

INTERVALOS CRITICOS Y CAPACIDAD EN INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS DE TRES RAMAS

Violeta Depiante

Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales.
Universidad Nacional de Cordoba. Argentina
vdepiante@yahoo.com

Jorge Galarraga

Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales.
Universidad Nacional de Cordoba. Argentina
jorgala@efn.uncor.edu

RESUMEN

El análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas se basa en una cabal caracterización y entendimiento de la interacción entre dos corrientes de tránsito conflictivas. Los movimientos desde la secundaria, que son los que requieren mayor atención, pueden determinar la necesidad de un cambio en la operación debido principalmente al comportamiento de los conductores.

En este trabajo se estudian los parámetros relevantes en el giro a la izquierda desde la calle secundaria, como son el intervalo crítico y de seguimiento que permiten la determinación de la capacidad del movimiento de giro. También se estima la capacidad para condiciones locales mediante modelos teóricos y mediciones in situ. Se utiliza la metodología propuesta en el Manual de Capacidad de Carreteras 2010 de Estados Unidos de Norteamérica

Mediante relevamientos de campo y análisis estadísticos se determinaron los valores de intervalos críticos de giros a la izquierda desde la calle secundaria en una intersección de la ciudad de Córdoba en Argentina. Los intervalos crítico y de seguimiento para la intersección estudiada resultaron ser inferiores en un 25% y 20% respectivamente a los propuestos en el Manual. Para un volumen conflictivo de 1500 vehículos por hora (representativo de las condiciones analizadas en este trabajo) la capacidad del acceso secundario con los parámetros de cálculo del Manual es de 256 vehículos por hora y con las correcciones aquí propuestas el valor se eleva a 345 vehículos por hora, que representa un incremento del orden del 35%.

PALABRAS CLAVE: intervalo crítico, aceptación de intervalos, capacidad

1. INTRODUCCION

Dentro de la red vial las intersecciones sin control semafórico son las más comunes. El comportamiento de los conductores, ante la corriente conflictiva a la cual se enfrentan, es un factor crucial debido a que las decisiones a tomar son más complicadas que al enfrentarse a una intersección semaforizada, en donde el momento del cruce se encuentra claramente especificado al serle asignado sistemáticamente en forma alternativa un tiempo de uso propio de la zona conflictiva o al enfrentarse a un cruce a desnivel en donde se asigna un espacio diferente. En las conclusiones reportadas en el informe NCHRP 572 (2007) se resalta el comportamiento del conductor como la variable que mayormente afecta la operación y se recomienda fuertemente la calibración de modelos para tener en cuenta el comportamiento local de los conductores y sus cambios a lo largo del tiempo para realizar estimaciones de capacidad acertadas.

El conductor en una intersección no semaforizada debe enfrentarse a dos cuestiones básicas: (1) la de decidir según su propio criterio y uso cuando debería ingresar a la intersección porque le corresponde y (2) la de definir el momento en que resulta seguro hacerlo. Según Raff (1950) se puede interpretar como una oferta continua de intervalos en la corriente principal que el conductor acepta o rechaza según su criterio personal. Habrá algún intervalo intermedio que definirá el límite entre el ingreso o no a la corriente prioritaria. Este intervalo será relevante a la hora de analizar la operación de la intersección. Según sea su valor será la capacidad del acceso no prioritario.

El Manual de Capacidad de Carreteras compendio de años de investigación empírica y teórica realizada en Estados Unidos de Norteamérica, en su versión del año 2010 (TRB, 2010) contiene una detallada metodología para calcular la capacidad y el nivel de servicio en intersecciones controladas por dos señales de pare (Capítulo 19) en correspondencia con el funcionamiento de intersecciones de una calle principal con una secundaria existente en nuestra realidad. Dentro de su metodología presenta valores de intervalos críticos y de seguimiento obtenidos empíricamente para su realidad.

Bajo la premisa de representar las condiciones locales en modelos no desarrollados para nuestra realidad y dada la complejidad de las interrelaciones entre las variables intervinientes en la comprensión de la operación en intersecciones no semaforizadas y a la escasa producción local en la temática (Depiante, 2011) se estudian los intervalos críticos y de seguimiento para el caso particular del giro a la izquierda desde la calle secundaria en una intersección de tres ramas.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

La metodología más adecuada, aceptada y utilizada en la determinación de los intervalos críticos es la del modelo de aceptación de intervalos (Brilon et al., 1997), (Wang et al., 2005). La teoría de la aceptación de intervalos supone que existe un intervalo mínimo que todos los conductores de la corriente secundaria aceptarán en similares intersecciones: el intervalo crítico (t_c). Ningún conductor entrará en la intersección a menos que el intervalo que tenga en la corriente principal sea igual o mayor al intervalo crítico. También se asume que dos o más conductores del acceso secundario podrían emplearlo para entrar en la misma. La separación, medida en tiempo, entre vehículos de la corriente secundaria que aprovechan un mismo intervalo se conoce como tiempo de seguimiento (t_f). En ambos casos se estiman valores medios a partir de una muestra, y se los

considera como representativos de la población. El tiempo de seguimiento, el intervalo de aceptación y los intervalos rechazados se pueden registrar directamente en campo, en cambio el intervalo crítico debe calcularse en función de los aceptados y rechazados (Tian et al., 1999).

Se han desarrollado numerosos estudios y técnicas para estimar el intervalo crítico. Troutbeck y Brilon (1996) reportan que el método de máxima verosimilitud es un método adecuado para la determinación del intervalo crítico. En Tian et al. (1999) se realiza la comparación de diez metodologías utilizadas para la determinación de los intervalos críticos concluyendo que la de máxima verosimilitud ha mostrado ser el más exacto y confiable, por la mayor eficiencia en el uso de los datos recolectados al no tener que descartar tantos casos. No obstante siempre deben descartarse los datos en el que el intervalo aceptado resulte menor al máximo rechazado. La ARRB (Akcelik, 2007) utiliza el método de máxima verosimilitud para estudiar la distribución de los intervalos críticos. Para la población de conductores frecuentemente se asume que los intervalos críticos tienen una distribución log-normal. Estudios anteriores han propuesto procedimientos y métodos de estimación de intervalos críticos. Los más comúnmente mencionados en Kyte et al (1996) son los de Asworth, Siegloch y máxima verosimilitud de Troutbeck.

