

---

## ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE ACEPTACIÓN Y DEL TIEMPO DE SEGUIMIENTO EN ROTONDAS DE URUGUAY

Ing. Marcelo Caimi y Msc. Ing. Jorge Galarraga  
Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte de la Facultad de Ciencias  
Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.  
Av. Vélez Sarsfield 1611. Ciudad Universitaria. X5016GCA. Ciudad de Córdoba. Argentina.  
E-mail: [mcaimi@csi.com.uy](mailto:mcaimi@csi.com.uy), [jorgala@efn.uncor.edu](mailto:jorgala@efn.uncor.edu)

### RESUMEN

El presente trabajo estima el tiempo de aceptación ( $t_c$ ) y el tiempo de seguimiento ( $t_f$ ) en rotondas de Uruguay. Para ello se aplican los métodos de máxima verosimilitud, regresión lineal y medición directa a partir de los datos de campo. Los datos de campaña se obtuvieron mediante filmaciones del tránsito; las rotondas analizadas están ubicadas en zonas urbanas y peri urbanas de la región sureste del Uruguay. El trabajo describe conceptualmente las técnicas empleadas, indicando sus ventajas y limitaciones. Asimismo, reporta los valores obtenidos para los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  calculados por cada una de las metodologías, para vehículos livianos (autos y camionetas), para vehículos pesados (ómnibus y camiones) y para el flujo total (mixto). Al contar con estimaciones por dos métodos de cálculo diferentes y para vehículos livianos, pesados y tránsito total, se efectúan consideraciones sobre la relación de los valores obtenidos y sobre el impacto que producen los vehículos pesados (en términos de vehículos equivalentes). Finalmente, se presentan los valores medios obtenidos (con sus intervalos de confianza) y se los compara con los propuestos por el HCM2000 y otros métodos.

*Palabras clave:* rotondas, tiempo de aceptación, tiempo de seguimiento

### ABSTRACT

The paper estimates critical gap ( $t_c$ ) and follow-up time ( $t_f$ ) in roundabouts in Uruguay. Maximum likelihood estimation, linear regression, and direct field measurements were used for this purpose. Field data were obtained by filming traffic; the roundabouts under analysis were situated in urban and suburban areas of the southeastern region of Uruguay. The paper starts with a conceptual description of the techniques that were used, highlighting their advantages and limitations. Following, the paper presents the values calculated for the parameters  $t_c$  and  $t_f$  using the two methodologies for light vehicles (cars and pick ups), heavy vehicles (buses and trucks) and the total (mixed) traffic. The values obtained are compared and the impact that the heavy vehicles is determined (in terms of equivalent vehicles) based on the estimations obtained for light vehicles, heavy vehicles and total traffic. Finally, the computed average values (and confidence intervals), are compared with typical values and ranges proposed by the HCM2000 and other methods.

*Keywords:* roundabouts, critical gap, follow-up time

## 1. INTRODUCCIÓN

La capacidad y la eficiencia de una rotonda son muy sensibles a los valores del tiempo de aceptación o intervalo crítico ( $t_c$ ) y del tiempo de seguimiento ( $t_f$ ). Estos deben ajustarse a las características locales de los conductores, la geometría y las condiciones del flujo de tránsito.

La exactitud de la estimación de la capacidad está fuertemente influenciada por la precisión de los valores de  $t_c$  y  $t_f$ . El tiempo de seguimiento se puede determinar directamente en el campo (Tian et al. 2000) mientras que el tiempo de aceptación no se puede medir directamente en el campo.

Se han desarrollado numerosos estudios para estimar el  $t_c$ . Entre ellos, el método de máxima verosimilitud ha demostrado ser el más exacto y confiable (Tian et al. 1999).

La bibliografía revisada establece que existe una relación estrecha entre los valores de  $t_c$  y  $t_f$  con la geometría de la rotonda. Los parámetros geométricos que tienen mayor incidencia son el ancho de los carriles de aproximación, el diámetro de la rotonda y la cantidad de carriles de aproximación y circulación (Akcelik, 1997). El  $t_c$  disminuye a medida que aumentan todos los parámetros geométricos mencionados mientras que el  $t_f$  disminuye cuando disminuye la cantidad de carriles de circulación y cuando aumentan el diámetro de la rotonda y la cantidad de carriles de aproximación. (Akcelik, 2000).

Si bien las condiciones geométricas en las cuales se basa el análisis de capacidad de rotondas incluido en el Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos de América (HCM2000) no coinciden exactamente con las rotondas analizadas en el presente trabajo, éstas son representativas de las condiciones existentes en Uruguay. Por lo tanto, se comparan los valores de  $t_c$  y  $t_f$  con los del HCM2000 por ser los tradicionalmente empleados en el país. Más allá de ello, se incluyen otras comparaciones de  $t_c$  y  $t_f$  obtenidos en Uruguay con los estimados en otros países en rotondas de similares características geométricas.

