:

$f_{HVe}$ : Factor de ajuste por vehículo pesados en el flujo de entrada

$f_{HVc}$ : Factor de ajuste por vehículo pesados en el flujo de circulación

**b) Paso 2: Conversión de flujos por vehículos pesados**

La ecuación (38) permitió convertir los flujos medidos bajo aforos de vehículos por hora a pcu por hora, toda vez que las expresiones para el cálculo de capacidad de carril entrada se encuentran en esta unidad:

$$q_{c,pcu} = \frac{q_c}{f_{HVc}} \quad (38)$$

Dónde:

$q_c, pcu$ : Flujo circulante total (pcu/h)

**c) Paso 3: Cálculo de la capacidad de cada carril de entrada (pcu/h)**

Las diferentes expresiones propuestas por la metodología HCM 2010 permitieron calcular la capacidad de cada carril evaluado, cada una de ellas para características propias del carril a evaluar:

- Para el carril derecho de un ramal de entrada de dos carriles y dos carriles de circulación:

$$Q_{e,pcu} = 1130 * e^{-\frac{7 * q_{c,pcu}}{1000}} \left( \frac{pcu}{h} \right) \quad (39)$$

- Para el carril izquierdo de un ramal de entrada de dos carriles y dos carriles de circulación:

$$Q_{e,pcu} = 1130 * e^{-\frac{7.5*qc,pcu}{10000}} \left(\frac{pcu}{h}\right) \quad (40)$$

Dónde:

$Q_{e,pcu}$ : Capacidad de entrada de un carril (pcu/h)

**d) Paso 4: Determinar el factor de ajuste de capacidad por peatones**

El flujo peatonal que cruza un carril de entrada entra conflicto con el flujo vehicular que desea ingresar a la rotonda; por ende, es necesario ajustar la capacidad de cada carril por esta razón. La tabla 8 muestra las expresiones para calcular el factor de ajuste por peatones para entrada de dos carriles, el cual varía de acuerdo al número de peatones que entran en conflicto con los flujos de entrada.

*Tabla 8. Factor de ajuste por peatones para entradas de dos carriles*

Caso	Factor de ajuste por peatones
Si $Np < 100$	$fp = \min \left[ 1 - \frac{Np}{100} * \left( 1 - \frac{1260.6 - 0.329 * qc,pcu - 0.381 * 100}{1380 - 0.5 * qc,pcu} \right), 1 \right]$
También	$fp = \min \left[ \frac{1260.6 - 0.329 * qc,pcu - 0.381 * Np}{1380 - 0.5 * qc,pcu}, 1 \right]$

Nota. Tomado de “Highway Capacity Manual”, por TRB, 2010.

**e) Paso 5: Cálculo de la capacidad de cada carril de entrada (veh/h)**

La capacidad de cada carril de entrada calculada debe ajustarse debido a la presencia de vehículos pesados y el cruce de peatones. La ecuación (41) permitió realizar estos ajustes.

$$Q_e = Q_{e,pcu} * f_{HVe} * fp \left(\frac{veh}{h}\right) \quad (41)$$

Dónde:

$Q_e$ : Capacidad de un carril de entrada a una rotonda (veh/h)

#### f) Paso 6: Cálculo del grado de saturación

El grado de saturación ( $X$ ) representa la relación entre la demanda de sobre la capacidad de un carril de entrada a una rotonda. La ecuación (42) permitió calcular esta variable.

$$X = \frac{qe}{Q_e} \quad (42)$$

#### 3.6.3. Cálculo de la longitud de cola

La longitud de cola es un parámetro de eficiencia, el cual permite relacionar los grados de saturación con las longitudes de colas medidas y calculadas. El cálculo de la longitud de cola se realizó mediante la ecuación (43), expresión propuesta por el TRB (2010), la cual plantea el cálculo del percentil 95 de la longitud de cola ( $Q_{95}$  calculado).

$$Q_{95\text{calculado}} = 900 * T * \left( X - 1 * + \sqrt{(1 - X)^2 + \frac{3600}{150 * T} * X} \right) * \frac{Q_e}{3600} \quad (43)$$

Dónde:

$Q_{95\text{calculado}}$ : Longitud de cola del percentil 95 calculado mediante la metodología HCM 2010 (veh)

$T$ : Periodo de tiempo de análisis (h)

Se utilizó como periodo ( $T$ ) el valor de 0.25, el cual hace referencia a los periodos de 15 minutos evaluados y en los cuales se midió las colas reales en campo para poder ser comparadas.

### 3.7. Comparación de longitudes de cola medidas y calculadas

La comparación entre las longitudes de cola medidas y calculadas fue el medio para determinar si la capacidad calculada por la metodología HCM 2010 es realmente la que posee cada entrada evaluada. Esta comparación se puede realizar debido a que, para cada grado de saturación obtenido, se posee una longitud de cola calculada mediante la metodología y una longitud de cola real medida en campo. En base a ello, se realizó la comparación gráfica de estas dos longitudes respecto al grado de saturación para determinar el rango de valores de este último para el cual se observa cierta similitud, dejando de lado aquellos rangos en los que se observe gran diferencia.

Asimismo, se realizó un análisis estadístico de las longitudes de colas medidas y calculadas en el rango de grados de saturación determinado para corroborar, estadísticamente, la similitud entre ambas. El análisis escogido fue la regresión lineal, debido a que este análisis estima el efecto de una variable sobre otra (Hernández et al., 2010). Mediante la regresión lineal se obtiene una recta que relaciona una variable dependiente y otra independiente, a partir de un diagrama de dispersión de ambas variables. La ecuación muestra las variables analizadas y la ecuación de la recta que las relaciona, la cual se utilizó para realizar la comparación entre las longitudes de cola.

$$Y = AX + B \quad (44)$$

Dónde:

Y: Variable independiente

X: Variable dependiente

A: Pendiente de la recta

B: Intercepto de la recta

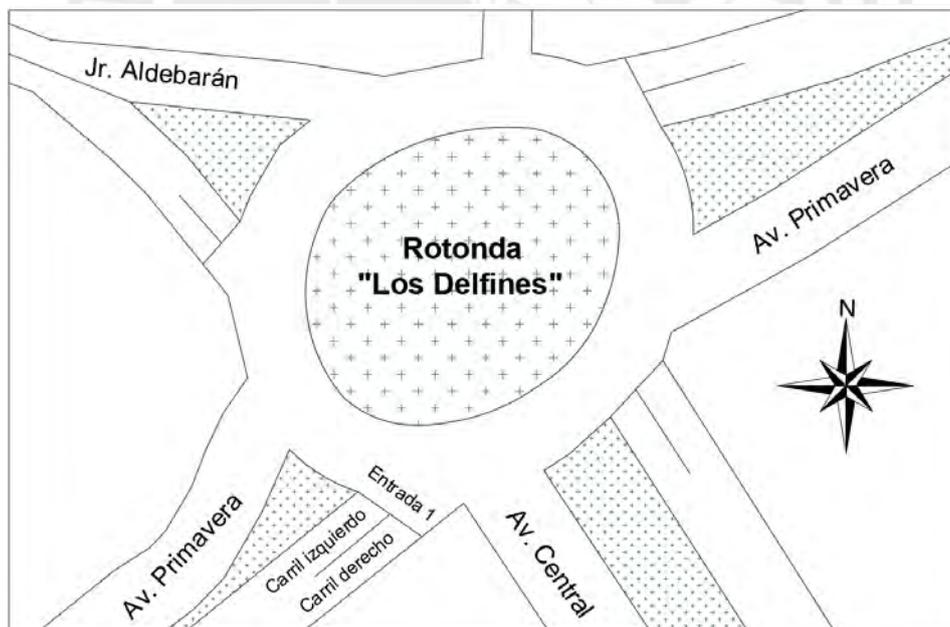
Para realizar el análisis estadístico llamado regresión lineal se utilizó la herramienta de análisis de datos del programa Microsoft Excel. El procedimiento consistió en ingresar una muestra conformada por dos grupos de datos: longitud de colas medidas como variable independiente y longitud de colas calculadas como variable dependiente. A partir de esto, el programa genera los coeficientes de la ecuación de la recta, así como dos parámetros que permiten conocer la relación entre estas variables: el coeficiente de correlación ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ). La primera varía entre -1 y +1 y representa el grado de dependencia lineal entre ambas variables; mientras que la segunda varía entre 0 y 1 y representa el porcentaje de la variable independiente que es explicado por la variable dependiente

Esta información permitió evaluar el grado de correlación existente entre los valores de longitud de cola medida y longitud de cola calculada de la muestra original; así como el nivel de bondad de la regresión. De acuerdo con Creswell (2005), un coeficiente de determinación entre 0.66 y 0.85 muestra que la regresión estima bien una variable respecto a otra; sin embargo, para valores mayores a 0.85, se podría decir que estas variables representarían el mismo valor (Citado en Hernández et al., 2010). A partir de esto, se obtuvo como resultados hasta qué grado de saturación son aceptados, o no, como similares las longitudes de cola medidas y calculadas mediante la metodología HCM 2010. Por lo tanto, se pudo concluir hasta qué grado de saturación es aplicable, o no, la metodología HCM 2010 para el cálculo de la capacidad de entrada en la rotonda evaluada.