La exactitud de la estimación de la capacidad está fuertemente influenciada por la precisión de los valores de t_c y t_f . La mayoría de los procedimientos de análisis de capacidad en las intersecciones no semaforizadas se basan en modelos estocásticos como lo es la teoría de aceptación de intervalos. Según este modelo la capacidad es una función dependiente de la disponibilidad de intervalos. Esta metodología fue desarrollada en Alemania por Harders en 1968 y por Siegloch en 1973 (Luttinen, 2003). Tanto los manuales de capacidad de Alemania como el de Estados Unidos de Norteamérica y el de Suiza contemplan este criterio. En Inglaterra los análisis de capacidad se basan en modelos estadísticos con ecuaciones de regresión empíricas como las de Kimber y Coombe desarrolladas en 1980 (Lutinen, 2006). Este método puede modelar condiciones de elevada congestión. Una tercera opción en el análisis de capacidad de intersecciones no semaforizadas está basada en una analogía con el funcionamiento de una intersección semaforizada sugerido por Winsten en 1956 y desarrollado por Akcelik en 1994 (Akcelik R., 2007). En este grupo, los tiempos de bloqueo de las corrientes prioritarias se consideran como intervalos de rojo y los períodos disponibles para la corriente secundaria se consideran intervalos de verde. El procedimiento de flujos conflictivos aditivos, desarrollado por Brilon y Wu (Brilon y Wu, 2002) es similar a esta tercera opción. Más recientemente en el área de electrónica se han desarrollado nuevas herramientas de análisis que han sido aplicadas en el área de transporte como son el “autómata celular” (Ruskin y Wang, 2002) y la “técnica de conflicto” (Brilon y Thorsten, 2005) para el análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas e intervalos de descarga desde uno de los accesos.

3. MODELOS DISPONIBLES PARA INTERVALOS CRITICOS Y CAPACIDAD

Existen básicamente dos grandes grupos de metodologías para la estimación del intervalo crítico y del tiempo de seguimiento ya sea en forma conjunta o en forma independiente. Unas, Siegloch, lo hacen en forma conjunta y determinan ambos intervalos a la vez utilizando técnicas de regresión, mientras que máxima verosimilitud calcula los valores medios esperados del intervalo crítico y del tiempo de seguimiento por separado considerando el proceso como probabilístico.

3.1. Método de determinación conjunta de ambos intervalos

El método para la estimación de los intervalos críticos y de seguimiento en forma conjunta de Sieglöch es bastante confiable y simple pero solamente aplicable en condiciones de saturación, es decir con cola continua sobre el ingreso por la calle secundaria. Se basa en el análisis de regresión del número de vehículos que utilizan un mismo intervalo versus el tamaño del intervalo. Con esto se determina tanto el intervalo crítico como el intervalo de seguimiento. El procedimiento incluye los siguientes pasos: (1) Registrar para cada tamaño de intervalo “ t ”, el número de vehículos “ i ” que ingresan en ese intervalo, (2) calcular el tamaño promedio del intervalo $E(t)$ para cada uno de los intervalos aceptados por solamente “ n ” vehículos, (3) ajustar una regresión lineal entre los valores promedios de tamaño de intervalo $E(t)$ (como variable dependiente) y el número de vehículos que ingresan durante este tamaño promedio de intervalo, “ n ” (como variable independiente), (4) la pendiente de la recta de regresión es el valor estimado para el tiempo de seguimiento (t_f), ya que representa el tiempo que agrega el paso de un vehículo más de “ i ” a “ $i+1$ ”, (5) el intervalo de aceptación crítico se calcula como la ordenada al origen (t_0) más la mitad del tiempo de seguimiento, ya que con menos de ese valor no entra ningún vehículo. El método de regresión no se puede aplicar si no existe cola continua. En estos casos es necesario aplicar un método probabilístico.

3.2. Determinación independiente del intervalo de seguimiento: Método de máxima verosimilitud

Si por la calle secundaria no se observa formación continua de cola, que es el caso más frecuente, no se puede aplicar el método de regresión lineal debido a que los intervalos de la corriente principal no serían completamente aprovechados y en consecuencia se deben emplear otras metodologías. Para la estimación del tiempo de seguimiento se debe obtener el intervalo promedio entre vehículos que utilizan el mismo intervalo en la corriente principal en condiciones de cola continua. Si el vehículo no se encontrara en cola, no se lo consideraría en los cálculos. El procedimiento es análogo al que se emplea para calcular la tasa de flujo de saturación en intersecciones semaforizadas (TRB, 2010).

Troutbeck (1992) describe un procedimiento de estimación de intervalos críticos mediante máxima verosimilitud. Este procedimiento permite la estimación bajo condiciones de tráfico que no sean sobresaturadas. Sabemos que el intervalo crítico de cada conductor se encuentra entre el intervalo máximo rechazado y el intervalo aceptado por él mismo. Si el intervalo aceptado fuera inferior al máximo rechazado se considera que el conductor está desatento. El valor rechazado puede descartarse, o bien cambiarse por un valor justo por debajo del aceptado. Este procedimiento requiere asumir como primera medida una distribución probabilística de los valores de intervalo crítico para la población de conductores. Para la mayoría de los casos es razonable y aceptado en muchos estudios asumir una distribución log-normal, ya que está sesgada hacia la derecha y no presenta valores negativos.

Conceptualmente este método permite ajustar una distribución de probabilidades a una muestra de datos, algo análogo al ajuste por regresión lineal. Considerando la siguiente notación:

a_i = logaritmo del intervalo aceptado por el i -ésimo conductor

r_i = logaritmo del máximo intervalo rechazado por el i -ésimo conductor

μ y σ^2 = media y varianza de los logaritmos de los intervalos críticos de los conductores individuales (considerando una distribución log-normal); y $f(\cdot)$ y $F(\cdot)$ la función de densidad de probabilidad y la función de frecuencias acumuladas respectivamente para la distribución normal.

La probabilidad de que el intervalo crítico de un conductor individual se ubique entre r_i y a_i es $F(a_i) - F(r_i)$.

Se puede demostrar que para encontrar la solución deben resolverse las siguientes dos ecuaciones que deben ser resueltas en forma iterativa:

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

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(r_i - \mu^*)f(r_i) - (a_i - \mu^*)f(a_i)}{F(a_i) - F(r_i)} = 0 \quad (2)$$

Donde μ^* es una estimación de μ y $f(x)$ $F(x)$ son funciones de la media y varianza estimadas. La resolución simultánea de estas ecuaciones permite obtener la media $E(t_c)$ y la varianza $Var(t_c)$ de la distribución del intervalo crítico que viene expresada en función de los parámetros de la distribución log-normal hallados como:

$$E(t_c) = e^{[\mu + 0.5\sigma^2]} \quad (3)$$

$$Var(t_c) = E(t_c)^2 e^{[\sigma^2]} \quad (4)$$

El intervalo crítico utilizado en los cálculos de aceptación de intervalos es entonces igual a $E(t_c)$. El valor debería ser inferior a la media de los intervalos aceptados. La información utilizada es la máxima al incluir el efecto de un número grande de intervalos rechazados. Pero no pueden ser incluidos entre los datos, los conductores que aceptan el primer intervalo que se les presenta sin rechazar ninguno. El método de Máxima Verosimilitud contempla situaciones tan diversas en cuanto al volumen de la corriente conflictiva como a la distribución de los intervalos en la misma. Estas situaciones podrían ocasionar modificaciones en los valores de los intervalos críticos, como ser la de suponer que el intervalo crítico sería mayor si el flujo conflictivo fuera bajo y viceversa.

