

# **CAPACIDAD EN INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS DE TRES RAMAS**

Violeta Depiante

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales  
Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Jorge Galarraga

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales  
Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

## **RESUMEN**

El análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas de una calle con prioridad y una regulada por dos señales de pare, se basa en una cabal caracterización y entendimiento de la interacción entre dos corrientes de tránsito conflictivas. El presente trabajo tiene el objetivo de estimar la capacidad en condiciones locales mediante modelos teóricos y mediciones in situ. Se utiliza la metodología propuesta en el Manual de Capacidad de Carreteras 2010 para giros a la izquierda desde la calle secundaria de una intersección de tres ramas, considerando el cruce en una y dos etapas. 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%.

## **ABSTRACT**

Capacity analysis at two way stop intersections relies on a clear understanding and characterization of the interaction between two conflicting traffic movements. Different capacity estimation models and field capacity estimations for local conditions are addressed in this paper. The methodology proposed in the 2010 Highway Capacity Manual for minor left turning vehicles at T intersection considering one and two stages is used. Capacity for the minor left turn for a conflicting volume of 1500vph (representative of the data analyzed here) with the base parameters proposed in the 2010 Highway Capacity Manual results in 256 vehicles per hour while considering corrections for local conditions this value reaches 345 vehicles per hour. This represents an increase in capacity in the order of 35%.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas de una calle principal con prioridad y una secundaria regulada por dos señales de pare, se basa en una cabal caracterización y entendimiento de la interacción entre dos corrientes de tránsito conflictivas (Kyte et al., 1996; Troutbeck y Brilon, 1996). En las intersecciones a desnivel los movimientos de cruce se separan en el espacio es decir verticalmente, en las intersecciones semaforizadas se separan en el tiempo, en cambio en las intersecciones no semaforizadas cada conductor debe encontrar un momento seguro para ejecutar el movimiento deseado mediante la observación de la circulación del tránsito, las señales y las prioridades pertinentes para utilizar un espacio común.

El conductor en una intersección no semaforizada debe enfrentarse a dos cuestiones básicas: (1) la de decidir cuando debería ingresar a la intersección porque le corresponde y (2) la de definir el momento en que resulta seguro hacerlo. Según Raff (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 entre éstos 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 secundario. Por lo tanto las variaciones en el comportamiento de los conductores en un determinado lugar y entre diferentes localizaciones tienen una significación importante en la determinación de la capacidad de una intersección no semaforizada.

El comportamiento del conductor es una variable que mayormente afecta la operación en una intersección no semaforizada y por lo tanto se hace necesario la calibración para tener en cuenta el comportamiento local y cambios temporales para realizar estimaciones de capacidad acertadas (NCHRP 572, 2007). El Manual de Capacidad de Carreteras 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: TWSC) en correspondencia con el funcionamiento de intersecciones de una calle principal con una secundaria existente en nuestra realidad; definiendo la capacidad para cada movimiento en la intersección bajo condiciones de circulación de Estados Unidos de Norteamérica.

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, se planteó como objetivo la estimación de la capacidad en condiciones locales, para el giro a la izquierda desde la calle secundaria en una intersección de tres ramas, tanto mediante modelos teóricos como con mediciones específicas in situ, considerando el cruce en una y dos etapas.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Estudios de intersecciones no semaforizadas**

La mayoría de los procedimientos de análisis de capacidad en las intersecciones no semaforizadas se basan en modelos estocásticos como lo es por ejemplo 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 Suizo 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.

El Manual de Capacidad (TRB, 2010) en su Capítulo 19 trata las intersecciones no semaforizadas basado en el método de aceptación de intervalos y propone una metodología de determinación de capacidad con parámetros ajustados al comportamiento de los conductores para su realidad.

## 2.2. Modelos de capacidad teórica

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 ( $t_c$ ). De acuerdo al modelo de comportamiento normalmente utilizado, 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 si se presenta un intervalo muy largo en la corriente principal, 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. La exactitud en 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., 1996) mientras que el intervalo crítico no se puede medir en forma directa en campo, lo que sí se puede registrar es el intervalo de aceptación.