En suma, en Uruguay, tradicionalmente los estudios de tránsito se realizan adoptando parámetros que han sido validados en países desarrollados. La adaptación de estos parámetros a las condiciones locales no es una práctica habitual; por lo tanto, este trabajo pretende contribuir a ampliar la disponibilidad de datos calibrados en la misma región donde serán utilizados.

## 2. OBJETIVOS PLANTEADOS

Los objetivos de este trabajo son:

- 1) Determinar los valores de tiempo de aceptación y tiempo de seguimiento en rotondas bajo las condiciones locales del tránsito.
- 2) Identificar las diferencias que existen entre los parámetros cuando se analizan según el tipo de vehículo: livianos (autos y camionetas), pesados (ómnibus y camiones) y tránsito total.
- 3) Valorar los incrementos en los tiempos que producen los vehículos pesados (en términos de vehículos equivalentes).

### 3. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

#### 3.1. Determinación del Intervalo Crítico y del Tiempo de Seguimiento

Las técnicas utilizadas para estimar los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  se pueden clasificar esencialmente dentro de dos grupos diferentes. El primero se basa en un análisis de regresión del número de conductores que aceptan un intervalo contra el tamaño de ese intervalo. En este caso se determinan ambos parámetros en forma conjunta. El segundo hace una estimación de la distribución del intervalo crítico y del tiempo de seguimiento en forma independiente. Se emplea el método de máxima verosimilitud para el intervalo crítico y la medición directa (promedio de intervalos) para el tiempo de seguimiento.

##### *Análisis de Regresión Lineal*

De acuerdo a Brilon et al (1997) y TRB (1997), existe un método relativamente simple de estimación de  $t_c$  y  $t_f$ . En condiciones de cola continua, la técnica atribuida a Siegloch (1973) produce resultados aceptables. En esta técnica, la cola debe tener al menos un vehículo durante el período de observación. El procedimiento es el siguiente:

- 1) Hacer observaciones en un lapso en el cual existe cola continua, es decir, al menos un vehículo esperando para ingresar. Se necesita un número razonable de vehículos para que la regresión sea confiable.
- 2) Contabilizar el número de vehículos ( $n$ ) que ingresan en cada gap (de duración  $t$ ) del flujo de circulación. Incluir también los casos de  $n=0$ .
- 3) Para cada uno de los gaps aceptados por  $n$  vehículos, calcular el promedio de los gaps ( $t$ ) aceptados.
- 4) Encontrar la regresión lineal de los valores promedios:  $n=a+bt$  donde,  $t_0=-a/b=t_c-0.5t_f$  y  $b=1/t_f$ , en consecuencia:  $t_f=1/b$ ;  $t_c=t_0+0.5t_f$

El método de regresión lineal no se puede aplicar si no existe cola continua. En estos casos es necesario aplicar un método probabilístico.

##### *Método de Máxima Verosimilitud*

Según Troutbeck (1992), el método de máxima verosimilitud para estimar el intervalo crítico requiere que se asuma para éste una distribución probabilística para la totalidad de los conductores. La distribución log-normal es una opción válida. Sea la siguiente notación:

$a_i$ =logaritmo del gap aceptado por el conductor  $i$

$a_i=0$  si ningún gap fue aceptado

$r_i$ =logaritmo del mayor gap rechazado por el conductor  $i$

$r_i=0$  si ningún gap fue rechazado

$\mu$  y  $\sigma^2$  son la media y la varianza del logaritmo del intervalo crítico individual de cada conductor (asumiendo distribución log-normal)

$f(\cdot)$  y  $F(\cdot)$  son la función de densidad de probabilidad y la distribución acumulada respectivamente para la distribución normal

Operando de acuerdo al método incluido en Tian et al (1999) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones que se debe resolver en forma iterativa:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{f(r_i) - f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0, \text{ y} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(r_i - \hat{\mu})f(r_i) - (a_i - \hat{\mu})f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (3.2)$$

La ecuación 3.1 se debe utilizar para estimar  $\mu$  a partir de un valor dado de  $\sigma^2$ . Como valor inicial de  $\sigma^2$  se puede tomar la varianza de todos los valores de  $a_i$  y  $r_i$ . Con la estimación de  $\mu$  (simbolizada por  $\hat{\mu}$ ) se puede obtener la estimación de  $\sigma^2$  a partir de la ecuación 3.2.

Luego, se puede mejorar la estimación de  $\mu$  a partir de la ecuación 3.1 y en forma iterativa se continúa el proceso hasta que las estimaciones de  $\mu$  y  $\sigma^2$  no cambian apreciablemente.

La media  $E(t_c)$  y la varianza  $Var(t_c)$  de la distribución del intervalo crítico es una función de los parámetros de la distribución log normal:

$$E(t_c) = e^{\mu + 0.5\sigma^2} \quad (3.3)$$

$$Var(t_c) = E(t_c)^2 (e^{\sigma^2} - 1) \quad (3.4)$$

$E(t_c)$  es el valor del intervalo crítico utilizado en los cálculos de la teoría de aceptación de gaps. Dicho valor debería ser menor que la media de los gaps aceptados.