3.3. Modelos de capacidad teórica

Los modelos de capacidad basados en el proceso de aceptación de intervalos se derivan de un modelo de colas simple en donde se considera el cruce de dos corrientes de tráfico: (1) una corriente prioritaria o principal de volumen V_p y (2) otra corriente secundaria o no prioritaria de volumen V_n . Los vehículos de la corriente principal no presentan demoras y a los de la secundaria sólo se les permite ingresar a la zona de conflicto si el siguiente vehículo de la calle principal está todavía al menos a t_c segundos. En caso contrario el vehículo de la secundaria debe esperar.

La deducción matemática de la función de capacidad c_n para la corriente no prioritaria es la siguiente: Sea $g(t)$ el número de vehículos que pueden ingresar desde la secundaria en un intervalo de duración t de la corriente principal. El número esperado de estos intervalos t en la hora será: $3600.v_p.f(t)$ donde $f(t)$ es la función de densidad de los intervalos en la corriente principal y v_p es el volumen en vehículos por segundo (vps) de la corriente principal. Por lo tanto la capacidad provista por los intervalos de duración t cada hora es $3600.v_p.f(t).g(t)$. Para determinar la capacidad total, expresada en vehículos por segundo se debe integrar a lo largo de todo el rango posible de intervalos de la corriente principal, por lo tanto

$$c_n = v_p \int_0^t f(t)g(t)dt \quad (5)$$

donde:

c_n : máximo volumen que puede descargar de la línea de parada de la secundaria (vps)

v_p : volumen de la corriente principal (vps)

$f(t)$: función de densidad de los intervalos de la corriente principal

$g(t)$: número de vehículos de la calle secundaria que pueden ingresar en un intervalo de duración t de la corriente principal.

Basado en el modelo de aceptación de intervalos, la capacidad de un caso sencillo de dos corrientes de tráfico se puede evaluar utilizando métodos de probabilidad elemental bajo los siguientes supuestos:

- Valores de t_c y t_f constantes (población de conductores homogénea y consistente),
- Distribución exponencial negativa para los intervalos de la corriente principal
- Flujos de tráfico constante para cada corriente de tráfico.

Pueden distinguirse dos formulaciones diferentes que han dado lugar a dos familias de ecuaciones de capacidad. Una asume una función escalonada constante para $g(t)$ y la otra asume una función lineal continua, que puede resultar en valores no enteros para $g(t)$. Ambas formulaciones producen resultados útiles de capacidad (Kyte et al., 1996).

Resolviendo la integral de la Ecuación 5 considerando para $f(t)$ una distribución exponencial negativa dada por la Ecuación 6 y para $g(t)$ una función escalonada constante dada por la Ecuación 7, se obtiene la formulación de Harders que permite obtener la fórmula de capacidad dada por la Ecuación 10.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6)$$

$$g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n(t) \quad (7)$$

donde:

λ : es el volumen en la calle principal en vehículos por segundo (vps)

$P_n(t)$: es la probabilidad de que n vehículos de la calle secundaria ingresen en un intervalo de la corriente principal de duración t dada por la Ecuación 8:

$$P_n(t) = \begin{cases} 1, & t_c + (n-1)t_f < t < t_c + nt_f \\ 0, & \text{para todo otro valor de } t \end{cases} \quad (8)$$

y resolviendo:

$$c = v_p \int_0^{\infty} f(t)g(t)dt \quad (9)$$

se obtiene:

$$C_n = v_p \frac{e^{-v_p t_c}}{1 - e^{-v_p t_f}} \quad (10)$$

Resolviendo la integral de la Ecuación 5 considerando para f(t) una distribución exponencial negativa y para g(t) una función lineal se obtiene la formulación de Sieglöch para estimar la capacidad dada en la Ecuación 11.

$$C_n = \frac{1}{t_f} e^{-v_p t_0} \quad (11)$$

con: $t_0 = t_c - \frac{t_f}{2}$

El Manual de Capacidad HCM2010 define la capacidad potencial para un tipo de movimiento dado desde la secundaria pero asumiendo cuatro condiciones base: (1) el tránsito de las intersecciones aledañas no afecta a la intersección en cuestión, (2) cada movimiento desde la secundaria tiene su propio carril, (3) el patrón de llegadas desde la calle principal no está afectado por la presencia de una intersección semaforizada próxima y (4) ningún otro movimiento de prioridad sobre él impide el movimiento en cuestión. La formulación se presenta en la Ecuación 12. Puede advertirse que emplea el ya citado modelo de Harders de la Ecuación 10, expresando el flujo de la calle principal en vehículos por hora (vph).

$$C_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-\frac{v_{c,x} t_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,x} t_{f,x}}{3600}}} \quad (12)$$

donde:

$C_{p,x}$ = capacidad potencial del movimiento x (vph),

$v_{c,x}$ = flujo conflictivo para el movimiento x (vph),

$t_{c,x}$ = intervalo crítico para el movimiento x (s),

$t_{f,x}$ = tiempo de seguimiento para el movimiento x (s).

Según el ya mencionado informe referido a intersecciones no semaforizadas tipo rotonda (NCHRP 572, 2007), la forma del modelo propuesto por el HCM2010 para determinar la capacidad puede transformarse y observar similitud con un modelo de regresión exponencial, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C_{p,x} = \frac{3600}{t_{f,x}} e^{-\left(\frac{t_{c,x} - t_{f,x}/2}{3600}\right) v_{c,x}} \quad (13)$$