## Capítulo 4

### Resultados y análisis

El presente acápite expone los resultados de la medición y cálculo de las variables planteadas mediante la metodología HCM 2010; así como el análisis de las características de tráfico que estas variables describen. Estos resultados se agrupan en resultados obtenidos para el carril derecho y resultados obtenidos para el izquierdo, ambos pertenecientes a la entrada 1 de la rotonda “Los Delfines”, el cual refiere a la avenida Primavera en sentido de suroeste a noreste, como se observa en la figura 15. Esto se debe a que la metodología aplicada presenta una fórmula distinta para el cálculo de capacidad de cada uno de estos carriles. Asimismo, en este capítulo se describe el análisis comparativo realizado entre el parámetro de eficiencia medido y el calculado mediante la metodología, el permitió determinar el grado de similitud entre estos.



*Figura 15. Carriles de la entrada 1 de la rotonda “Los Delfines”*

Elaboración propia.

#### **4.1. Características de tráfico en el carril derecho**

Los resultados obtenidos tras la medición de las variables y la aplicación de la metodología HCM 2010 en el carril derecho de la entrada 1 se observan en la tabla 9. Estos muestran las diversas características del tráfico en dicho carril en diferentes horas a lo largo de tres días. Entre las principales características encontramos la demanda vehicular ( $q_e$ ), el flujo de circulación ( $q_c$ ), el grado de saturación ( $x$ ) y el percentil 95 de la longitud de cola ( $Q_{95}$ ). Por lo tanto, en primer lugar, se analizan estos resultados y, posteriormente, se describe la influencia del porcentaje de vehículos pesados ( $V_{hve}$ ,  $V_{hvc}$ ) y número de peatones que entran en conflicto ( $N_p$ ) sobre los primeros.

##### **a) Demanda y flujo de circulación**

La demanda en este carril fue medida y se obtuvieron valores entre 392 veh/h y 744 veh/h, los cuales presentan una media igual a 566 veh/h, una desviación estándar igual a 102 veh/h y un coeficiente de variación igual a 17.95%. El flujo de circulación fue medido y comprende ambos +carriles de circulación frente a la entrada. Esta variable presenta una media igual a 603 veh/h, una desviación estándar igual 90.20 veh/h y un coeficiente de variación igual a 15%. La figura 16 muestra que tan solo el 32% del flujo de circulación es explicado por la demanda de entrada, por lo tanto, no existe una relación consistente entre ambos, por lo que serían independientes una de la otra.

##### **b) Capacidad**

La capacidad del carril ( $Q_e$ ) fue calculada y se obtuvieron valores entre 591 veh/h y 738 veh/h, los cuales presentan una media igual a 672 veh/h, una desviación estándar igual a 41.40 veh/h y un coeficiente de variación igual a 6.16%. Esta variable depende del flujo de circulación ( $q_c$ ) en un primer momento, cuando es calculada aplicando la ecuación planteada por la metodología. A partir de ello, se puede analizar que para un rango de valores  $q_c$  con variabilidad de 15%, se obtienen valores de capacidad con variabilidad igual a 6.3%, lo cual

muestra que la capacidad calculada tiende a poseer menor dispersión. Luego, este valor de capacidad es ajustado por la proporción de vehículos pesados ( $V_{hve}$ ) y por el número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada ( $N_p$ ). Por lo tanto, es necesario evaluar la influencia que poseen estas dos últimas variables sobre la capacidad.

**c) Grado de saturación**

El grado de saturación es la variable que relaciona la demanda ( $q_e$ ) con la capacidad ( $Q_e$ ). Como se puede observar en la tabla 9, se han evaluado periodos de tiempo en diferentes horarios de tres días, logrando obtener una diversidad de grados de saturación ( $x$ ) entre 0.56 y 1.26, como se esperaba. Se puede decir que esta variable se ha visto mayormente influenciada por la demanda, debido a que esta última presenta un coeficiente de variación igual al triple que el de la capacidad, lo cual permitió obtener el mencionado rango de grados de saturación. La figura 17 muestra la variación entre la demanda ( $q_e$ ) y la capacidad ( $Q_e$ ), en relación al grado de saturación ( $x$ ), en la cual se puede notar gráficamente el nivel de variabilidad de cada una de estas variables.

**d) Longitud de cola medida**

Respecto al percentil 95 de la longitud de cola medida, este varía entre dos y quince vehículos en los diferentes periodos. Cada uno de los valores obtenidos representa la longitud de cola máxima formada en cada periodo pico de quince minutos. De acuerdo con la metodología, este debería incrementar en relación al grado de saturación; sin embargo, existen periodos de grados de saturación medio en los que se forman largas colas. Esto probablemente se deba a que la demanda superó a la capacidad en periodos menores a los evaluados, generando estas longitudes de cola. Una muestra de ello son los periodos entre las 6:45 y 7:15 am del día 18 de agosto, donde la demanda superó la capacidad de la entrada en un periodo menor al de quince minutos alrededor a las 7:00 am, lo cual generó largas colas y congestión vehicular.

**e) Proporción de vehículos pesados**

Por otro lado, existen variables secundarias que han influenciado en el cálculo de las variables descritas. Este es el caso de la proporción de vehículos pesados en el carril de entrada ( $V_{hve}$ ). Esta variable en este carril se vio influenciada por la existencia de un paradero informal a escasos metros de la intersección y a la propia naturaleza del carril, por el cual deberían desplazarse los vehículos pesados de acuerdo a la normativa de tránsito. Por lo tanto, se obtuvo un valor promedio para esta variable igual a 0.031 (3%), el cual influyó en el ajuste por vehículo pesado de la capacidad de la entrada.

Del mismo modo, el porcentaje de vehículos pesados en el flujo de circulación ( $V_{hvc}$ ) influye en el cálculo directo de la capacidad de la entrada debido a que este se realiza utilizando el flujo de circulación en pcu/h. Sin embargo, el factor de ajuste por vehículos pesados en el flujo de circulación es prácticamente uno (0.994), por lo que la influencia de la variable  $V_{hvc}$  se puede considerar despreciable. Esto se debe a que, de acuerdo a lo medido, el valor promedio de esta variable es igual a 0.006 (0.6%), al no ser una vía por la que circule transporte público.

**f) Número de peatones que entran en conflicto**

Por último, el cálculo de la capacidad de entrada ( $Q_e$ ) se ajusta por un factor de peatones, relacionado al número de personas que entra en conflicto con los vehículos que desean ingresar a la rotonda ( $N_p$ ). Esta variable se midió y se obtuvo valores entre 80 y 256 personas por hora, lo cual muestra la variación de la presencia peatonal a lo largo del día en la rotonda. Este flujo peatonal permitió calcular el factor de ajuste mencionado, el cual varió entre 0.91 y 0.98, lo cual demuestra que un flujo peatonal alto que entre en conflicto con el flujo vehicular de entrada puede afectar en gran proporción a la capacidad de dicha entrada.

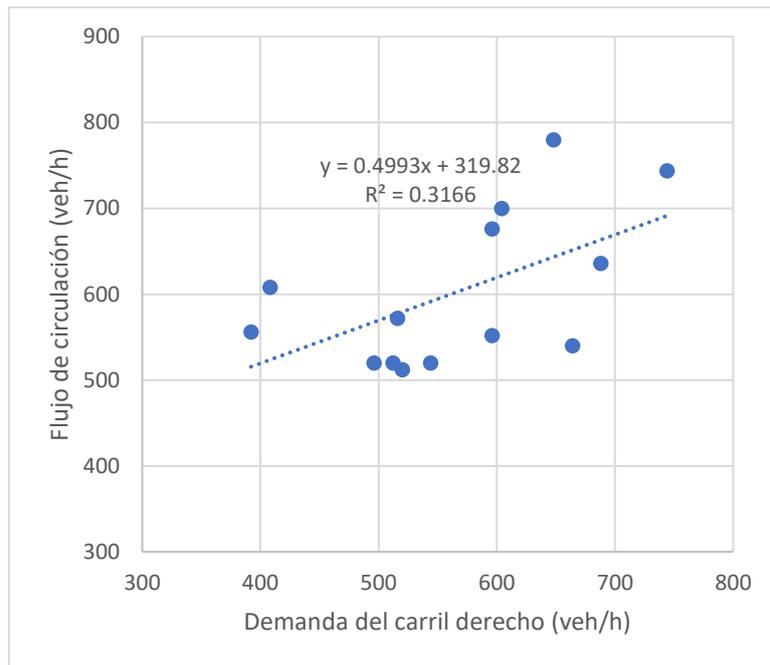


Figura 16. Demanda ( $q_e$ ) vs flujo de circulación ( $q_c$ ) en el carril derecho

Elaboración propia.