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:  $3600 \cdot v_p \cdot f(t)$  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  $3600 \cdot v_p \cdot f(t) \cdot g(t)$ . 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

$$c_n = v_p \int_0^t f(t)g(t)dt \quad (1)$$

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 1 considerando para  $f(t)$  una distribución exponencial negativa dada por la Ecuación 2 y para  $g(t)$  una función escalonada constante dada por la Ecuación 3, se obtiene la formulación de Harders que permite obtener la fórmula de capacidad dada por la Ecuación 6.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$g(t) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(t) \quad (3)$$

donde:

$\lambda$  : 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 4:

$$P_n(t) = \begin{cases} 1, & t_c + (n-1)t_f < t < t_c + nt_f \\ 0, & \text{para todo otro valor de } t \end{cases} \quad (4)$$

y resolviendo:

$$c = v_p \int_0^{\infty} f(t)g(t)dt \quad (5)$$

se obtiene:

$$C_n = v_p \frac{e^{-v_p t_c}}{1 - e^{-v_p t_f}} \quad (6)$$

Resolviendo la integral de la Ecuación 1 considerando para  $f(t)$  una distribución exponencial negativa y para  $g(t)$  una función lineal se obtiene la formulación de Siegloch para estimar la capacidad dada en la Ecuación 7.

$$C_n = \frac{1}{t_f} e^{-v_p t_0} \quad (7)$$

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 8. Puede advertirse que emplea el ya citado modelo de Harders de la Ecuación 6, expresando el flujo de la calle principal en vehículos por hora (vph).

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-\frac{v_{c,x} t_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,x} t_{f,x}}{3600}}} \quad (8)$$

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:

$$c_{p,x} = \frac{3600}{t_{f,x}} e^{-\left(\frac{t_{c,x}-t_{f,x}/2}{3600}\right)v_{c,x}} \quad (9)$$

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

$$c_{p,x} = Ae^{-Bv_{c,x}} \quad (10)$$

siendo:

$$A = \frac{3600}{t_{f,x}} \quad (11)$$

$$B = \frac{t_{c,x}-t_{f,x}/2}{3600} \quad (12)$$

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:

$$c_{p,x} = 1029e^{-0.00129v_{c,x}} \quad (13)$$

### 2.3. 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 14 para estimar la capacidad en condiciones no saturadas. La formulación es la siguiente:

$$c_m = \frac{3600}{t_s + t_{mv}} \quad (14)$$

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.

### 3. CASO DE APLICACIÓN

#### 3.1. Descripción del caso y relevamiento de datos

La intersección en T seleccionada se encuentra ubicada en la zona sur de la ciudad de Córdoba, Figuras 1 y 2, ubicada sobre una de las vías de egreso del centro de la ciudad corresponde al cruce de Avenida Cruz Roja Argentina (paralela y adyacente a la línea de FFCC, de oeste a este) y Avenida Nores Martínez (de norte a sur y que presenta un desvío hacia la intersección en cuestión). 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 realizado desde un acceso secundario, de un solo carril y un único movimiento. Esto le permite reingresar a la Avda. Nores Martínez mediante un giro a la derecha posterior y el cruce del FFCC. La solución implementada en este cruce ha sido la de separar espacialmente (desviar) una de las corrientes y simplificar el cruce al de una calle principal y un acceso de un único carril secundario.



**Figura 1:** Vista de la intersección seleccionada



**Figura 2:** Mapa de la intersección seleccionada

La Avda. Cruz Roja Argentina en ese sector, funciona como una arteria de un carril funcional por sentido con un pequeño cordón divisorio (medio carril adicional) 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. Esta situación abre la posibilidad de que el movimiento sea analizado como un cruce en una o dos etapas.

Los conductores son asiduos usuarios. 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. La posibilidad de contar con mucha información respecto de una situación en particular permite obtener conclusiones robustas respecto del comportamiento de los conductores. Por lo tanto, la elección de esta intersección responde singularmente a los objetivos planteados en el sentido de estudiar la capacidad para condiciones base especificadas en el HCM2010 sin y con correcciones por cruce en etapa. El giro a la izquierda para el tránsito circulando por el acceso norte sur hacia el este es particularmente interesante debido a la prácticamente permanente existencia de ingresos desde la secundaria que generan colas de diversas longitudes a lo largo del día y a la existencia de ingreso por carril único. A su vez la circulación desde ambos accesos sobre la calle principal y sobre el mismo acceso por la secundaria presenta llegadas en forma aleatoria.