Es decir, la formulación de Sieglöch, que puede expresarse como:

$$C_{p,x} = A e^{-B v_{c,x}} \quad (14)$$

siendo:

$$A = \frac{3600}{t_{f,x}} \quad (15)$$

$$B = \frac{t_{c,x} - t_{f,x}/2}{3600} \quad (16)$$

Si consideramos los valores base propuestos por el HCM2010 para el movimiento de giro a la izquierda desde la secundaria, para una principal de dos carriles e intersección de tres ramas (en T), t_c (6.4s) y t_f (3.5s), se tendría:

$$c_{p,x} = 1029e^{-0.00129c_{c,x}} \quad (17)$$

3.4. Modelos de estimación de capacidad en campo

En el caso de que exista una cola continua en la calle secundaria la tasa de descarga es indefectiblemente la capacidad del movimiento en cuestión medida en el campo. No obstante, en la mayoría de las intersecciones esa situación de cola continua por un tiempo relativamente largo no ocurre. Para obtener suficiente información se divide el tiempo en intervalos más pequeños, por ejemplo de un minuto. Si se consideraran períodos de 15 minutos es poco probable que se encuentre el estado de cola continua. Los conductores seguramente optarían por vías alternativas evitando esa intersección o posiblemente ya estaría en condiciones de ser semaforizada mucho antes de llegar a esa situación (Kyte et al., 1996). Entonces donde no se presentan colas en forma continua en la secundaria Kyte utilizó la Ecuación 18 para estimar la capacidad en condiciones no saturadas. La formulación es la siguiente:

$$c_m = \frac{3600}{t_s + t_{mv}} \quad (18)$$

donde:

c_m : capacidad de campo para la calle secundaria (vph),

t_s : demora promedio de servicio de los vehículos una vez que llegan a la línea de parada (s),

t_{mv} : tiempo promedio de movimiento desde la segunda posición hasta la línea de parada (s)

La demora de servicio se mide para un período específico y se promedia para todos los vehículos de la calle secundaria que pasaron la intersección durante ese período. La demora de servicio es la demora que ocurre en la primera posición de la cola (en la línea de parada). Es la duración desde que llega el vehículo a la primera posición hasta que se retira de la misma. La medición de la demora de servicio no requiere de una cola continua. El tiempo de movimiento es el lapso entre que el vehículo anterior en la cola se va de la línea de parada y el momento en que el siguiente llega a la primera posición. Se requiere de al menos dos vehículos en la cola.

La suma del tiempo de servicio y el tiempo de movimiento es una variable que refleja el tiempo promedio que cada vehículo ocupa la línea de parada. Basado en el concepto de teoría de colas, la capacidad es la inversa de la suma del tiempo de servicio más el de movimiento.

4. CASO DE APLICACION

4.1. Breve descripción del relevamiento y procesamiento de datos

Para el estudio se seleccionó una intersección de la ciudad. La misma se encuentra ubicada en la zona sur sobre una de las vías principales de ingreso y egreso del centro de la ciudad. La intersección es de tres ramas de acceso, es decir una intersección en T. La intersección corresponde a la esquina de Avenida Cruz Roja Argentina (paralela y adyacente a la línea de FFCC sur de oeste a este) y Avda. Nores Martínez (que presenta un desvío hacia la intersección en cuestión). Ver Figura 1.



Figura 1. Vista de la intersección seleccionada

Toda la corriente vehicular proveniente del norte por Avda. Nores Martínez que desea proseguir hacia el sur debe indefectiblemente desviarse hacia el oeste y luego realizar un giro a la izquierda. El mismo se realiza desde un acceso secundario, de un solo carril y un único movimiento. Los conductores son asiduos, conocedores. Las velocidades de acceso al desvío son elevadas y las decisiones de cruce precisas. Esta situación no es sencilla de encontrar en la trama urbana de allí lo interesante de la intersección. La posibilidad de contar con mucha información respecto de una situación en particular permite obtener conclusiones robustas respecto del comportamiento de los conductores en esta situación. La Avda. Cruz Roja Argentina en ese sector, funciona como una arteria de un carril funcional por sentido con un pequeño cordón divisorio que puede ser utilizado por solamente un vehículo para cruzar en etapas de manera forzada afectando de alguna manera la circulación sobre la calle principal.

Para la recolección de datos se realizaron filmaciones en días laborables en horarios de mayor movimiento vehicular. Se seleccionaron dichos períodos con el objeto de poder recabar mayor información en menor tiempo. Se empleó una cámara digital ubicada de forma tal que se tuviera una visual adecuada de los vehículos que llegaban a la línea de parada desde la calle secundaria. Para definir los horarios pico se realizaron recorridas de la intersección en varios horarios del día, por la mañana a medio día y por la tarde. Se observaron mayores volúmenes en horarios de la tarde por lo que se registraron datos en esa franja horaria entre las 17:30 y las 20:30 hs. Se realizaron las mediciones durante seis períodos diferentes en los horarios mencionados. No obstante también se realizaron otras filmaciones de apoyo. Se totalizaron más de cuatro horas de

filmación realizadas durante el mes de julio de 2009. De ellas se extrajeron manualmente, lo que requirió un denotado esfuerzo en tiempo y procesamiento de datos necesarios tanto para la estimación de intervalos críticos y de seguimiento.

Para la estimación de los intervalos crítico y de seguimiento se registraron tiempos: (1) de llegada a la línea de parada del vehículo desde la calle secundaria, (2) tiempo de egreso de la mismo, (3) tiempos de paso de los vehículos de la principal por una línea de referencia ubicada en la esquina. También se registraron (4) los vehículos que utilizaron el mismo intervalo de la principal para cruzar para obtener el tiempo de seguimiento, si éste existió. Todos estos datos recolectados manualmente de las filmaciones fueron ingresados a una planilla de cálculo para disponer de una base de datos y ser analizados a fin de observar incoherencias en los mismos para contar con una base sólida. Los registros de todos los tiempos fueron ordenados secuencialmente en las planillas y luego a partir de diferencias entre tiempos se obtuvieron: (1) intervalos, ya sea entre vehículos de la principal o entre vehículos de la secundaria, (2) definición de intervalos aceptados, intervalos rechazados, (3) cantidad de vehículos que cruzan una línea definida por unidad de tiempo, tanto de ingreso por los accesos como tasas de descarga desde la línea de parada de la calle secundaria, cantidad de vehículos por unidad de tiempo que utilizan un intervalo dado de la corriente principal.

Para cada uno de los accesos se verificaron si los arribos se realizaban en forma aleatoria. Para la calle secundaria en uno de los períodos considerados de 40 minutos con un total de 218 vehículos, la media de la cantidad de vehículos que llegó a la línea de parada fue de 5.04 y la desviación estándar de 2.01 resultando el estadístico chi- cuadrado calculado de 4.1 mientras que el de tabla correspondiente a la distribución de Poisson, para siete grados de libertad es de 14.0671. Como consecuencia no se puede rechazar la hipótesis de llegadas aleatorias. Lo mismo ocurre para el acceso desde la izquierda con un total de 368 vehículos y para el acceso desde la derecha con un total de 657 vehículos.

4.2. Estimación de los intervalos mediante regresión lineal

A manera de ejemplificación se presenta en uno de los períodos analizados (Ver Tabla 1) en el que se registraron colas prácticamente en forma permanente sobre la calle secundaria la determinación de los intervalos críticos y de seguimiento en forma conjunta por la técnica de regresión propuesta por Siegloch, ya que al menos un vehículo permanecía en cola a lo largo del período. El período analizado fue el 4, en el cual del total de vehículos en la calle secundaria (de 185 en el período analizado de 30 minutos) sólo se registraron 33 eventos de cruce desde una fila en un intervalo determinado.