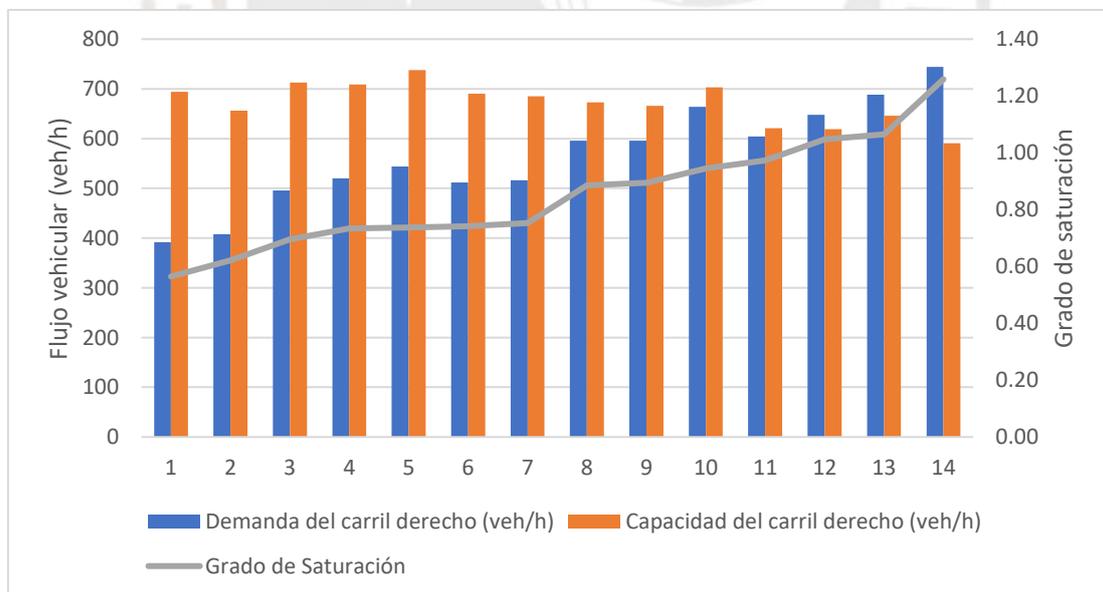


Figura 17. Grado de saturación y sus variables de dependencia en el carril derecho.

Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados de flujos vehiculares y colas en el carril derecho de la entrada 1 a la rotonda “Los Delfines”

Carril derecho	Hora	Periodo pico de 15 min	Día	Demanda					Flujo de circulación					Qe (pcu/h)	Np	Fp	Qe (veh/h)	x	Longitud de cola	
				Demanda de 15 minutos (veh)	qe (veh/h)	Vhve	Fhve	qe (pcu/h)	Flujo de circulación de 15 minutos (veh)	qc (veh/h)	Vhvc	Fhvc	qc (pcu/h)						Q95 medido (veh)	Q95 calculado (veh)
D-1	8:30 - 9:00	8:30 - 8:45	18/08/2015	98	392	0.020	0.980	400	139	556	0.007	0.993	560	764	152	0.93	694	0.56	4	4
D-1	9:00 - 10:00	9:00 - 9:15	18/08/2015	102	408	0.049	0.953	428	152	608	0.007	0.993	612	737	152	0.93	656	0.62	2	5
D-1	13:00 - 14:00	13:30 - 13:45	19/08/2015	124	496	0.024	0.976	508	130	520	0.008	0.992	524	784	124	0.93	713	0.70	2	6
D-1	07:00 - 8:00	07:00 - 7:15	20/08/2015	130	520	0.038	0.963	540	128	512	0.000	1.000	512	790	120	0.93	709	0.73	10	7
D-1	20:00 - 21:00	20:30 - 20:45	19/08/2015	136	544	0.007	0.993	548	130	520	0.000	1.000	520	786	80	0.95	738	0.74	3	7
D-1	15:00 - 16:00	15:30 - 15:45	20/08/2015	128	512	0.039	0.962	532	130	520	0.000	1.000	520	786	180	0.91	690	0.74	4	7
D-1	14:00 - 15:00	14:45 - 15:00	20/08/2015	129	516	0.023	0.977	528	143	572	0.007	0.993	576	756	156	0.93	685	0.75	3	7
D-1	7:00 - 8:00	7:00 - 7:15	18/08/2015	149	596	0.054	0.949	628	138	552	0.007	0.993	556	766	152	0.93	673	0.89	15	11
D-1	9:00 - 10:00	9:00 - 9:15	19/08/2015	149	596	0.013	0.987	604	169	676	0.006	0.994	680	703	104	0.96	666	0.89	3	12
D-1	6:00 - 7:00	6:45 - 7:00	18/08/2015	166	664	0.030	0.971	684	135	540	0.007	0.993	544	773	116	0.94	703	0.94	12	14
D-1	8:00 - 9:00	8:45 - 9:00	19/08/2015	151	604	0.053	0.950	636	175	700	0.000	1.000	700	693	156	0.94	621	0.97	6	15
D-1	06:00 - 7:00	06:45 - 7:00	20/08/2015	162	648	0.037	0.964	672	195	780	0.010	0.990	788	651	80	0.98	619	1.05	5	18
D-1	17:00 - 18:00	17:45 - 18:00	19/08/2015	172	688	0.017	0.983	700	159	636	0.013	0.988	644	720	220	0.91	646	1.07	6	19
D-1	18:00 - 19:00	18:00 - 18:15	19/08/2015	186	744	0.032	0.969	768	186	744	0.011	0.989	752	668	256	0.91	591	1.26	12	29

Nota. Elaboración propia.

## **4.2. Características de tráfico en el carril izquierdo**

Del mismo modo que en el subcapítulo anterior, en este apartado se analiza las características de tráfico del carril izquierdo de la entrada 1 a la rotonda “Los Delfines”. Los resultados de las variables medidas y calculadas que describen estas características se muestran en la tabla 10. Asimismo, se detallan las variaciones entre las variables presentadas en el carril izquierdo y derecho de la entrada 1, con la finalidad de analizar la influencia de estas en el cálculo de la capacidad de cada carril.

### **a) Periodos de análisis**

Los periodos de quince minutos en los que se midieron las variables han sido los mismos para ambos carriles; por ello, los periodos de análisis de una hora son los mismos. Sin embargo, los periodos de carga máxima de quince minutos no son los mismos en todos los periodos de una hora, en comparación con el carril derecho. En los periodos entre las 13:00 y 14:00, y entre las 20:00 y 21:00 del día 19 de agosto, se determinaron periodos de 15 minutos máximos distintos a los del carril derecho. Esto significa que el flujo circular y el número de peatones que entran en conflicto no son los mismos que en el carril derecho en estas horas de análisis.

### **b) Demanda y flujo de circulación**

La demanda ( $q_e$ ) fue medida y se obtuvieron valores que varían entre 492 veh/h y 764 veh/h, valores mayores a los medidos en el carril derecho. Esta variable posee una media igual a 600 veh/h, una desviación estándar igual a 76.47 veh/h y un coeficiente de variación igual a 12.74%. El flujo de circulación fue medido y se obtuvieron valores que varían entre 460 veh/h y 780 veh/h. Esta variable posee una media igual a 599 veh/h, una desviación estándar igual a 95.43 veh/h y un porcentaje de variación igual a 15.94%. La figura 18 muestra que el 69% del flujo de circulación es explicado por la demanda de entrada. Por lo tanto, a diferencia del carril

derecho, estas variables presentan una correlación considerable, de acuerdo con Hernández et al. (2010).

**c) Capacidad)**

La capacidad ( $Q_e$ ) fue calculada y se obtuvieron valores que varían entre 581 veh/h y 741 veh/h, los cuales presentan una media igual a 666 veh/h, una desviación estándar igual a 43.98 veh/h y un coeficiente de variación igual a 6.61%. Cabe señalar que este rango de valores es menor a los obtenidos en el carril derecho. Esta diferencia de la capacidad entre ambos carriles se debe a características propias de las ecuaciones de la metodología, por las cuales, para un mismo flujo circulante ( $q_c$ ), se obtiene mayor capacidad en el carril derecho que en el izquierdo. Esto último podría deberse a que los valores de brecha crítica y tiempo de seguimiento con los que se calibró el modelo fueron mayores en el carril izquierdo. Asimismo, para este carril, el ajuste por vehículos pesados en la entrada tuvo menor relevancia que en el carril derecho, pues la proporción de vehículos pesados en el carril izquierdo es la tercera parte que en el derecho.

**d) Grado de saturación**

A diferencia de los grados de saturación calculados en el carril derecho, para el carril izquierdo se obtuvieron valores mayores, los cuales oscilan entre 0.67 y 1.3 para las mismas horas de análisis. Esto se debe a que los valores del rango de la demanda del carril izquierdo son mayores que los del carril derecho. También, ello se debe a que los valores del rango de la capacidad del carril izquierdo son similares a los del carril derecho, por lo que el grado de saturación no se vería afectado en gran medida por esta variable.

Asimismo, para el carril izquierdo, la relación entre los grados de saturación y las variables de las que depende se puede observar en la figura 19. En ella se puede notar una relación inversa entre la demanda y la capacidad, pues para demandas menores se observa

capacidades altas, y viceversa. Esto se verifica en la figura 20, donde se aprecia que estas variables poseen un nivel de correlación alrededor de 0.8. Ello, más que una relación entre estas variables, es una consecuencia de la relación directamente proporcional que se evidenció entre la demanda y el flujo de circulación en esta entrada. Por lo tanto, conocida la ecuación para el cálculo de capacidad, se puede decir que, a mayor demanda, mayor flujo de circulación, y, por lo tanto, menor capacidad.