### 3.2. Incidencia de los Vehículos Pesados en los Valores de $t_c$ y $t_f$

Para valorar los incrementos que producen los vehículos pesados en los valores de  $t_c$  y  $t_f$  se aplicarán las fórmulas sugeridas en el HCM2000 para intersecciones no semaforizadas. Dicho procedimiento estipula que los tiempos de aceptación y seguimiento para el tránsito mixto se calculan sumando a los tiempos de livianos una corrección que depende del porcentaje de vehículos pesados y del equivalente correspondiente.

Específicamente, el intervalo crítico se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} \times P_{HV} + t_{c,G} \times G - t_{c,T} - t_{3,LT} \quad (3.5)$$

donde:

$t_{c,x}$  = intervalo crítico del flujo de aproximación (s)

$t_{c,base}$  = intervalo crítico de vehículos livianos (s)

$t_{c,HV}$  = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados (s)

$P_{HV}$  = porcentaje de vehículos pesados en el flujo de aproximación

$t_{c,G}$  = factor de ajuste por pendiente (s)

$G$  = porcentaje de la pendiente dividido 100

$t_{c,T}$  = factor de ajuste de aceptación de gap en procesos de 2 etapas (s)

$t_{3,LT}$  = factor de ajuste por geometría de la intersección (s)

En todos los casos analizados en esta investigación se desprecia el término de la pendiente, básicamente debido a que la misma es mínima (menor a 3%) y su influencia en el valor final del intervalo crítico  $t_{c,x}$  resulta despreciable. La determinación en campo de un valor exacto de la pendiente de cada rama de aproximación a la rotonda adiciona un trabajo que no redundará en mejoras significativas en cuanto a la precisión final del intervalo crítico  $t_{c,x}$ . Tampoco corresponde considerar los términos  $t_{c,T}$  y  $t_{3,LT}$  pues no existen procesos de 2 etapas ni giros a la izquierda.

El HCM2000 sugiere valores del equivalente  $t_{c,HV}$  de 1 segundo para vías de 2 carriles y de 2 segundos para vías de 4 carriles. En el trabajo este parámetro será calculado bajo las condiciones locales imponiendo que el valor de  $t_{c,x}$  coincida con el intervalo crítico obtenido mediante el método de máxima verosimilitud para el tránsito mixto.

Siguiendo similar procedimiento, el tiempo de seguimiento del tránsito mixto se calculará de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV} \times P_{HV} \quad (3.6)$$

donde:

$t_{f,x}$  = tiempo de seguimiento del flujo de aproximación x (s)

$t_{f,base}$  = tiempo de seguimiento de vehículos livianos (s)

$t_{f,HV}$  = factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

$P_{HV}$  = porcentaje de vehículos pesados en el flujo de aproximación

En el HCM2000 se sugieren valores para los parámetros  $t_{f,base}$  y  $t_{f,HV}$ . El cálculo que se realizará utilizará como valor de  $t_{f,base}$  el tiempo de seguimiento para vehículos livianos obtenido mediante el método de promedio de intervalos mientras que el  $t_{f,HV}$  se obtendrá de forma tal que el  $t_{f,x}$  coincida con el tiempo de seguimiento para el tránsito mixto calculado por el método de promedio de intervalos.

Los valores obtenidos serán comparados con los valores de  $t_c$  y  $t_f$  que recomienda el HCM2000 para rotondas y que presentan en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1: valores de  $t_c$  y  $t_f$  en rotondas**

Límite	$t_c$ (s)	$t_f$ (s)
superior	4,1	2,6
inferior	4,6	3,1

Fuente: HCM2000

## 4. RELEVAMIENTOS DE DATOS DE CAMPO

### 4.1. Descripción de la Recolección de Datos de Campo

Las rotondas son estructuras que permiten disminuir la cantidad de conflictos que existen entre las maniobras de un cruce a nivel. Del mismo modo, establecen la prioridad de movimientos dándole la preferencia de paso a los vehículos que están circulando en ella (flujo de circulación). Este aspecto del funcionamiento es clave para la finalidad de estimar los parámetros de  $t_c$  y  $t_f$ .

La duración de los relevamientos fue la necesaria para que la muestra sea representativa. Se registraron aproximadamente 10 horas de filmación. Los registros de video se transformaron a formato digital para facilitar el procesamiento de datos. Asimismo, esto mejora su durabilidad y fundamentalmente su manipulación en el sentido de que el formato digital permite procesar las imágenes mediante un computador personal con la ayuda de un software de visualización de video.