Para la recolección de datos se realizaron filmaciones en días laborables en horarios de mayor movimiento vehicular entre las 17:30 y las 20:30 hs. 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 la estimación de la capacidad en los períodos en que se observaron colas en la calle secundaria se registraron tiempos: (1) de llegada a la línea de parada del vehículo desde la calle secundaria, (2) tiempo de egreso del mismo, (3) tiempo desde que el primer vehículo abandona la línea de parada y el segundo llega a la primera ubicación (4) tiempos de paso de los vehículos de la principal por una línea de referencia ubicada en la esquina, (5) cantidad de vehículos que ingresan desde la calle secundaria a la principal en el periodo considerado (tasa de descarga) y (6) cantidad de vehículos por unidad de periodo que ingresan a la intersección por los accesos principales (volumen conflictivo al movimiento).

### 3.2. Estimación de la capacidad en intersección en T

#### 3.2.1. Modelos teóricos para cruce en una etapa

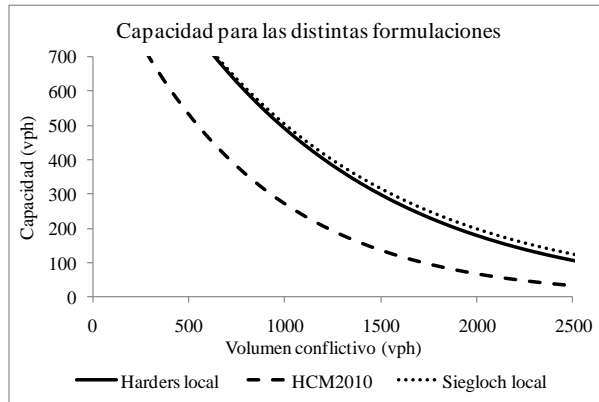
Mediante estudios de campo en la misma intersección (Depiante, 2011) se estimaron intervalos críticos y de seguimiento, obteniéndose para el intervalo crítico  $t_c = 4.77 \pm 1.35$  s (con 308 datos) y para el tiempo de seguimiento  $t_f = 2.80 \pm 0.86$  s (con 225 datos). Empleando estos valores en los modelos ya expuestos en el punto 2.2, se obtienen las Ecuaciones 15 (Harders/HCM2010) y 16 (Siegloch/NHCRP2007).

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-0.001325v_{c,x}}}{1 - e^{-0.000778v_{c,x}}} \quad (15)$$

$$c_{p,x} = 1286e^{-0.000936v_{c,x}} \quad (16)$$

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.

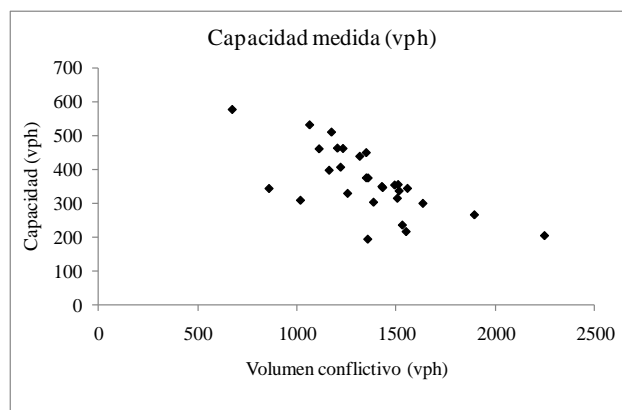
Los resultados obtenidos, tanto con la ecuación de Harders como con la de Siegloch son prácticamente iguales como puede apreciarse en la Figura 3. Además la citada Figura muestra la comparación con la formulación del HCM 2010, Ecuación 13, con la cual las capacidades obtenidas resultan considerablemente menores.