**e) Longitud de cola medida**

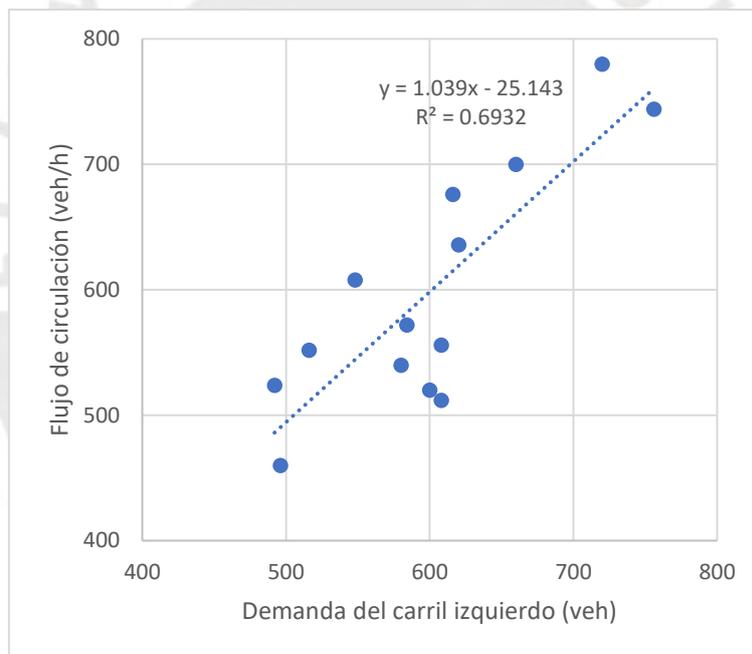
Respecto al percentil 95 de longitud de cola medida, para el carril izquierdo, esta variable varía entre 3 y 15 vehículos. Al igual que para el carril derecho, estos valores resultaron ser la longitud de cola máxima en los periodos pico de quince minutos. Asimismo, los valores medidos presentan una media igual a 6.86 vehículos, un valor mayor al correspondiente al carril derecho, el cual equivale a 6.21 vehículos. Esto se debe a que los valores del intervalo de demanda presentados en el carril izquierdo son mayores a los del carril derecho. Sin embargo, en este carril también se presentan grandes longitudes de cola en periodos de grados de saturación medio, debido a la misma razón explicada en el apartado anterior.

**f) Proporción de vehículos pesados**

Por otro lado, las proporciones de vehículos pesados en el carril izquierdo de entrada ( $V_{hve}$ ) fueron medidas y se obtuvieron valores con un promedio igual a 1%. Ello se debe a la naturaleza del carril, pues, como se explicó en el subcapítulo anterior, los vehículos pesados por normativa deben circular en el carril derecho de una vía, dando la libertad de adelanto por el carril izquierdo. Por lo tanto, para este carril, el factor por vehículo pesado resultó cercano a uno (0.99), por lo cual, esta variable no afecta en gran proporción el ajuste de la capacidad. Lo mismo ocurre con la proporción de vehículos pesados en el flujo de circulación, la cual posee un promedio igual a 0.59%, dado que por esta vía no circula transporte público y el transporte de carga es el único que genera estos bajos porcentajes.

**g) Número de peatones que entran en conflicto**

Por último, se ha obtenido una media del número de peatones que entran en conflicto con el flujo de entrada del carril izquierdo igual a 152 peatones, un valor mayor al del carril derecho, para el cual se obtuvo 142 peatones. Esta diferencia se debe a que para dos periodos de una hora de análisis se obtuvieron periodos máximos de quince minutos distintos a los del carril derecho. Sin embargo, el valor de la media del factor de ajuste calculado para el carril izquierdo, igual a 0.93, es el mismo que se obtuvo para el carril derecho. Por lo tanto, al igual que para el carril derecho, se puede decir que esta variable puede generar un ajuste considerable sobre la capacidad para flujos altos de peatones que cruzan por la entrada a una rotonda.



*Figura 18. Demanda ( $q_e$ ) vs flujo de circulación ( $q_c$ ) en el carril izquierdo*

Elaboración propia.

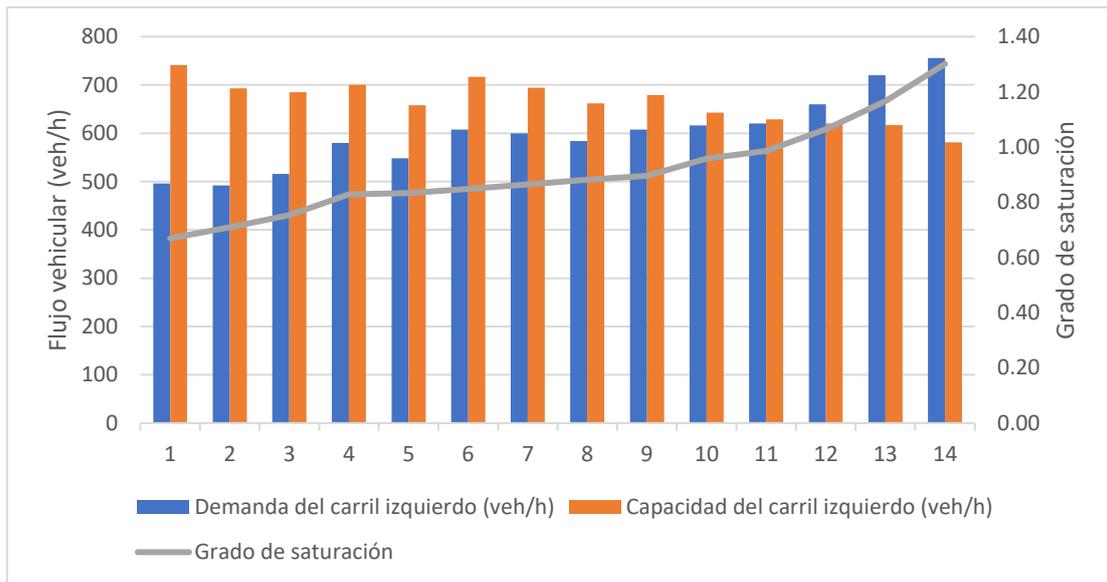


Figura 19. Grado de saturación y sus variables de dependencia en el carril izquierdo

Elaboración propia.

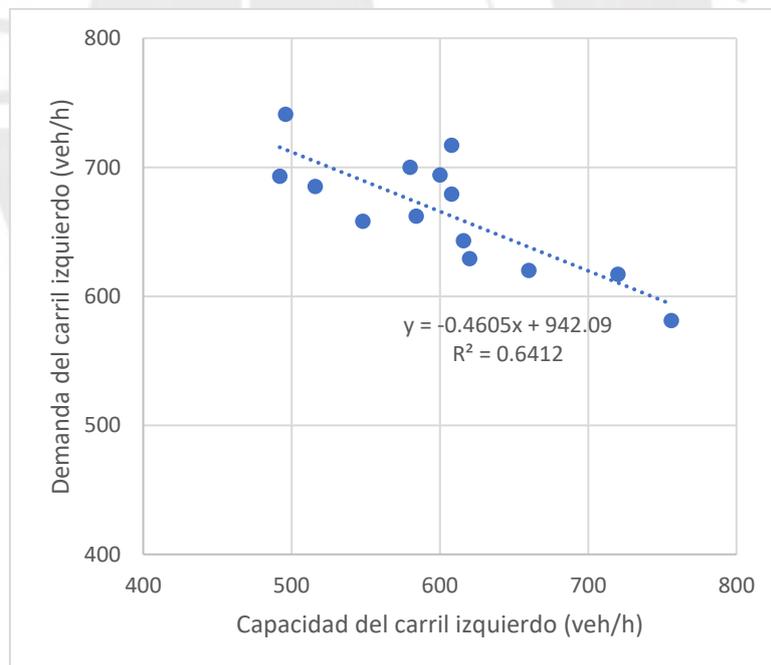


Figura 20. Demanda ( $q_e$ ) vs capacidad ( $Q_e$ ) en el carril izquierdo

Elaboración propia.