Las rotondas analizadas están ubicadas en la zona sureste del Uruguay, en los departamentos de Montevideo, Canelones y Maldonado. Las características particulares de cada una de ellas se describen a continuación. Asimismo, se presentan planos de ubicación que permiten ver el entorno existente en cada rotonda y en los que se resaltan la cantidad de carriles de aproximación, circulación, canteros separadores (en caso que existan) y las secciones de control (marcadas en color amarillo) que son las zonas en donde se realizó la filmación del tránsito.

Los planos de ubicación están elaborados a partir de imágenes satelitales (fuente: Google Earth) cuya definición es tal que permite ver los elementos principales que conciernen a los aspectos analizados en este trabajo. Más allá que los planos presentan una escala gráfica, se debe tener especial cuidado en la determinación de distancias a partir de estas imágenes.

**Avenida Millán y Avenida Luis Alberto de Herrera:** esta rotonda está emplazada en una zona residencial de Montevideo; avenida Millán tiene una funcionalidad de arteria de conexión entre la zona noroeste y centro-sur del departamento. Avenida Luis Alberto de Herrera transcurre en dirección oeste-este y permite atravesar el departamento sin ingresar a su zona céntrica. El TPDA de cada una de estas vías es del orden de 35000 vehículos aproximadamente y el porcentaje de vehículos pesados es aproximadamente 5%.

**Bulevar Artigas y Avenida Luis Alberto de Herrera:** la rotonda está ubicada en una zona residencial; distribuye el tránsito de vehículos pesados que salen de Montevideo hacia la zona oeste y norte del país (en dirección hacia las rutas nacionales N° 1 y N° 5) y hacia la zona noreste (en dirección a la ruta nacional N° 8). El TPDA de Bulevar Artigas es del orden de 40000



vehículos con una distribución de vehículos pesados (ómnibus y camiones) de aproximadamente 15%.

**Camino Carrasco y ruta nacional N°101:** la rotonda está en el departamento de Canelones en los accesos al aeropuerto internacional de Carrasco (principal terminal aeroportuaria del país), su TPDA es de 20000 vehículos con un porcentaje de pesados de 10%. La ruta N°101 tiene un TPDA de 17000 vehículos con 5% de ómnibus y camiones.

**Avenida Roosevelt y Avenida Artigas:** la rotonda está en el departamento de Maldonado (al este del Uruguay) en una zona interurbana. Ambas vías de tránsito permiten la conexión entre Punta del Este (principal balneario del país) y la ciudad de Maldonado (capital del departamento). Avenida Roosevelt tiene un TPDA de 8000 vehículos con un porcentaje de pesados de 2%. Avenida Artigas tiene un TPDA de 10000 vehículos con 3% de ómnibus y camiones.

## 5. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

La digitalización de las filmaciones de los relevamientos de campo permitió medir los tiempos entre vehículos que se necesitan para estimar los parámetros por las diferentes metodologías. Mediante la utilización de una PC y un software de visualización de video (que incluye un cronómetro) se obtuvieron los tiempos necesarios. Luego, se elaboraron bases de datos que incluyen todos los campos que se necesitan para identificar los registros y realizar los cálculos. Estos campos son: sitio, fecha, hora, tipo de vehículo del flujo de aproximación y del flujo de circulación, cantidad de vehículos (n) que ingresan en cada intervalo (de duración t) del flujo de circulación, valor del intervalo (t), intervalo aceptado, mayor intervalo rechazado. Adicionalmente, se midió el tiempo de seguimiento en forma directa (por promedio de intervalos).

**Plano 4.1**



Millán y L. A. de  
Herrera

**Plano 4.2**



Artigas y L. A. de  
Herrera

**Plano 4.3**



Carrasco y R101

**Plano 4.4**



Roosevelt y Artigas

### 5.1. Estimación Mediante Regresión Lineal

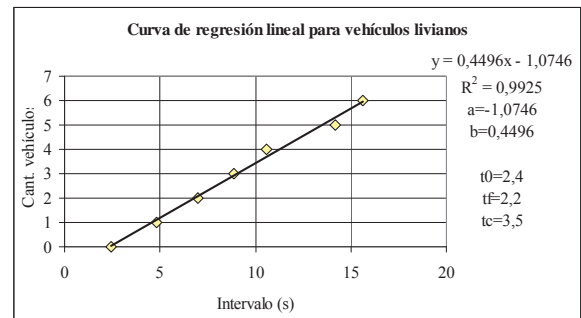
La finalidad de aplicar el método de regresión lineal (RL) es la de estimar el tiempo de seguimiento. Para ello, se elaboró una base de datos que tiene los siguientes campos: cantidad de vehículos (n) que ingresan a la rotonda en cada gap (de duración t) del flujo de circulación, valor del gap (t), tipo de vehículo del flujo de aproximación y del flujo de circulación, fecha, hora e identificación de la rotonda analizada. Adicionalmente al cálculo del  $t_f$  se determinó el  $t_c$  de acuerdo a lo expresado en el apartado 3.1.