Para el período 4, la Figura 2 muestra los pares ordenados y la Figura 3 la línea de tendencia considerando los intervalos aceptados medios. La pendiente de la recta de regresión es la estimación del tiempo de seguimiento (t_f), ya que representa el tiempo que agrega el paso de un vehículo más. Por su parte el intervalo crítico se calcula como la ordenada al origen (t_o) más la mitad del tiempo de seguimiento, ya que con menos de ese valor no entra ningún vehículo. Si realizamos la regresión considerando como variable dependiente la media de los intervalos aceptados para cada número de vehículos considerado, el intervalo de seguimiento resulta de 2.879s y el intervalo crítico resulta de 5.393s ($3.9531s + 2.879/2$ s). Puede observarse que la cantidad de intervalos aceptados en donde ingresan 4 o más vehículos es pequeña.

Se decidió agrupar todos los períodos. La Figura 4 presenta el gráfico de dispersión de los datos. La proporción de datos para ingresos de 4 y 5 vehículos sigue siendo muy baja. Sólo 13 de los 265 casos registrados corresponden a esos valores por lo que decidió descartarlos de la regresión.

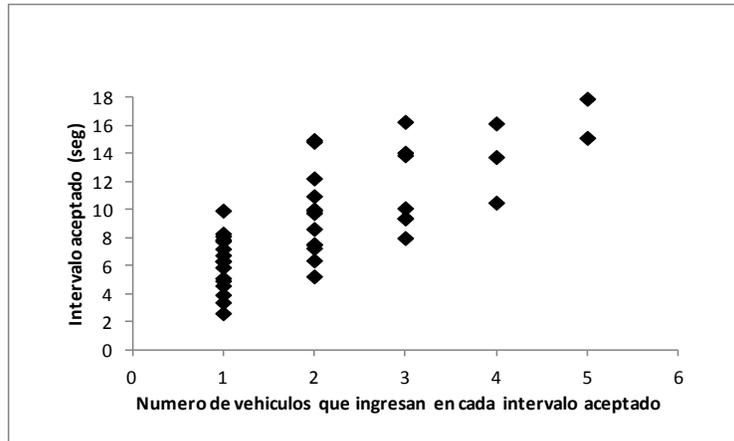


Figura 2. Dispersión tamaño de intervalo aceptado y número de vehículos. Período 4.

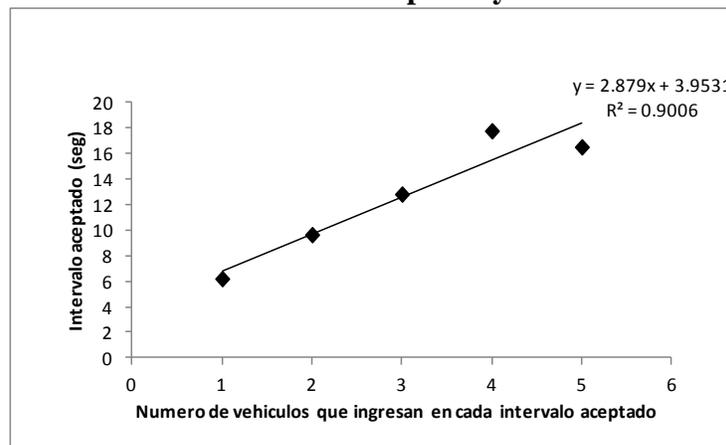


Figura 3. Regresión tamaño de intervalo medio aceptado y número de vehículos. Período 4.

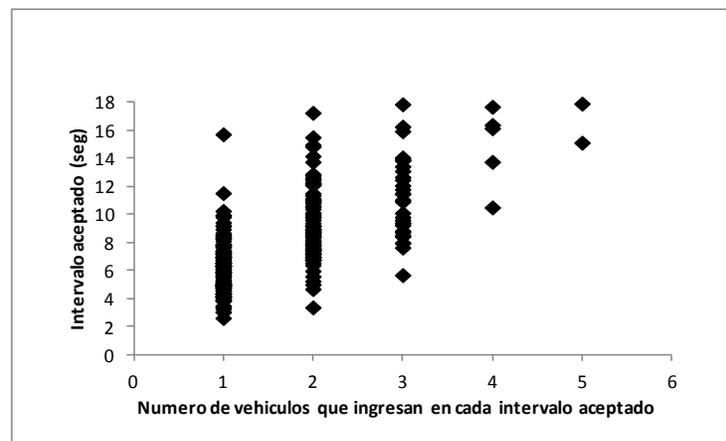


Figura 4. Dispersión tamaño de intervalo aceptado y número de vehículos. Todos los períodos.

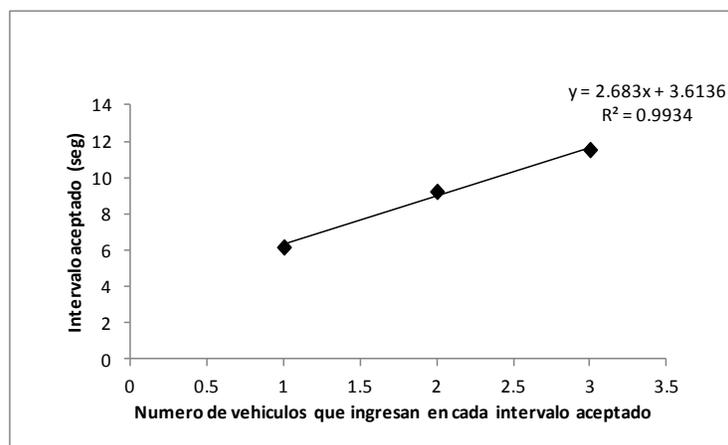


Figura 5. Regresión tamaño de intervalo medio aceptado y número de vehículos. Todos los períodos.

Así la cantidad de datos utilizados para la regresión resultó de 252 de los cuales 133, 87 y 32 corresponden a uno, dos y tres vehículos que ingresan respectivamente.

La Figura 5 muestra los datos finalmente utilizados para el cálculo del intervalo crítico y de seguimiento y la ecuación de la recta de regresión encontrada. El valor de intervalo crítico en este caso resulta de 4.96s ($3.6136s + 2.683/2s$) y el tiempo de seguimiento corresponde al valor del coeficiente angular de 2.683s.