Tabla 10. Resultados de flujos vehiculares y colas en el carril izquierdo de la entrada 1 a la rotonda “Los Delfines”

Carril Izquierdo	Hora	Periodo pico de 15 min	Día	Demanda					Flujo de circulación					Qe (pcu/h)	Np	Fp	Qe (veh/h)	x	Longitud de cola	
				Demanda de 15 minutos (veh)	qe (veh/h)	Vhv	Fhv	qe (pcu/h)	Flujo de circulación de 15 minutos (veh)	qc (veh/h)	Vhv	Fhv	qc (pcu/h)						Q95 medido (veh)	Q95 calculado (veh)
I-1	20:00 - 21:00	20:15 - 20:30	19/08/2015	124	496	0.000	1.000	496	115	460	0.000	1.000	460	801	120	0.92	741	0.67	4	6
I-1	13:00 - 14:00	13:45 - 14:00	19/08/2015	123	492	0.008	0.992	496	131	524	0.008	0.992	528	761	164	0.92	693	0.71	3	6
I-1	7:00 - 8:00	7:00 - 7:15	18/08/2015	129	516	0.008	0.992	520	138	552	0.007	0.993	556	745	152	0.93	685	0.75	15	7
I-1	6:00 - 7:00	6:45 - 7:00	18/08/2015	145	580	0.007	0.993	584	135	540	0.007	0.993	544	752	116	0.94	700	0.83	14	10
I-1	9:00 - 10:00	9:00 - 9:15	18/08/2015	137	548	0.015	0.986	556	152	608	0.007	0.993	612	715	152	0.93	658	0.83	3	10
I-1	07:00 - 8:00	07:00 - 7:15	20/08/2015	152	608	0.000	1.000	608	128	512	0.000	1.000	512	770	120	0.93	717	0.85	10	10
I-1	15:00 - 16:00	15:30 - 15:45	20/08/2015	150	600	0.007	0.993	604	130	520	0.000	1.000	520	766	180	0.91	694	0.86	4	11
I-1	14:00 - 15:00	14:45 - 15:00	20/08/2015	146	584	0.027	0.973	600	143	572	0.007	0.993	576	734	156	0.93	662	0.88	5	11
I-1	8:00 - 9:00	8:30 - 8:45	18/08/2015	152	608	0.013	0.987	616	139	556	0.007	0.993	560	743	152	0.93	679	0.90	5	12
I-1	9:00 - 10:00	9:00 - 9:15	19/08/2015	154	616	0.013	0.987	624	169	676	0.006	0.994	680	679	104	0.96	643	0.96	3	14
I-1	17:00 - 18:00	17:45 - 18:00	19/08/2015	155	620	0.013	0.987	628	159	636	0.013	0.988	644	698	220	0.91	629	0.99	4	15
I-1	8:00 - 9:00	8:45 - 9:00	19/08/2015	165	660	0.018	0.982	672	175	700	0.000	1.000	700	669	156	0.94	620	1.06	9	19
I-1	06:00 - 7:00	06:45 - 7:00	20/08/2015	180	720	0.000	1.000	720	195	780	0.010	0.990	788	626	80	0.98	617	1.17	5	25
I-1	18:00 - 19:00	18:00 - 18:15	19/08/2015	189	756	0.011	0.990	764	186	744	0.011	0.989	752	643	256	0.91	581	1.30	12	32

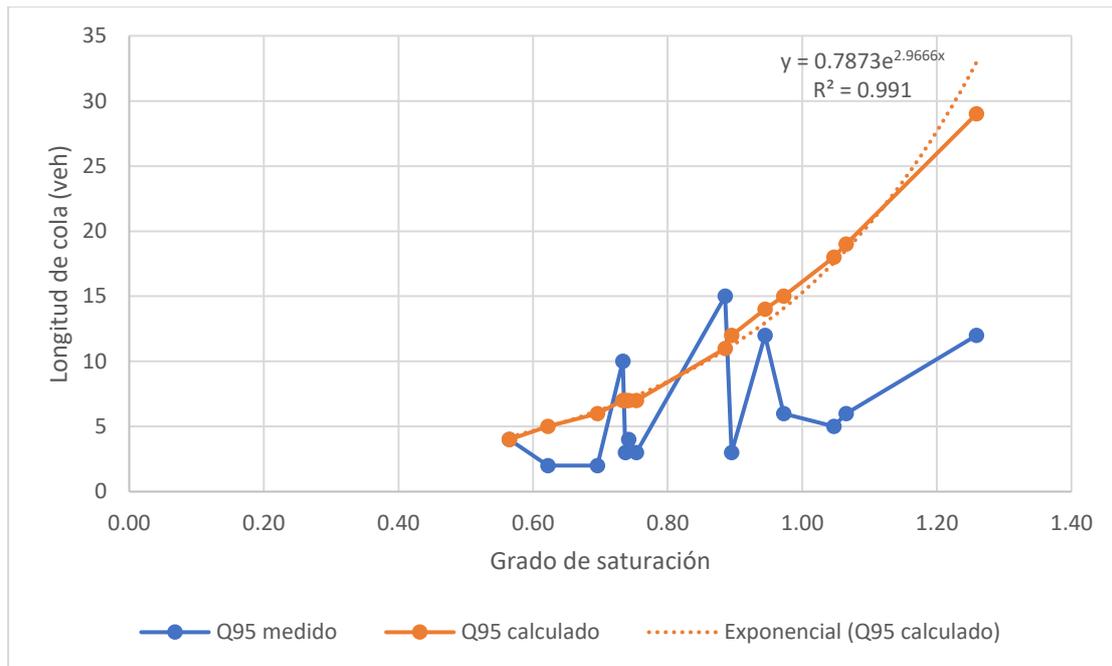
Nota. Elaboración propia.

### 4.3. Comparación de longitudes de colas en el carril derecho

El parámetro de eficiencia longitud de cola que plantea el HCM 2010 para el análisis de rotondas se refiere al percentil 95 de todas las colas formadas en un carril en periodos de 15 minutos. El cálculo de este parámetro depende del grado de saturación, por lo que, para cada grado de saturación obtenido en los diferentes periodos analizados en el carril derecho de la entrada 1, se posee una cola medida y una calculada. En ese sentido, este apartado muestra el análisis de estos resultados y la comparación entre ellos, a fin de identificar el grado de similitud existente entre ambos.

Como se muestra en la figura 21, los valores del percentil 95 de longitud de cola calculada (Q95 calculado) son mayores a los del percentil 95 de longitud de cola medida (Q95 medido) en doce de los catorce periodos analizados. Asimismo, el valor de la media del Q95 calculado asciende a doce vehículos; mientras que para el Q95 medido es de 6.21 vehículos. Por lo tanto, se podría decir que ambos valores no presentan similitud alguna y por lo tanto la metodología HCM 2010 para el cálculo de la capacidad del carril derecho de entrada a rotondas no es aplicable a la rotonda evaluada.

Sin embargo, si se analizan únicamente los periodos con grados de saturación menores a uno, como se observa en la tabla 11, se aprecia mayor similitud entre ellos. Para este intervalo de periodos, el valor de la media del Q95 medido es de 5.82 vehículos y el valor de media del Q95 calculado es de 8.64 vehículos, por lo que la diferencia de medias entre el primero y el segundo es igual a -2.82 vehículos, una diferencia menor a la obtenida al analizar todos los periodos, la cual ascendía a -5.79 vehículos. Por lo tanto, es necesario analizar este fenómeno y comprobar si, en este rango de grados de saturación, estos valores de longitud colas son similares.



*Figura 21. Comparación gráfica entre las longitudes de colas medidas y calculadas del carril derecho*

Elaboración propia.

Las colas en las entradas a las rotondas, en teoría, se forman principalmente debido a la regla de prioridad de paso, la cual indica que el carril de circulación en la rotonda posee la prioridad, mientras que el carril de entrada es una vía secundaria. Esto quiere decir que, para que un vehículo ingrese a la rotonda debe identificar una brecha de tiempo lo suficientemente larga en el flujo de circulación. De no ser así, y encontrarse con un pelotón de vehículos circulando frente a la entrada, parará antes de ingresar y los vehículos que lleguen detrás de él se formarán en colas hasta que el primer vehículo pueda ingresar.

Tabla 11. Longitudes de colas medidas y calculadas con grado de saturación menor a uno en el carril derecho

Nº	Q95 medido (veh)	Q95 calculado (veh)
1	4	4
2	2	5
3	2	6
4	10	7
5	3	7
6	4	7
7	3	7
8	15	11
9	3	12
10	12	14
11	6	15
Media	5.82	8.64
Desviación ( $\sigma$ )	4.260	3.549
Covarianza ( $\sigma_{xy}$ )	7.661	
Diferencia de medias	-2.818	
Coefficiente de correlación (R)	0.507	
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0.257	

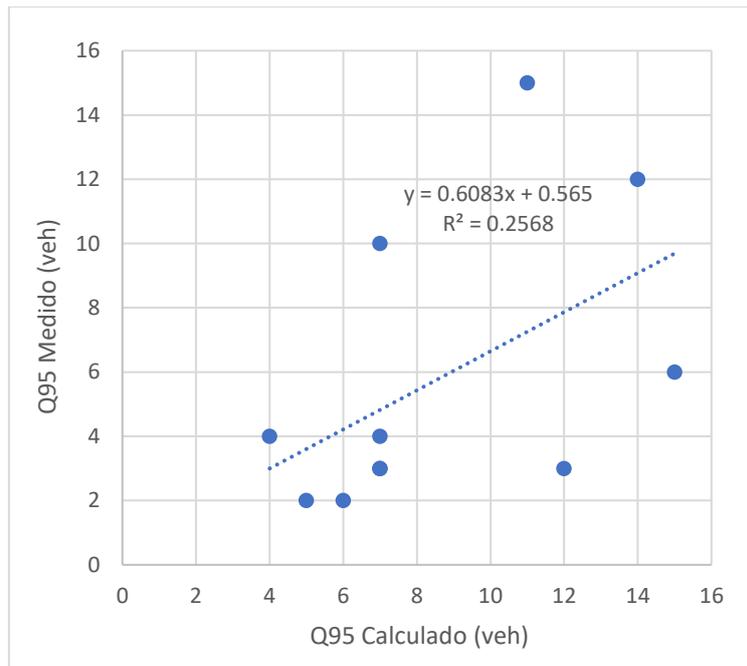
Nota. Elaboración propia.