El gap de duración  $t$  corresponde al tiempo entre vehículos del flujo de circulación en el cual ingresan los vehículos del flujo de aproximación. Para cada valor de  $n$  se calculó el promedio de los valores de  $t$  (incluyendo los valores de  $n=0$ ) y se construyó una tabla que permitió obtener la regresión lineal de  $n$  en función de  $t$ . Estos cálculos se efectuaron para las siguientes categorías de vehículos: livianos (autos y camionetas), pesados (ómnibus y camiones) y tránsito total (mixto). A continuación se presentan los cuadros de valores y los gráficos que muestran las regresiones lineales obtenidas para cada categoría de vehículos analizada.

**Tabla 5.1: valores para la RL de livianos**

t (s)	n (veh)
2,44	0
4,79	1
6,99	2
8,86	3
10,59	4
14,17	5
15,60	6

Fuente: elaboración propia

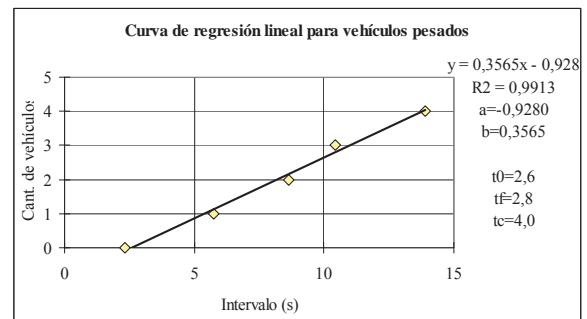


Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.2: valores para la RL de pesados**

t (s)	n (veh)
2,34	0
5,75	1
8,63	2
10,45	3
13,89	4

Fuente: elaboración propia

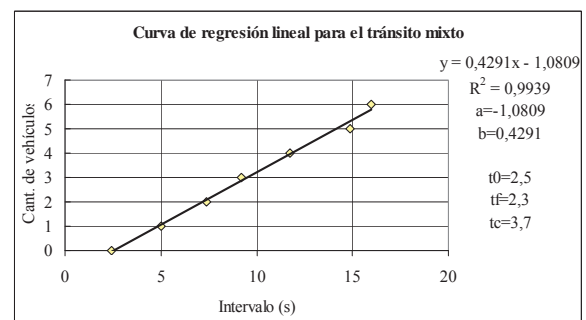


Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.3: valores para la RL del tránsito mixto**

t (s)	n (veh)
2,42	0
4,99	1
7,37	2
9,19	3
11,73	4
14,88	5
16,00	6

Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

En el proceso de selección de la mejor regresión lineal se tuvo en cuenta el análisis de los estadísticos  $t$ ,  $F$ , el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  y la cantidad de observaciones para cada valor de  $n$ . En la regresión de livianos ha sido necesario desechar los valores correspondientes a  $n=7$  y  $n=8$  porque las observaciones fueron solamente 2 para cada valor de  $n$ . Por la misma razón, para el caso de vehículos pesados se desearon las observaciones correspondientes a  $n=5$  y  $n=6$ .



## 5.2. Estimación Mediante Máxima Verosimilitud

El método de máxima verosimilitud se aplicó para estimar el intervalo crítico ( $t_c$ ). Adicionalmente, se calculó el tiempo de seguimiento mediante la medición directa por promedio de intervalos. De acuerdo a los datos relevados, el tiempo de seguimiento calculado como promedio de intervalos entre vehículos es igual a 2,2 segundos y su desviación estándar es 0,6 segundos.

El procesamiento de datos por el método de máxima verosimilitud implicó observar nuevamente las filmaciones registradas en cada sitio. Los tiempos que se midieron a partir de ellas son los siguientes: *gap aceptado* por cada vehículo y *mayor gap rechazado*. El *gap aceptado* es el tiempo disponible que tiene un vehículo del flujo de aproximación para realizar la maniobra de ingreso a la rotonda. Este tiempo disponible es el intervalo entre 2 vehículos consecutivos del flujo de circulación en el cual el vehículo del flujo de aproximación hace la maniobra de ingreso.

Cuando existe una cola de vehículos que está esperando para ingresar a la rotonda, el *gap aceptado* del primer vehículo es igual al tiempo de separación entre 2 vehículos consecutivos del flujo de circulación. El *gap aceptado* del segundo vehículo es igual al *gap aceptado* del vehículo anterior menos un tiempo de seguimiento. En forma general, el *gap aceptado* en una fila de vehículos se puede calcular como sigue:

$$gacep_i = gacep_{i-1} - (i-1) \times t_f \quad (5.1)$$

donde:

$i$  es el lugar en la cola en el cual se ubica un vehículo del flujo de aproximación

$gacep_i$  = gap aceptado del vehículo ubicado en la posición  $i$  del flujo de aproximación

$t_f$  = tiempo de seguimiento determinado por regresión lineal

Para el primer vehículo ( $i=1$ ), el *gap aceptado* es igual al tiempo de separación entre 2 vehículos consecutivos del flujo de circulación. Para  $i>1$ , el *gap aceptado* se obtiene con la ecuación 5.1.