**Figura 3:** Comparación de formulaciones de Harders y Siegloch para valores de intervalos locales y HCM2010 para sus valores base

### 3.2.2. Estimación de 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 1 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 4 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 5 resume los resultados obtenidos para los modelos y los valores encontrados de capacidad en campo.

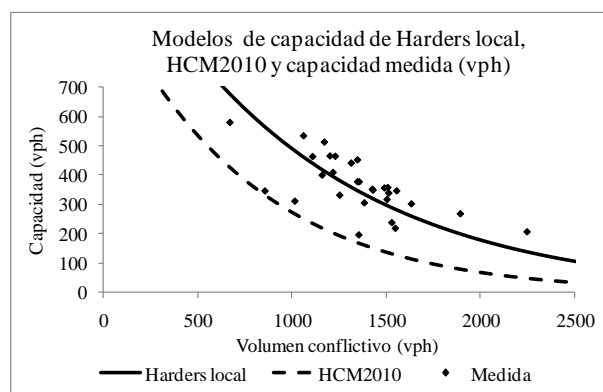


**Figura 4:** Diagrama de dispersión de capacidad vs. volumen conflictivo



**Tabla 1:** 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 5:** Capacidades modeladas y medidas, cruce en una etapa

### 3.2.3. Análisis considerando cruce en dos etapas

La intersección en estudio constituye un caso particular de cruce en etapas, según ha sido mencionado en la descripción del caso en estudio. En el punto 3.2.1 se ha estimado la capacidad empleando modelos teóricos correspondientes a cruces en una etapa. El HCM2010 para cruces en dos etapas propone una formulación basada en una combinación de las capacidades de cada una de las etapas, las cuales deben calcularse con un intervalo crítico menor al del cruce sin etapas (según el HCM2010 se debe restar 1 segundo). Según la metodología debemos calcular el factor de ajuste “a” y la variable intermedia “y” con las Ecuaciones 17 y 18.

$$a = 1 - 0.32e^{-1.3\sqrt{m}} \quad (17)$$

$$y = \frac{c_I - c_{m,x}}{c_{II} - v_L - c_{m,x}} \quad (18)$$

donde:

$m$  : cantidad de lugares disponibles de almacenamiento en la bahía (en este caso uno)

$c_I$  : capacidad de la primera parte del cruce (vph)

$c_{II}$  : capacidad de la segunda parte del cruce (vph)

$c_{m,x}$  : capacidad del cruce considerando cruce directo en una etapa (vph)

$v_L$ : volumen de giro (a la izquierda) desde la principal que ingresa a la bahía (en este caso nulo)

Estas variables intermedias permiten determinar la capacidad en dos etapas, mediante dos ecuaciones distintas, Ecuaciones 19 y 20, según sea el valor de la variable intermedia “y” igual o no a la unidad (primera y segunda respectivamente) y son válidas siempre que la diferencia entre la capacidad de la segunda parte y el volumen de giro a la izquierda desde la calle principal sea positiva (Kyte et al., 1996, Brilon y Wu, 2003).

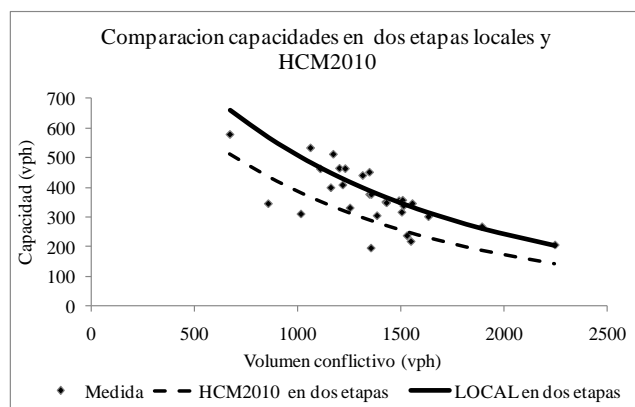
$$c_T = \frac{a}{y^{m+1} - 1} \left[ y(y^m - 1)(c_{II} - v_L) + (y - 1)c_{m,x} \right] \quad (19)$$

$$c_T = \frac{a}{m + 1} \left[ m(c_{II} - v_L) + c_{m,x} \right] \quad (20)$$

Estos resultados se basan en la igualación de ingresos y egresos máximos en la bahía donde se considera un sistema de colas con probabilidades de ocurrencia de eventos los cuales contribuyen a la capacidad de cada una de las partes que conforman luego la capacidad global en dos etapas.