De manera particular, por lo observado en los videos, esta regla no se cumple la mayor parte del tiempo en la entrada evaluada. Por el contrario, los vehículos en el flujo circulante eran aquellos que esperaban un tiempo determinado para ingresar, asemejándose a una intersección en forma de cruz, dada la forma de la rotonda. Por lo tanto, esta podría ser la principal razón por la que los valores de longitud de cola medidos resultan menores a los calculados en doce de los catorce periodos, lo cual se evidencia con mayor notoriedad en los periodos con mayor grado de saturación. Este comportamiento revela que es probable que tanto la brecha crítica y el tiempo de seguimiento con los que se calibró el modelo para el cálculo de capacidad sean valores mayores a los presentados en nuestra sociedad. Debido a ello, es que se

obtendrían valores de capacidad aparentemente menores y, por ende, grados de saturación y longitudes de colas elevadas.

A pesar de ello, como se explicó líneas arriba, existe aparente similitud entre los valores Q95 medido y Q95 calculado para grados de saturación menores a uno. Por lo tanto, se aplicó el método estadístico de regresión lineal a fin de analizar la relación que existiría entre estas dos variables. Los valores de la población de Q95 calculado y Q95 medido se muestran en la tabla 11, así como sus valores de media y desviación estándar. A partir de esta información se realizó la regresión lineal, siendo la variable Q95 medido la variable independiente y Q95 calculado, la variable dependiente. El resultado de esta regresión se muestra en la figura 22 y, la covarianza y los coeficientes de correlación y determinación entre las variables se muestran en la tabla 11.

Los valores de Q95 calculado estiman los valores de longitud de cola, por ello debería esperarse valores iguales o similares a los medidos (Q95 medido) y, a su vez, una regresión lineal con una ecuación de pendiente cercana a uno e intercepto cercano a cero. Sin embargo, como se aprecia en la figura 22, los puntos observados presentan gran variación respecto a la recta obtenida, lo cual indicaría que esta es poco representativa de la relación entre ambas variables. Asimismo, el valor de correlación lineal obtenido (0.507) significa que existe una correlación positiva media entre estas variables, de acuerdo con Hernández et al. (2010). Y, por su parte, el coeficiente de determinación obtenido indica que tan solo el 25% de la variable Q95 medida es explicada por la variable Q95 calculada. Por lo tanto, se ha demostrado que no existe relación estadística entre los valores de longitud de cola medidos y calculados por la metodología HCM 2010 en el carril derecho para grados de saturación menores a uno.



*Figura 22. Regresión lineal de longitudes de cola medidas y calculadas para grados de saturación menores a uno en el carril derecho.*

Elaboración propia.

Para este rango de grados de saturación, en tan solo dos de los once periodos, las longitudes de cola medidas son mayores a las estimadas, lo cual significa que estos dos periodos son los que aumentan el valor de la media de los valores medidos y reducen la diferencia entre las medias de las colas medidas y calculadas. Como se explicó líneas arriba, estas dos colas se formaron para grados de saturación medios, debido a que la demanda supera a la capacidad en un periodo de tiempo menor a quince minutos. A pesar de ello, de acuerdo al análisis estadístico, las longitudes de cola calculadas y medidas no son similares para este rango de grados de saturación. Por lo tanto, la brecha crítica y tiempo de seguimiento con los que se calibró el modelo no permitieron determinar longitudes de colas similares a las reales, pues serían mayores a los presentados en los periodos medidos.

Por otro lado, para grados de saturación mayores a uno, la diferencia entre las colas medidas y calculadas es igual a catorce vehículos en promedio. Los tres periodos dentro de este rango son aquellos que poseen mayor demanda vehicular entre los catorce periodos evaluados.

Asimismo, como se aprecia en la figura 21, la longitud de cola calculada crece de forma exponencial respecto al grado de saturación. Debido a ello, lo que se esperaría para las colas medidas es que los periodos con mayor grado de saturación, y de acuerdo a lo analizado también los de mayor demanda, deberían poseer mayores longitudes de cola; sin embargo, esto no ocurre en los periodos medidos. Ello podría explicarse a partir de lo visualizado en los videos, en donde se apreció que los conductores se comportan con mayor agresividad cuando existe mayor demanda vehicular e incumplen con mayor frecuencia la prioridad de paso. Por lo tanto, para este rango de valores, es probable que el tiempo de seguimiento y brecha crítica con los que se calibró el modelo sean mayores a los presentados en los periodos analizados.

#### **4.4. Comparación de longitudes de colas en el carril izquierdo**

Del mismo modo que en el apartado anterior, este apartado presenta el análisis y la comparación de los resultados obtenidos tras la medición y cálculo del percentil 95 de longitud de cola (Q95 medido y Q95 calculado) en el carril izquierdo de la entrada 1 a la rotonda “Los Defines”, en base a la metodología HCM 2010. La finalidad de esta comparación es comprobar el grado de similitud entre ambas. Por lo tanto, este análisis y comparación se realiza en torno al grado de saturación correspondiente a cada periodo de análisis.

Como se muestra en la figura 23, al igual que en el carril derecho, los valores de Q95 calculados son mayores a los de Q95 medido, a excepción de dos periodos en los que este último es mayor y un periodo en los que ambos valores son iguales. Asimismo, el valor de la media del Q95 calculado asciende a 13.43 vehículos; mientras que para el Q95 medido es de 6.86 vehículos. Por lo tanto, se podría decir que ambos valores no presentan similitud alguna y, por lo tanto, la metodología HCM 2010 para el cálculo de la capacidad del carril izquierdo de entrada a rotondas no es aplicable a la rotonda evaluada.

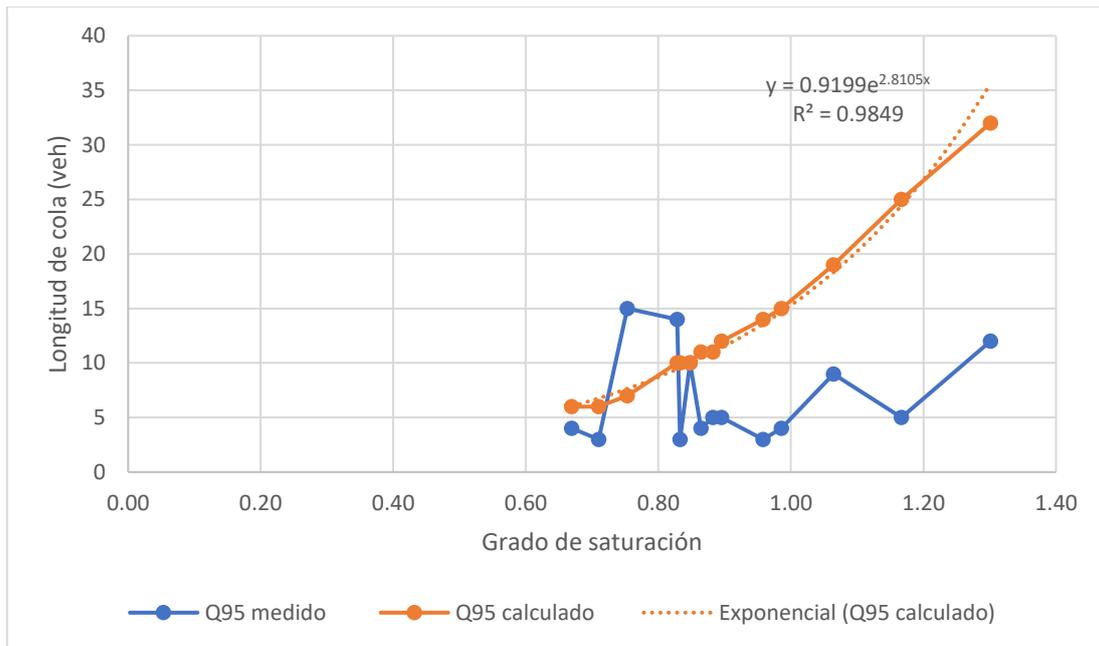


Figura 23. Comparación gráfica entre las longitudes de colas medidas y calculadas del carril izquierdo

Elaboración propia.

Sin embargo, si se analizan únicamente los periodos con grados de saturación menores a 0.9, como se observa en la tabla 12, se evidencia mayor similitud entre ellos. Para este intervalo de periodos, el valor de la media del Q95 medido es de 7 vehículos y el valor de media del Q95 calculado es de 9.22 vehículos, por lo que la diferencia de medias entre el primero y el segundo es igual a -2.22 vehículos, una diferencia menor a la obtenida al analizar todos los periodos, la cual ascendía a -6.57 vehículos. Por lo tanto, es necesario analizar este fenómeno y comprobar si, en este rango de grados de saturación, estos valores de longitud de cola son similares. Cabe señalar que este rango de valores varía entre 0.67 y 0.9, un intervalo de grados de saturación reducido, pero, al no haber obtenido grados de saturación menores, el análisis queda limitado a este.