El *mayor gap rechazado* es igual al mayor tiempo entre 2 vehículos consecutivos del flujo de circulación que tuvo disponible un vehículo del flujo de aproximación y que no lo utilizó para ingresar. Cuando existe una fila de vehículos del flujo de aproximación que están esperando para ingresar a la rotonda y efectivamente ingresan varios de ellos, únicamente el primer vehículo de esa fila tiene un valor de *mayor gap rechazado* distinto de cero. El resto de los vehículos de la cola que ingresan bajo el mismo intervalo del flujo de circulación tienen un valor de *mayor gap rechazado* igual a cero pues no han tenido la posibilidad de rechazar ningún intervalo.

La base de datos generada para procesar los datos tiene los siguientes campos: gap aceptado, mayor gap rechazado, tiempo de seguimiento (medido en forma directa como promedio de intervalos), tipo de vehículo del flujo de aproximación, fecha, hora e identificación de la rotonda analizada.

En el análisis de los datos se distinguieron las siguientes categorías de vehículos: livianos (autos y camionetas), pesados (ómnibus y camiones) y tránsito total (todos los vehículos mezclados).

Como se mencionó en el apartado 3.1, la resolución del sistema formado por las ecuaciones 3.1 y 3.2 permitió obtener  $\mu$  y  $\sigma^2$  (media y varianza del logaritmo del intervalo crítico individual de cada conductor asumiendo distribución log-normal). El proceso iterativo de solución de dicho sistema se inició con una estimación de  $\sigma^2$  igual a la varianza de todos los valores de  $a_i$  y  $r_i$  (logaritmo del gap aceptado por el conductor  $i$  y logaritmo del mayor gap rechazado por el conductor  $i$  respectivamente). Una vez resuelto el sistema se calcularon el valor esperado y la varianza del intervalo crítico mediante las ecuaciones 3.3 y 3.4.

Debido a que los valores de la varianza del intervalo crítico resultaron elevados, se calculó un intervalo de confianza del 95%. Esto permite hacer inferencias respecto a la validez o no de comparar los valores medios locales con los utilizados en otros países.

En las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los resultados obtenidos en la estimación del intervalo crítico mediante el método de máxima verosimilitud para las distintas categorías de vehículos.

**Tabla 5.4: intervalo crítico para vehículos livianos**

$t_c$ (s)	3,4
$\text{var}(t_c)$ (s)	1,7
des. std( $t_c$ ) (s)	1,3
int. confianza	95%
banda conf.	0,09
$t_c$ sup (s)	3,5
$t_c$ inf (s)	3,3

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.5: intervalo crítico para vehículos pesados**

$t_c$ (s)	4,2
$\text{var}(t_c)$ (s)	1,5
des. std( $t_c$ ) (s)	1,2
int. confianza	95%
banda conf.	0,26
$t_c$ sup (s)	4,4
$t_c$ inf (s)	3,9

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.6: intervalo crítico para tránsito total**

$t_c$ (s)	3,5
$\text{var}(t_c)$ (s)	1,7
des. std( $t_c$ ) (s)	1,3
int. confianza	95%
banda conf.	0,09
$t_c$ sup (s)	3,6
$t_c$ inf (s)	3,4

Fuente: elaboración propia

### 5.3. Estimación de Equivalentes en Función del Porcentaje de Vehículos Pesados

Para estimar los factores de ajuste de los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  que permiten considerar el efecto de los vehículos pesados se aplicaron las ecuaciones 3.5 y 3.6. Los valores de los parámetros utilizados en la ecuación 3.5 se muestran en la Tabla 5.7. El  $t_{c,\text{base}}$  adoptado corresponde al  $t_c$  de vehículos livianos y el  $t_{c,x}$  es el  $t_c$  del tránsito mixto (determinados por máxima verosimilitud). En consecuencia, el factor de equivalentes es  $t_{c,HV} = 0,7$ . En forma similar se obtuvo el factor de equivalentes para  $t_f$  mediante la aplicación de la ecuación 3.6. En este caso, el  $t_{f,\text{base}}$  corresponde al  $t_f$  de vehículos livianos determinado por medición directa. El resto de los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 5.8. Luego, el factor de equivalentes es  $t_{f,HV} = 1,0$ . Asimismo, dado que además de los valores medios se conoce la varianza de  $t_c$  y  $t_f$ , se estimaron intervalos de confianza del 95% sobre las medias que permitieron obtener los valores denominados inferior y superior (ver Tabla 5.11).