4.3. Determinación de intervalo de seguimiento

Los tiempos de seguimiento individuales se obtuvieron a través de la medición directa en campaña del intervalo (en segundos) entre dos vehículos sucesivos de una cola que hacía uso de un mismo intervalo de la corriente conflictiva. Se calculó la media y varianza considerando todos los períodos de filmación en conjunto para la estimación de los intervalos de seguimiento. No obstante se presentan los intervalos de seguimiento por período y para el conjunto total de datos y la cantidad de casos respectivos en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores estimados de intervalo de seguimiento para los distintos períodos analizados, varianza y número de casos

Período	Media $E(t_f)$ (s)	Varianza $Var(t_f)$ (s ²)	Casos
1	2.794	0.896	23
2	2.848	0.709	39
3	2.857	0.944	65
4	2.796	0.864	59
5	2.517	1.009	26
6	2.773	0.832	13
Todos	2.80	0.861	225

4.4. Intervalo crítico mediante el Método de máxima Verosimilitud

Se consideraron varias opciones en cuanto a la división y promedio de datos. Según Tian (Tian et al., 2001) pueden obtenerse nueve valores de intervalo crítico en un período de dos horas si los flujos medidos sobre la secundaria resultan superiores a los 200 vph. En casos en que se disponía de grabaciones de una hora en donde el volumen de la secundaria superara los 100 vph se calculó el intervalo crítico considerando la cantidad total de datos y agrupándolos en intervalos menores, encontrando que los valores obtenidos no presentaron diferencias significativas por lo que se analizó el período completo. El total de períodos analizados fue de seis.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento general se procedió a calcular los valores del intervalo crítico y varianza considerando cada período de medición realizado por separado, como un conjunto de datos, para observar si existían modificaciones en el valor de t_c con el volumen conflictivo entre períodos. La Figura 6 muestra los pares ordenados volumen de conflicto - intervalo crítico para los períodos analizados. Cada uno de los puntos indica el t_c encontrado con el método de máxima verosimilitud para diferentes volúmenes de conflicto del movimiento. Se observa que los intervalos en su mayoría se ubican entre 4.65 y 5 segundos excepto uno. El valor inferior obtenido de 4.28s puede deberse a que realmente se observen cambios en el comportamiento de los conductores a medida que se incrementan los volúmenes de conflicto en la corriente principal o que alguna de las condiciones base no se esté cumpliendo.

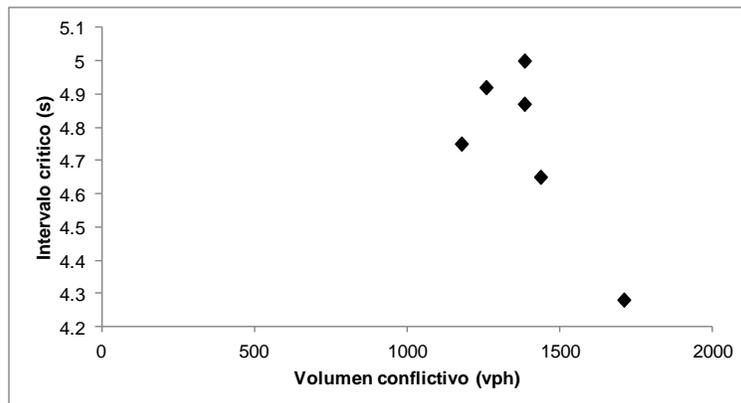


Figura 6. Sensibilidad del intervalo crítico al volumen conflictivo.

En el campo se observaron en el período de medición de volúmenes más elevados que los vehículos de la corriente principal debían frenar ante el ingreso de algunos de los vehículos de la calle secundaria, con lo cual la prioridad de los vehículos de la principal se ve limitada por la maniobra del vehículo de la secundaria lo cual modifica los valores de intervalo crítico. A volúmenes cercanos a la capacidad los conductores de las corrientes conflictivas “comparten” prioridades. Debido a esto se consideraron en la unificación de períodos todos menos este. Este fenómeno de limitación de la prioridad de la corriente principal generando intervalos críticos menores y capacidades superiores en la corriente no prioritaria ya fue estudiado (Troutbeck y Kako, 1999).

En la Tabla 2 se consignan los valores obtenidos para las medias y varianzas de los intervalos críticos para cada período contemplado y para el conjunto total y se incluye además el número de casos empleados para el cálculo.

Una muestra de 138 vehículos hubiera sido requerida (considerando un margen de error igual a medio segundo utilizado como punto de partida para establecer el tamaño de la muestra, una desviación estándar teórica de valor 3 y un valor de z crítico para un 95% de confiabilidad de 1.96). Considerando los períodos 2 a 6, según el método de máxima verosimilitud el valor del intervalo crítico para una intersección en T es de 4.77 ± 1.35 s (n= 308 datos). El valor de intervalo de seguimiento determinado como promedio de todos los casos analizados resultó de 2.80 ± 0.86 s (n= 225 datos).

Tabla 2. Valores estimados de intervalo crítico para los distintos períodos analizados, varianza y número de casos

Período	Media E(t_c) (s)	Varianza Var(t_c) (s^2)	Casos
1	4,28	0.83	50
2	4.65	1.12	94
3	4.75	2.45	82
4	4.92	1.61	49
5	4.87	1.43	55
6	5.00	1.74	28
Todos menos 1	4.77	1.83	308

Para poder realizar una comparación con el método de regresión lineal, se estimaron nuevamente los valores de intervalo crítico y de seguimiento para los períodos 2 a 6 obteniéndose 4,94s y 2,92s respectivamente. Considerando que el método de máxima verosimilitud es el más recomendado por la bibliografía se decidió adoptar sus resultados como representativos de las condiciones locales.

Tabla 3. Intervalo de confianza para los intervalos crítico y de seguimiento medios

	Córdoba			HCM2010
	Media (s)	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Media (incluida en el intervalo)
Intervalo crítico	4.77	4.62	4.92	6.4 (no)
Intervalo de seguimiento	2.8	2.69	2.91	3.5 (no)

Con el fin de precisar estadísticamente las diferencias existentes se estimó un intervalo de confianza del 95% sobre las medias locales, si el mismo excluyera al valor propuesto por el HCM2010, podría afirmarse que las mismas difieren significativamente de las de Estados Unidos de Norte América. La Tabla 3 presenta los límites inferior y superior del intervalo de confianza de la media obtenidos para el intervalo crítico en intersecciones con vías principales de dos carriles. Entre paréntesis, junto al valor medio propuesto por el HCM2010, se consigna si el mismo está incluido dentro del intervalo de confianza del 95%. Si consideramos los resultados obtenidos por el método de regresión lineal de 4.96 para el intervalo crítico y 2.683 s para el

tiempo de seguimiento estos se encuentran muy próximos al límite superior e inferior respectivamente.

4.5. Estimación de la capacidad en intersección en T empleando modelos teóricos

Los valores adoptados para el intervalo crítico $t_c = 4.77 \pm 1.35$ s (con 308 datos) y para el tiempo de seguimiento $t_f = 2.80 \pm 0.86$ s (con 225 datos) fueron empleados en la obtención de la capacidad resultando en las Ecuaciones 19 (Harders/HCM2010) y 20 (Siegloch/NHCRP2007).