Tabla 12. Longitudes de colas medidas y calculadas con grado de saturación menor a 0.9 en el carril izquierdo

Nº	Q95 medido (veh)	Q95 calculado (veh)
1	4	6
2	3	6
3	15	7
4	14	10
5	3	10
6	10	10
7	4	11
8	5	11
9	5	12
Media	7.00	9.22
Desviación	4.74	2.28
Covarianza ( $\sigma_{xy}$ )		-0.556
Diferencia de medias		-2.222
Coefficiente de correlación (R)		-0.058
Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )		0.0033

Nota. Elaboración propia

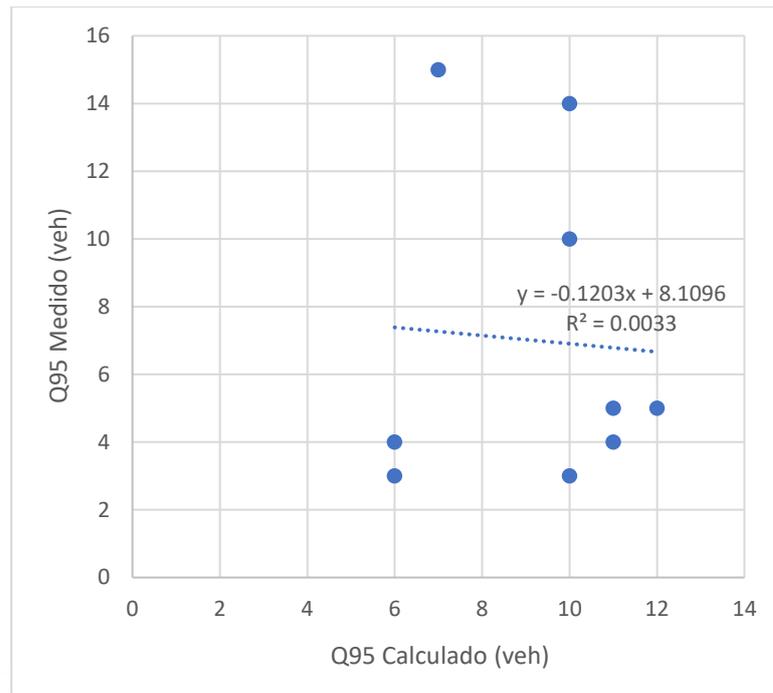
Al igual que el análisis realizado para el carril derecho en relación a la formación de colas; para el carril izquierdo, se puede afirmar que los conductores que ingresaron a la rotonda por este carril, en su mayoría, no respetaron la regla de prioridad. Esto explicaría que se haya medido longitudes de colas menores a las estimadas en once de los catorce periodos analizados. Por lo tanto, es probable que en nuestra sociedad se presenten valores de brecha crítica y tiempo de seguimiento menores a los utilizados para la calibración del modelo. Debido a ello, se habrían obtenido valores de capacidad aparentemente menores; y, por ende, grados de saturación y longitudes de cola elevadas.

A pesar de ello, como se explicó líneas arriba, existe cierta similitud entre los valores Q95 medido y Q95 calculado para grados de saturación menores a 0.9. Por lo tanto, se aplicó el método estadístico de regresión lineal a fin de analizar la relación que existe entre estas dos variables. Los valores de la población de Q95 calculado y Q95 medido se muestran en la tabla

12, así como sus valores de media y desviación estándar. A partir de esta información se realizó la regresión lineal, siendo la variable Q95 medido, la variable independiente, y Q95 calculado, la variable dependiente. El resultado de esta se muestra en la figura 24 y, la covarianza y los coeficientes de correlación y determinación entre las variables se muestran en la tabla 12.

Los valores de Q95 calculado estiman los valores de longitud de cola, por ello debería esperarse valores iguales o similares a los medidos (Q95 medido) y, a su vez, una regresión lineal con una ecuación de pendiente cercana a uno e intercepto cercano a cero. Sin embargo, como se aprecia en la figura 26, los puntos observados presentan gran variación respecto a la recta obtenida, lo cual indicaría que esta es poco representativa de la relación entre ambas variables. Asimismo, el valor de correlación lineal obtenido (-0.058) significa que no existe correlación alguna entre estas variables, de acuerdo con Hernández et al. (2010). Y, por su parte, el coeficiente de determinación obtenido indica que tan solo el 0.3% de la variable Q95 medida es explicada por la variable Q95 calculada. Por lo tanto, se ha demostrado que no existe relación estadística entre los valores de longitud de cola medidos y calculados por la metodología HCM 2010 en el carril izquierdo para grados de saturación menores a 0.9.

Para este rango de grados de saturación, en tan solo dos de los nueve periodos, las longitudes de cola medidas son mayores a las estimadas, lo cual significa que estos dos periodos son los que aumentan el valor de la media de los valores medidos y reducen la diferencia entre las medias de las colas medidas y calculadas. Como se explicó líneas arriba, estas dos colas se formaron para grados de saturación medios, debido a que la demanda supera a la capacidad en un periodo de tiempo menor a quince minutos. A pesar de ello, de acuerdo al análisis estadístico, las longitudes de cola calculadas y medidas no son similares para este rango de grados de saturación. Por lo tanto, la brecha crítica y tiempo de seguimiento con los que se calibró el modelo no permitieron determinar longitudes de colas similares a las reales, pues serían mayores a los presentados en los periodos medidos.



*Figura 24. Regresión lineal de longitudes de cola medidas y calculadas para grados de saturación menores a 0.9 en el carril izquierdo.*

Elaboración propia.

Por otro lado, para grados de saturación mayores a 0.9, la diferencia entre las colas medidas y calculadas es igual a 14.4 vehículos en promedio. Los cinco periodos dentro de este rango son aquellos que poseen mayor demanda vehicular entre los catorce periodos evaluados. Asimismo, como se aprecia en la figura 23, la longitud de cola calculada crece de forma exponencial respecto al grado de saturación. Debido a ello, lo que se esperaría para las colas medidas es que los periodos con mayor grado de saturación, y de acuerdo a lo analizado también los de mayor demanda, deberían poseer mayores longitudes de cola; sin embargo, esto no ocurre en los periodos medidos. Ello podría explicarse, al igual que para el carril derecho, a partir de lo visualizado en los videos, en donde se apreció que, a mayor demanda vehicular, mayor incumplimiento de la regla de prioridad de paso. Por lo tanto, para este rango de valores, es probable que el tiempo de seguimiento y brecha crítica con los que se calibró el modelo sean mayores a los presentados en los periodos analizados.

## Capítulo 5

### Conclusiones

La presente investigación tiene como objetivo principal analizar la aplicabilidad de la metodología HCM 2010 para calcular la capacidad de entrada a una rotonda en la ciudad de Lima. Dicha metodología es muy usada en nuestro país para analizar el tráfico vehicular en rotondas; sin embargo, fue calibrada tras la medición de brechas críticas y tiempos de seguimiento en rotondas en EEUU. Por esa razón, se ha analizado las características de los flujos vehiculares medidos y los grados de saturación calculados mediante la metodología HCM 2010 de los carriles de una entrada de la rotonda “Los Delfines”, en el distrito de Santiago de Surco. Asimismo, se ha comparado los valores de las longitudes de cola formadas en los carriles de entrada a la rotonda con los valores obtenidos según la metodología HCM 2010. A continuación, se muestran las conclusiones obtenidas respecto a cada uno de estos objetivos.

1) Tras la medición de las variables necesarias para la aplicación de la metodología, se calculó la capacidad, el grado de saturación y el percentil 95 de longitud de cola en cada carril de la entrada evaluado en catorce periodos de tiempo. Estas características se analizaron a partir de la influencia de cada variable medida para el cálculo de estas, como son la demanda, el flujo de circulación y los factores que ajustan la capacidad. En base a ello, se puede concluir que el grado de saturación se ve mayormente influenciado por la demanda tanto para el carril izquierdo como para el derecho. Asimismo, respecto al cálculo de la capacidad, se ha evidenciado que la cantidad de personas que entran en conflicto con el flujo entrada puede influenciar hasta en 9% este valor; y que la cantidad de vehículos pesados puede afectar hasta en 5% este valor para el carril derecho y 3% para el carril izquierdo.

2) Del mismo modo como se midieron las variables señaladas, se midió el percentil 95 de longitud de cola para cada periodo analizado. Este tipo de longitud de cola planteado por la metodología y, en la realidad, ha representado la longitud de cola más larga para los periodos de quince minutos de carga máxima medidos. A partir de estos, se pudo realizar la comparación entre las colas medidas y calculadas mediante la metodología HCM 2010 en relación al grado de saturación. Esta comparación permitió identificar cierta similitud entre estos valores hasta grados de saturación igual a uno para el carril derecho y 0.9 para el izquierdo. A fin de corroborar la similitud entre estos valores, se realizó un análisis estadístico de regresión lineal de estos para cada carril. Este análisis permitió concluir que no existe relación estadística, y, por ende, similitud alguna, entre los valores de longitud de cola medidos y calculados mediante la metodología HCM 2010.