**Tabla 5.7: parámetros para la resolución del equivalente del tiempo de aceptación**

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} PHV + t_{c,G} G - t_{c,T} - t_{3,LT} \quad (5.2)$$

Intervalo	Valor			Parámetro	Valor
	inferior	medio	superior		
$t_{c,base}$ (s)	3,33	3,42	3,51	$t_{c,HV}$	0,7
$t_{c,x}$ (s)	3,40	3,49	3,58	PHV	10%
				$t_{c,G}$	0
				G	0
				$t_{c,T}$	0
				$t_{3,LT}$	0

Fuente: elaboración propia en base a ecuación 17-1 del HCM2000

**Tabla 5.8: parámetros para la resolución del equivalente del tiempo de seguimiento**

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV} PHV \quad (5.3)$$

Intervalo	Valor			Parámetro	Valor
	inferior	medio	superior		
$t_{f,base}$ (s)	2,00	2,06	2,12	$t_{f,HV}$	1
$t_{f,x}$ (s)	2,12	2,16	2,20	PHV	10%

Fuente: elaboración propia en base a ecuación 17-2 del HCM2000

#### 5.4. Resumen de los Resultados Obtenidos

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  por el método de regresión lineal. En la Tabla 5.10 se presentan los resultados de  $t_c$  estimados según el método de máxima verosimilitud y  $t_f$  según medición directa.

**Tabla 5.9: resultados de  $t_c$  y  $t_f$  por regresión lineal**

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

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5.10: resultados de  $t_c$  por máxima verosimilitud y  $t_f$  por medición directa**

Parámetro	Tipo de vehículo		
	Livianos	Pesados	Total
$t_c$ máx. ver. (s)	3,4	4,2	3,5
$t_f$ directo (s)	2,1	3,1	2,2

Fuente: elaboración propia

Para valorar los incrementos de  $t_c$  y  $t_f$  debido a la presencia de vehículos pesados se han utilizado el intervalo de aceptación estimado mediante máxima verosimilitud y el tiempo de seguimiento obtenido mediante medición directa (promedio de intervalos). El equivalente de vehículos pesados en función del intervalo crítico es igual a 0,7 y el del tiempo de seguimiento es igual a 1.

## 5.5. Comparación con otros métodos

Teniendo presente las particularidades en cuanto a la geometría que han sido mencionadas en el apartado 1 de este trabajo, en la Tabla 5.11 se comparan los valores de  $t_c$  y  $t_f$  que pueden emplearse para calcular los límites inferior y superior de la capacidad de los accesos, en el caso en estudio y en el HCM2000. Para los valores locales se reportan los correspondientes a vehículos livianos y tránsito mixto. Puede advertirse cómo en ambos casos todos los valores son menores que el más bajo del HCM2000, lo que implica una mayor estimación de la capacidad de los accesos.

**Tabla 5.11: comparación de  $t_c$  y  $t_f$  locales versus HCM2000**

Versión	Intervalo de aceptación (s)		Tiempo de seguimiento (s)	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
Val. locales (livianos)	3,5	3,3	2,1	2,0
Val. locales (mixto)	3,6	3,4	2,2	2,1
HCM 2000	4,6	4,1	3,1	2,6

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 5.12 se presentan valores de  $t_c$  y  $t_f$  utilizados en el método Alemán y el NAASRA 1986 (Akcelik 2000). Además, se incluyen los valores de  $t_c$  (por máxima verosimilitud) y  $t_f$  (por medición directa) estimados en Uruguay. Todos los valores de la Tabla 5.12 corresponden a rotondas de 2 carriles.

**Tabla 5.12: comparación de  $t_c$  y  $t_f$  locales versus otros países**

Parámetro	Tipo de vehículo: tránsito mixto		
	Alemán	NAASRA '86	Uruguay
$t_c$ (s)	4,1	4,0	3,5
$t_f$ (s)	2,9	2,0	2,2

Fuente: Akcelik (2000) y datos propios

## 6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

### 6.1. Respecto a los Métodos de Estimación de $t_c$ y $t_f$

La estimación de los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  mediante regresión lineal requiere que la cola tenga al menos un vehículo durante el período de observación. En el mismo sentido, es necesario disponer de un número suficiente de vehículos para que la regresión sea confiable. Debe prestarse especial atención cuando se cuenta con poca cantidad de registros para un valor dado del intervalo promedio (valor medio de  $t$ ). En general, esto ocurre para valores altos de  $n$  (cantidad de vehículos que ingresan en cada intervalo).

La técnica de máxima verosimilitud es complicada pero permite obtener resultados aceptables. Utiliza la mayor cantidad de información sin distorsionar los resultados mediante la inclusión de los efectos de la gran cantidad de gaps rechazados.

Esta metodología tiene en cuenta los efectos debidos a la distribución del flujo de circulación. Si este flujo es bajo, muchos conductores aceptarán gaps mayores sin rechazar ninguno. Por otro lado, si el flujo de circulación es alto, los conductores del flujo de aproximación aceptarán gaps menores. Entonces, la distribución de los gaps aceptados depende del flujo de circulación. La técnica de máxima verosimilitud tiene en cuenta estas condiciones diferentes.