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-0.001325v_{c,x}}}{1 - e^{-0.000778v_{c,x}}} \quad (19)$$

$$c_{p,x} = 1286e^{-0.000936v_{c,x}} \quad (20)$$

donde:

$v_{c,x}$ corresponde al volumen conflictivo (prioritario) y

$c_{p,x}$ a la capacidad del movimiento de la secundaria, ambos medidos en vehículos por hora.

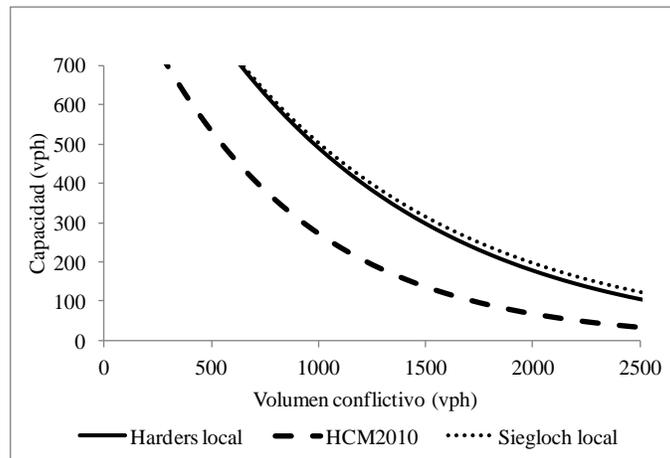


Figura 7. Comparación de formulaciones de Harders y Siegloch con valores de intervalos locales y HCM2010 con valores base

Los resultados obtenidos, tanto con la ecuación de Harders como con la de Siegloch son prácticamente iguales como puede apreciarse en la Figura 7. Además la citada Figura muestra la comparación con la formulación del HCM2010, Ecuación 18, con la cual las capacidades obtenidas resultan considerablemente menores.

4.6. Estimación de la capacidad empleando modelos basados en mediciones de campo

Durante algunos lapsos en los períodos registrados existieron colas continuas de los cuales se obtuvieron las tasas de descarga, que representan las capacidades del acceso secundario para determinado flujo conflictivo. En la Tabla 4 se reportan los lapsos en minutos en donde las colas estuvieron presentes, las tasas de descarga en esos períodos y el volumen conflictivo del período

en vehículos. En la Figura 8 los volúmenes se llevaron a la hora y se graficaron. Los valores obtenidos corresponden a una video filmación de una hora y veinte minutos con volúmenes de ingreso por la calle secundaria de 388 vehículos y volumen conflictivo de 1504 vehículos. Puede observarse la tendencia de disminución de la capacidad con el aumento del flujo conflictivo, con la mayor parte de los datos disponibles observados entre 1000 y 1500vph. Las capacidades obtenidas de la aplicación de la metodología del HCM2010 sin correcciones que reflejen el comportamiento de los conductores locales arrojan valores inferiores a los efectivamente medidos. Las estimaciones de capacidad según los modelos teóricos utilizados permiten afirmar que los ajustes locales en los intervalos críticos y de seguimiento reflejan mejor las capacidades medidas. La Figura 9 resume los resultados obtenidos para los modelos y los valores encontrados de capacidad en campo.

Tabla 4. Períodos analizados para determinar la capacidad

Período	Tasa de descarga de la cola (vehículos)	Volumen conflictivo (vehículos)	Tiempo de medición (minutos)
1	12	51	2.0
2	4	28	1.2
3	37	111	4.9
4	2	5	0.3
5	16	61	2.9
6	17	56	3.3
7	9	24	1.2
8	2	4	0.2
9	7	21	1.0
10	13	38	2.0
11	2	13	0.5
12	2	9	0.4
13	14	67	2.7
14	5	13	0.6
15	16	58	2.6
16	10	23	1.2
17	17	41	2.2
18	30	124	5.2
19	46	188	7.9
20	4	44	1.2
21	14	64	2.8
22	11	60	2.2
23	5	18	0.8
24	19	86	3.3
25	6	43	1.7
26	31	93	4.2
27	8	57	1.8
28	6	7	0.6
29	23	97	3.9

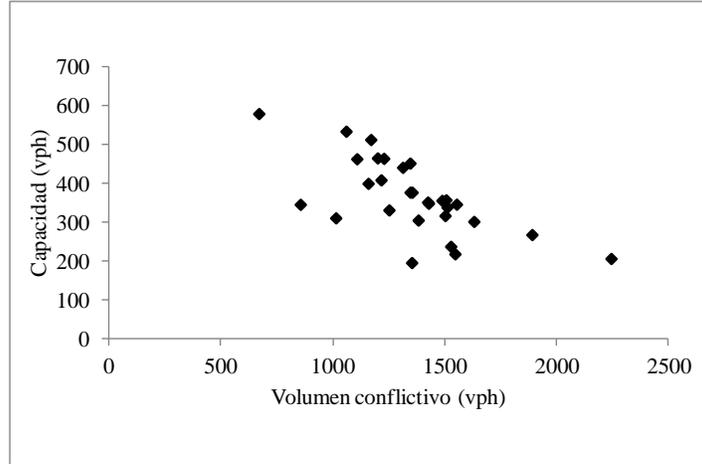


Figura 8. Diagrama de dispersión capacidad y volumen conflictivo

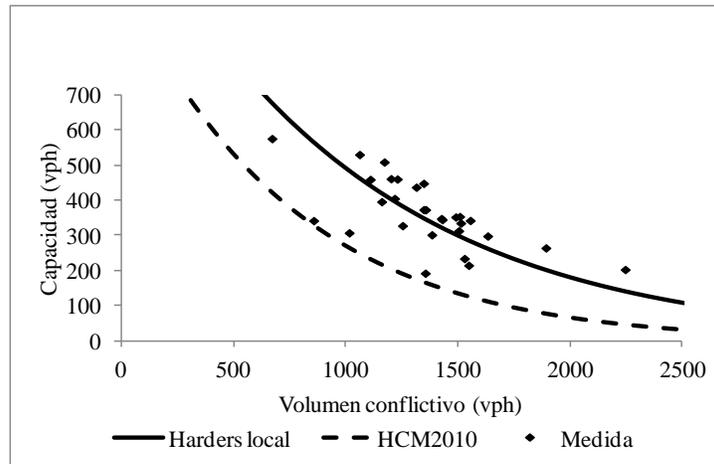


Figura 9. Capacidades modeladas y medidas

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El parámetro clave en el análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas es el valor del intervalo crítico (tiempo mínimo necesario entre los vehículos de la corriente principal para el ingreso de un vehículo de la calle secundaria); como así también el intervalo de seguimiento (intervalo entre vehículos en cola sobre la secundaria que ingresan en un mismo intervalo crítico de la corriente conflictiva o principal). Estos valores son los que mejor representan la influencia del comportamiento de los conductores en las condiciones del tráfico (Weinert, 1999).