Finalmente, cabe señalar que esta metodología tiene como principal objetivo calcular la capacidad de un acceso a una rotonda y, a partir de esta, plantea el cálculo de parámetros que permiten pronosticar la situación de tráfico vehicular en dicha entrada, como es el percentil 95 de longitud de cola. Por lo tanto, haber demostrado que no existe similitud entre los valores estimados de este parámetro con los presentados en la realidad, significa que la metodología HCM 2010 no resultó aplicable para los periodos analizados en la rotonda seleccionada. Es probable que la brecha crítica y el tiempo de seguimiento con los que se calibró el modelo no reflejen la realidad en los accesos analizados. Asimismo, para grados de saturación altos, estos tiempos diferirían aún más de la realidad presentada en estos accesos, pues se identificó que, a mayor demanda, mayor incumplimiento de la regla de prioridad de paso.

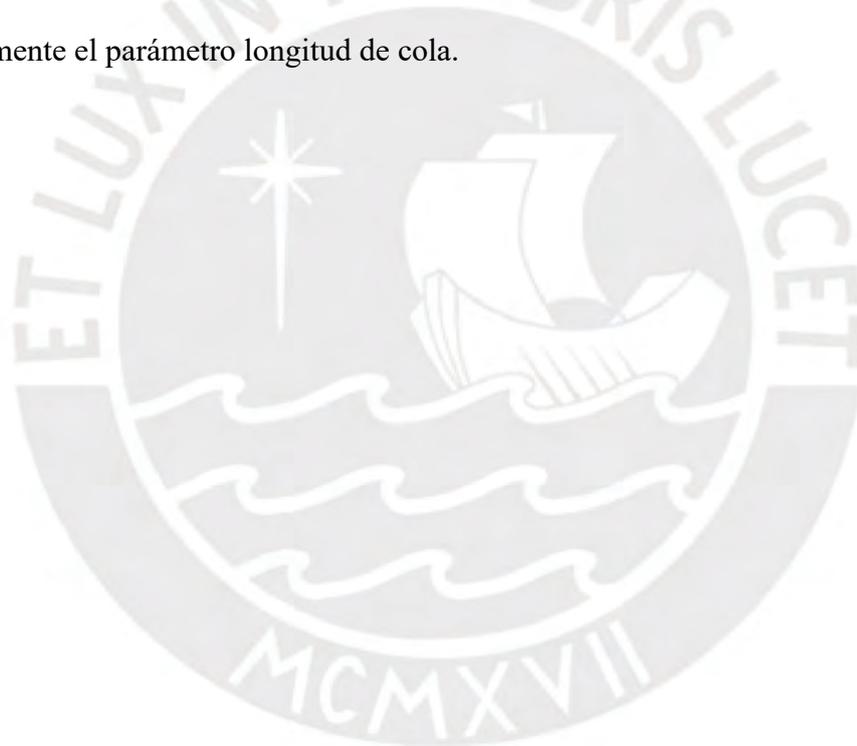
## Capítulo 6

### Recomendaciones

Esta investigación ha evaluado las características de flujo vehicular en catorce periodos de tiempo en una entrada de la rotonda “Los Delfines” a fin de analizar la aplicabilidad de la metodología HCM 2010. A partir de esto, se reconoce que los hallazgos relacionados no definen la aplicabilidad de esta metodología para analizar toda la rotonda, pues solo se evaluó dos carriles de entrada; y, mucho menos, para analizar otras rotondas en la ciudad de Lima. Por lo tanto, es necesario que se realicen más estudios que demuestren la aplicabilidad o no de esta metodología en las rotondas de la ciudad de Lima, para lo cual se requiere definir más periodos de análisis en diferentes horarios y más carriles de entradas en diferentes rotondas. Debido a que una diversidad de horarios permite conocer mayores rangos de saturación y las diferentes configuraciones y ubicaciones de entradas a rotondas pueden influenciar en el comportamiento de los conductores.

Para realizar estos análisis es necesario realizar antes aforos vehiculares y peatonales en cada carril de entrada, lo cual se torna complicado para desarrollarlo de manera manual en el mismo lugar. Por lo tanto, en la mayoría de casos es necesario utilizar grabaciones con la finalidad de desarrollar los aforos correctamente. Por ejemplo, para esta investigación se utilizó grabaciones provenientes de las cámaras de seguridad de la Municipalidad de Santiago de Surco. Sin embargo, estas grabaciones, por su naturaleza, no son estacionarias, lo cual limitó tanto la cantidad de carriles como los periodos de tiempo a analizar. Por ello, es necesario contar con grabaciones que permitan levantar la información requerida en más de una entrada en una rotonda y en periodos de tiempo lo suficientemente largos para definir los periodos pico de quince minutos cada hora. Del mismo modo, estas grabaciones deben permitir que se midan las longitudes de colas formadas en cada carril de entrada, las cuales, como se ha podido observar, podrían ser hasta más de quince vehículos en cada carril.

Por último, cabe señalar que la longitud de cola no es el único parámetro que se puede comparar con la finalidad de demostrar la aplicabilidad de esta metodología. El TRB (2010) plantea también el cálculo de demoras en la entrada a la rotonda a partir de la capacidad y el grado de saturación, por lo que se podría utilizar este parámetro para realizar el análisis. Con la finalidad de realizar un análisis más completo, sería recomendable evaluar ambos parámetros al mismo tiempo y realizar las comparaciones en relación al grado de saturación para cada uno de ellos. A partir de estas se podría relacionar ambos parámetros e identificar las características más relevantes en el desarrollo de cada uno de ellos en la realidad. Sin embargo, en la presente investigación, con fines prácticos de medición dadas las características de las grabaciones, se utilizó únicamente el parámetro longitud de cola.



## REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2001). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. Unites States: AASHTO.
- Ashworth, R., & Field, J. C. (1973). The capacity of rotary intersections. Institution of Highway Engineers, Journal of, 20(3).
- Bared, J., & K. Kennedy (2000). Safety Impacts of Modern Roundabouts. Capítulo 28, The Traffic Safety Toolbox: A Primer on Traffic Safety. Institute of Transportation Engineers.
- Brilon, W., Wu, N., & Bondzio, L. (1997). 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. (2010). ¿Pueden los modelos macro-determinísticos y micro-simulación analizar adecuadamente las intersecciones semaforizadas en Lima? XVI PANAM. Lisboa, Portugal.
- Cabrera, F. (2015). Apuntes de clase del curso Ingeniería de Tráfico. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima.
- CERTU. (1999). Guide des carrefours urbains. Lyon: Collections du Certu.
- 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.

- Flannery, A., & Datta, T. (1996). Operational analysis and performance of American roundabouts.
- Flannery, A., & Datta, T. (1997). Operational performance measures of American roundabouts. *Transportation Research Record*, 1572(1), 68-75.
- Fundación Transitemos (2018b, julio). Informe de Observancia: TRANSPORTE URBANO LIMA y CALLAO - 2018. Recuperado el 26 de abril, 2000, de: <https://transitemos.org/propuestas/situacion-del-transporte-urbano-en-lima-y-callao/>
- Glen, M., Sumner, S., & Kimber, R. (1978). The capacity of offside priority roundabout entries, SR 346. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Google. (s.f.). [Mapa de Ovalo Los Delfines, Santiago de Surco en Google maps]. Recuperado el 26 de abril, 2020, de: <https://goo.gl/maps/FXrZGjch8P18TxXS9>
- 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.
- Henard, E. (1906). *Carrefours a giration. Etudes sur les Transformations de Paris, 1903-1908*.
- Hernández, R., Fernández, C. F., & Baptista, M. P. (2010). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). México D.F., México: McGraw-Hill Education.
- Highway Research Board (1965). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: National Research Council.
- Institute of Transportation Engineers (2006). *Transportation Impact Analyses for Site Development*. USA.

- Kimber, R. M. (1980). The traffic capacity of roundabouts, LR 942. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory. Obtenido de Transport Research Laboratory.
- Kimber, R. M., & Semmens, M. C. (1977). A track experiment on the entry capacities of offside priority roundabouts (No. TRRL Suppl. Rpt. 334).
- Kyte, M. (1997). Capacity and level of service of unsignalized intersections: New practices in the United States. In Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals. Transportation Research Board; Federal Highway Administration; National Center for Advanced Transportation Technology, University of Idaho; Transportation Northwest, University of Washington.
- Mauro, R. (2010). Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability [Libro Electrónico]. Trento: Springer Science & Business Media.
- Philbrick, M. (1977). In search of a new capacity formula for conventional roundabouts, LR 773. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Taekratok, T. (1998). Modern Roundabouts for Oregon. Salem: Oregon Department of Transportation. Recuperado el 26 de abril de 2020, de Oregon State Library.
- Tanner, J. C. (1962). A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. *Biometrika*, 49(1/2), 163-170.
- 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. J. (1984). The theory of traffic flow on roundabouts. Australian Road Research Board, ARRB.

Troutbeck, R. (1989). Evaluating the performance of a roundabout. Australian Road Research Board, ARRB.

Troutbeck, R. J. (1992). Changes to the analysis and design of roundabouts initiated in the Austroads Guide. Proceedings, 16th ARRB Conference, 9-13 November 1992, Perth, Western Australia; Volume 16, Part 5.

Yap, Y. H., Gibson, H. M., & Waterson, B. J. (2013). An international review of roundabout capacity modelling. *Transport Reviews*, 33(5), 593-616.