Si todos los conductores aceptan el primer gap sin rechazar ninguno, las ecuaciones 3.1 y 3.2 arrojan resultados triviales. Por lo tanto, es necesario recolectar información suficiente para evitar estas situaciones. De lo contrario se deben aplicar otros métodos alternativos.

## 6.2. Respecto a los Resultados de $t_c$ y $t_f$ en Rotondas de Uruguay

Los resultados obtenidos por los diferentes métodos para  $t_c$  y  $t_f$  resultaron razonablemente similares (ver Tablas 5.9 y 5.10). Los métodos por medición directa y máxima verosimilitud permiten obtener la media y la varianza de los tiempos de aceptación y seguimiento. A pesar de las diferencias geométricas entre las rotondas analizadas y las consideradas en el HCM2000, se estimaron estadísticamente intervalos de confianza sobre las medias para comparar los resultados de  $t_c$  y  $t_f$  en rotondas de Uruguay con los sugeridos en el HCM2000 ya que estos son los tradicionalmente empleados. Hecha esta aclaración, los valores que se presentan en la Tabla 5.11 se obtuvieron con un intervalo de confianza del 95% y permiten afirmar que el tiempo de aceptación y el tiempo de seguimiento en Uruguay son menores que los sugeridos en el HCM2000.

Cuando se comparan otros métodos aplicados en rotondas de 2 carriles, se observa que el  $t_c$  en Uruguay es menor al del método Alemán y al de NAASRA 1986. El  $t_f$  estimado en Uruguay es menor al  $t_f$  del método Alemán y similar al del NAASRA 1986.

## 6.3. Respecto a los Factores de Equivalentes Para $t_c$ y $t_f$ del Tránsito Mixto

Los resultados de los factores de ajuste de los parámetros  $t_c$  y  $t_f$  que permiten considerar el efecto de los vehículos pesados son los siguientes:  $t_{c,HV} = 0,7$  y  $t_{f,HV} = 1,0$ . Ambos valores corresponden a rotondas con 2 carriles de aproximación y 2 carriles de circulación. Los valores incluidos en el HCM2000 para intersecciones no semaforizadas son  $t_{c,HV} = 1,0$  en vías de 2 carriles y  $t_{c,HV} = 2,0$  en vías de 4 carriles. Los valores de  $t_{f,HV}$  son 0,9 para vías de 2 carriles y 1,0 para vías de 4 carriles. Si bien el tipo de intersección (rotonda) sobre el cual se determinaron los factores para el caso de Uruguay es distinto al considerado en el HCM2000 (intersección no semaforizada), se estima pertinente comparar los valores obtenidos en ambos casos. Bajo esta hipótesis, se puede concluir que los resultados de  $t_{f,HV}$  difieren en 10% mientras que los de  $t_{c,HV}$  difieren aproximadamente un 40%. Preliminarmente se considera que la diferencia puede deberse, por una parte, al hecho de que los vehículos que acceden a una rotonda deben prestar atención exclusivamente al tránsito que viene desde la izquierda mientras que en un cruce no semaforizado de una vía de 2 carriles se debe conseguir un gap simultáneo para ambos sentidos de circulación. Adicionalmente se considera que la mayor diferencia obtenida en el intervalo de aceptación puede estar asociada al comportamiento de los conductores.

## REFERENCIAS

Akcelik, R. (2000) **aaSidra User Guide**, Victoria, Australia.

Akcelik, R. (1997) **Lane-by-Lane Modelling of Unequal Lane Use and Flares at Roundabouts and Signalised Intersections: the SIDRA Solution**, Victoria.

Brilon, W., R. Koneig y R. Troutbeck (1997) Useful Estimation Procedures for Critical Gaps, en Kyte M. (Ed.) **Proceedings of the Third International Symposium on Intersections Without Traffic Signals**, Portland, OR, USA, University of Idaho, Moscow, ID, USA.

Siegloch W. (1973) **Capacity calculations for unsignalized intersections**, Schriftenreihe Strassenbau Vol 154.

Tian, Z., R. Troutbeck, M. Kyte, W. Brilon, M. Vandehey, W. Kittelson, Wayne y B. Robinson (2000) **A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time**. Fourth International Symposium on Highway Capacity, Hawaii.

Tian, Z., M. Vandehey, B. Robinson, W. Kittelson, M. Kyte, R. Troutbeck, W. Brilon y N. Wu (1999) **Implementing the Maximum Likelihood Methodology to Measure a Driver's Critical Gap**.

Transportation Research Board (2000) **Highway Capacity Manual**, Washington, DC.

Transportation Research Board (1997) **Review of International Practices Used to Unsignalized Intersections**. Circular 468 Washington, DC.

Troutbeck, R. (1992) **Unsignalized Intersection Theory** en actualización del Reporte Especial 165, Traffic Flow Fundamentals, del Transportation Research Board.