En general, en este tipo de intersecciones, los problemas que se presentan no son grandes si los volúmenes intervinientes no lo son (Troutbeck y Brilon, 1996). A medida que los volúmenes (de ambos tipos de accesos) se incrementan, las demoras y las colas también lo hacen y las diferencias en las estimaciones de capacidad por diferencias en los intervalos críticos se hacen cada vez más marcadas con el incremento de los volúmenes conflictivos. Corresponde consignar

que los valores de intervalos críticos no son importantes en sí mismos, sino en la medida que son utilizados en las ecuaciones para calcular capacidad y demora.

El método adoptado para la estimación del intervalo crítico es el de máxima verosimilitud siendo el valor obtenido de 4.77 ± 1.35 s (n= 308 datos) y el valor de intervalo de seguimiento determinado como promedio de todos los casos analizados resultó de 2.80 ± 0.86 s (n= 225 datos). El intervalo de confianza del 95% no incluye las medias del HCM2010 para calles principales de dos carriles e intersecciones de tres ramas.

En el campo se ha observado, para volúmenes conflictivos elevados, que la prioridad de los vehículos de la principal se ve limitada por la maniobra de ingreso desde la secundaria, es decir que los vehículos de la corriente principal frenan ante el ingreso de algunos de los vehículos de la calle secundaria. A volúmenes cercanos a la capacidad los conductores de las corrientes conflictivas “comparten” prioridades.

La determinación de la capacidad ajustada se basa en el modelo de aceptación de intervalos y se determinó en base al intervalo crítico local y el valor de intervalo de seguimiento mencionado. La relación existente entre la capacidad encontrada y el volumen conflictivo resulta exponencial dada por la Ecuación 21.

$$C_{p,x} = 1286e^{-0.000936v_{c,x}} \quad (21)$$

El aumento de capacidad que se encuentra en las condiciones locales (debido a la reducción del intervalo crítico y de seguimiento) produce un impacto porcentual cada vez mayor a medida que el flujo conflictivo aumenta. Si bien las curvas tienden a acercarse la diferencia porcentual es mayor. Por lo cual se hace necesaria la corrección local en los intervalos críticos y de seguimiento para estimar capacidades según la metodología del HCM2010. Para un volumen conflictivo de 1500 vehículos por hora (representativo de las condiciones analizadas en este trabajo) la capacidad del acceso secundario con los parámetros de cálculo del Manual es de 256 vehículos por hora y con las correcciones aquí propuestas el valor se eleva a 345 vehículos por hora, que representa un incremento del orden del 35%.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que los modelos utilizados en todo estudio deben ser ajustados a la realidad local para poder reflejar el verdadero comportamiento de los conductores, que es una de las variables clave en cualquier tipo de modelización donde interviene el ser humano.

Dado que lo desarrollado se ha limitado al estudio de un caso particular, resulta recomendable extender las investigaciones para otros movimientos (giros a la derecha y pasantes desde la secundaria y giros a la izquierda desde la principal) y para otras condiciones geométricas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la SECYT UNC por el apoyo brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Akcelik, R. (2007) A review of Gap-Acceptance Capacity Models. 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research . University of South Australia. Adelaide. Australia.

Brilon, W, N. Wu (2002) Unsignalized Intersections. A Third Method For Analysis. Published In Taylor, A.P. (ed.): Transportation and Traffic Theory in the 21st Century, Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory Pergamon, Elsevier Science Ltd., New York, Tokyo, Oxford.

Brilon, W., R. König, R. Troutbeck (1997) Useful Estimation Procedures for Critical Gaps.- Proceeding of Third Int. Symposium on Intersections Without Traffic Signals, Portland, Oregon, USA.

Brilon, W., M. Thorsten (2005) Capacity at Intersections without Traffic Signals. TRB – ISSN 0361 1981 – pages 32-40.

Depiante, V. (2011) Giros a la izquierda en intersecciones no semaforizadas. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería–Mención Transporte-. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Kyte, M., Z. Tian, Z. Mir, Z. Hameedmansoor, W. Kittelson, M. Vandehey, B. Robinson, W. Brilon, L. Bondzio, N. Wu, R. Troutbeck, (1996) Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections. Final Report: Volume 1 – Two Way Stop-Controlled Intersections. National Cooperative Highway Research Program 3-46.

Luttinen, T. (2003) Capacity at Unsignalized Intersections. TL Consulting Engineers, Ltd. Lahti . TL Research Report No 3. ISBN 952-5415-02-3, ISSN 1458-3313.

Luttinen, T. (2006) Capacity and Level-of-Service Estimation in Finland. Fifth International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service - Yokohama, Japan.

NCHRP Report 572 (2007) Roundabouts in the United States. National Cooperative Highway Research Program. TRB of the National Academies.

Raff, M. S. y J. W. Hart (1950) A Volume Warrant for Urban Stop Sign. Traffic Engineering and Control, 5/1983, pp.255-258.

Ruskin H. y R. Wang (2002) Modeling Traffic Flow at an Urban Unsignalized Intersection. School of computer applications, Dublin City University, Ireland - PMA Sloot et al (Eds): ICCS 2002, LNCS 2329, pp. 381-390.

Tian Z., M. Vandehey, B. Robinson, W. Kittelson, M. Kyte, R.Troutbeck, W. Brilon, N. Wu (1999) Implementing the maximum likelihood methodology to measure a driver's critical gap. Transportation Research Part A 33 p 197-197

Tian Z., R. Troutbeck, M. Kyte, W. Brilon, M. Vandehey, W. Kittelson, and B. Robinson (2001) A Further Investigation on Critical Gap and Follow-Up Time.

TRB (2010) Highway Capacity Manual (HCM). Chapter 19: Two Way STOP Controlled Intersections, Washington, D.C.

Troutbeck R. (1992) Estimating the critical acceptance gap from traffic movements. Physical Infrastructure Centre Research Report 92-5, Queensland University of Technology, Brisbane Australia

Troutbeck R. and S. Kako (1999). Limited Priority merge at unsignalized intersections-TRBA33 p291-304

Troutbeck, R.; W. Brilon (1996) Unsignalized Intersection Theory. Chapter 8. Página de internet: <http://www.tfhrc.gov/its/tft/chap8.pdf>.

Wang R., W. Zhang and Q. Miao (2005) Effects of Driver Behavior on Traffic Flow at Three-lane Roundabouts. International Journal of Intelligent Control and Systems - Vol. 10, no. 2, June, 123-130.

Weinert, A. (1999) Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany. Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity- pages 409-421.