Mediante el uso de la formulación del HCM2010 en la estimación de la capacidad del cruce en dos etapas se trató de determinar el intervalo crítico sin etapas que daba el mejor ajuste posible.

Para ello se empleó un procedimiento por tanteos, considerando el valor de intervalo crítico local más un tiempo variable hasta obtener un ajuste razonable con la fórmula de capacidad en dos etapas. Ese valor de corrección resultó de 1.2s. La Figura 6 muestra la comparación de la curva de capacidad en dos etapas para condiciones locales con la formulación correspondiente al HCM2010 y los valores encontrados de capacidad en campo.



**Figura 6:** Capacidades modeladas y medidas, cruce en dos etapas

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La intersección estudiada presenta un espacio mínimo de canalización del giro a la izquierda que algunos vehículos emplean para efectuar el cruce en etapas. En consecuencia los resultados obtenidos deben considerarse aplicables exclusivamente al caso de estudio o una intersección similar.

La determinación de la capacidad ajustada sin etapas se basa en el modelo de aceptación de intervalos y se determinó en base al intervalo crítico local calculado con el método de máxima verosimilitud siendo el valor utilizado de  $4.77 \pm 1.35s$  (308 datos) y el valor de intervalo de seguimiento utilizado resultante del promedio de los casos analizados de  $2.80 \pm 0.86s$  (225 datos).

Considerando el cruce en una etapa, la relación existente entre la capacidad encontrada y el volumen conflictivo resulta exponencial dada por la Ecuación 21.

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

Además, para el caso de estudio, considerando que funciona como cruce en dos etapas, el valor del intervalo crítico sin etapas debe incrementarse en 1,2 segundos para emplear la formulación propuesta en el HCM 2010.

Se hace necesaria la corrección local en los intervalos críticos y de seguimiento para estimar capacidades según la metodología del HCM2010. 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.

Para un volumen conflictivo de 1500 vehículos por hora (representativo de las condiciones analizadas en este trabajo) la capacidad de la secundaria para el giro a la izquierda de una intersección en T, con la fórmula que propone el HCM2010 en dos etapas es de 256 vehículos por hora y con las correcciones aquí propuestas el valor se eleva a 345 vehículos por hora, lo 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* – 29<sup>th</sup> Conference of Australian Institutes of Transport Research – University of South Australia. Adelaide. Australia.
- BRILON, W, WU, N (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, WU, N (2003) - *Two-Stage Gap Acceptance: Some Clarifications* - *Transportation Research Record No. 1852, Traffic Flow Theory and Highway Capacity 2003*. p. 26-31 - ISSN: 0361-1981
- BRILON, W.; THORSTEN, M. (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 en Transporte. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- KYTE, M.; TIAN, Z.; MIR, Z.; HAMEEDMANSOOR, Z.; KITTELSON, W.; VANDEHEY, M.; ROBINSON, B.; BRILON, W.; BONDZIO, L.; WU, N.; TROUTBECK, R. (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 HART, J. W. (1950). *A Volume Warrant for Urban Stop Sign. Traffic Engineering and Control* , 5/1983, pp.255-258.
- RUSKIN H. y WANG R. (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
- TRB (2010). – *HCM2010 Highway Capacity Manual* – Volume 3: Interrupted Flow – Chapter 19 – Two Way Stop Controlled Intersections - TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- TROUTBECK, R.; BRILON, W. (1996) - *Unsignalized Intersection Theory. Chapter 8* - Página de internet : <http://www.tfhrc.gov/its/tft/chap8.pdf>.

---

Violeta S. Depiante (vdepiante@yahoo.com)

Jorge J. Galarraga (jorgala@efn.uncor.edu)

Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención en Transporte. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

Av. Velez Sarsfield 1600 – Córdoba, Argentina.