

# MODELACIÓN DE IMPACTOS SOBRE EL TRÁNSITO MOTORIZADO PARA MEJORAR LA MOVILIDAD PEATONAL

**Marcelo Herz, Jorge Galarraga y Rinaldo Rigazio**

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba (F.C.E.F.yN.-U.N.C)  
Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria. X5016GCA. Córdoba, Argentina. Correos electrónicos:  
[mherz@efn.uncor.edu](mailto:mherz@efn.uncor.edu); [jorgala@efn.uncor.edu](mailto:jorgala@efn.uncor.edu); [rrigazio@yahoo.com.ar](mailto:rrigazio@yahoo.com.ar)

## RESUMEN

Las redes viales urbanas tienen calles con demandas de movilidad que al mismo tiempo son lugares con demandas de accesibilidad. Para fortalecer la función de lugar debe priorizarse la movilidad peatonal sobre el tránsito motorizado, pero evitando configurar un cuello de botella congestionado que deteriore el sitio. Esta restricción requiere herramientas de evaluación de desempeño del tránsito vehicular capaces de cuantificar diferencias entre las situaciones “sin proyecto” y “con proyecto”.

El caso de estudio es una intersección con 6 ramas en la confluencia de tres arterias principales del centro de la ciudad de Córdoba (Argentina), en la cuál a partir del interés de revalorizar la escala humana y urbanística del sector surge un proyecto de ampliar veredas y materializar una mini isleta con una fuente en el encuentro de los ejes de estas arterias. Dada la importancia de la intersección y considerando el aumento de restricciones a la ya complicada circulación vehicular en el nudo, era necesaria una evaluación confiable de cómo operaría el tránsito vehicular con la nueva geometría. Para la evaluación se empleó el modelo microscópico de simulación NETSIM. Se describe el proceso de modelación de la red en la situación original y con proyecto, reportando la comparación entre ambas situaciones, detallando las conclusiones y recomendaciones relacionadas al uso de estas técnicas para evaluación de impactos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las mejoras de movilidad y accesibilidad peatonal en zonas con densos tránsitos vehiculares que también son espacios urbanos de encuentros, requiere ampliar las áreas de uso peatonal y acortar los cruces de calzadas, en una clara reversión de la tendencia del siglo XX que reducía veredas y eliminaba plazas para dar más espacios a los vehículos motorizados.

Las calles funcionan como un conducto para desplazarse (link) y también como destino para las actividades del lugar (place), lo cual requiere una expresa consideración de la movilidad peatonal, y requieren un tratamiento integrado con medidas de desempeño que reflejen todas las demandas. (Jones et al.,2008).

El transporte sustentable requiere encontrar soluciones de infraestructura y operación que en zonas de conflictos prioricen la función de arco o la función de lugar, con las consecuencias urbanísticas que de esa definición se deriven en cada caso. Para fortalecer la función de lugar, debe priorizarse la movilidad peatonal sobre el tránsito motorizado, y dentro de esta categoría debe priorizarse el transporte masivo sobre el individual, pero

siempre sujeto a la restricción de no configurar un cuello de botella congestionado que deteriore el sitio. Esta restricción requiere herramientas de evaluación de medidas de eficiencia del tránsito vehicular capaces de cuantificar diferencias entre las situaciones “sin proyecto” y “con proyecto”.

El caso de estudio es una intersección con 6 ramas en la confluencia de tres arterias principales del centro de la ciudad de Córdoba (Argentina), en la cuál a partir del interés de revalorizar la escala humana en la zona, se proponen reasignaciones de espacios.

Para avanzar en la movilidad sustentable en ambientes urbanos adquiere gran relevancia la creación de infraestructuras que favorezcan e incentiven el tránsito no motorizado. Ante el interés de proporcionar a los peatones del sector circulaciones y cruces más seguros, y de establecer un hito urbanístico en el encuentro de los ejes de estas arterias, surge el proyecto de ampliar cancheros centrales y ubicar una fuente de agua en una isleta elipse central, implicando un obstáculo en la ya complicada circulación vehicular del sector. Dado el carácter irreversible de las obras físicas, era necesaria una evaluación confiable de cómo operaría el tránsito vehicular con la nueva geometría del nudo, surgiendo como herramienta idónea la modelación del tránsito con simulación microscópica estocástica.

El presente trabajo reporta el abordaje de la modelación de impactos en el tránsito motorizado con el modelo de simulación NETSIM. Se efectúa en primer lugar una breve descripción del modelo de simulación empleado. Luego se describe la situación sin proyecto en la red modelada, incluyendo el relevamiento de la información necesaria y la calibración del modelo. Posteriormente se describe el análisis de la situación con proyecto, indicando los cambios efectuados en la simulación. Finalmente se reporta la comparación entre ambas situaciones, detallando las conclusiones y recomendaciones pertinentes

## **2. PRESENTACIÓN DEL CASO**

La intersección de Avenida Vélez Sarsfield, el Boulevard San Juan y la Avenida Hipólito Irigoyen constituye la confluencia de tres arterias principales en el microcentro de la ciudad de Córdoba. En el sector se ubicaba desde 1897 una plaza circular conocida como Plaza Vélez Sarsfield, con el monumento al autor del Código Civil Dr. Dalmacio Vélez Sarsfield en el centro y las edificaciones con frente circular de acuerdo con la trama de la plaza, según muestra la Figura N°1.

En 1970, para favorecer el tránsito vehicular, se demolió la plaza trasladando el Monumento a la plazoleta triangular de la esquina Sureste, y se pavimentó el espacio como intersección canalizada semaforizada (Boixados, 2013). Con el desarrollo de importantes actividades comerciales y recreativas que incluyen un Centro Comercial en la esquina Noreste de la intersección, creció el tránsito peatonal en un ambiente de fricciones para los trayectos de cruce, veredas estrechas y calles con frecuente congestión vehicular, tanto en días hábiles como en fines de semana. (Figura N°2).



Figura N° 1: Antigua Plaza Vélez Sarsfield



Figura N° 2: Intersección en estudio.

La confluencia de estas arterias importantes, el nivel de congestión en que operan frecuentemente, el intenso volumen peatonal y su particular diseño geométrico lo convierte en una zona difícil de estudiar por los métodos convencionales de cálculos de capacidad y nivel de servicio (TRB 2010, May 1990). La Figura N° 3 muestra la diversidad de movimientos de la intersección, en donde se destaca una importante cantidad de líneas de transporte público que accediendo por Av. Vélez Sarsfield deben girar a la izquierda hacia Bv. San Juan o Av. H. Irigoyen.

A partir del interés de revalorizar la escala humana y urbanística del sector surge un proyecto de materializar una isleta con una fuente en el encuentro de los ejes de estas arterias, modificar la geometría de las calzadas con la ampliación de las veredas y cancheros centrales en detrimento de anchos de calzada de algunos accesos, y reformular las canalizaciones y los cruces peatonales protegidos con semáforos para dotar de un ambiente amigable a la circulación peatonal, según bosquejo de la Figura N° 4.

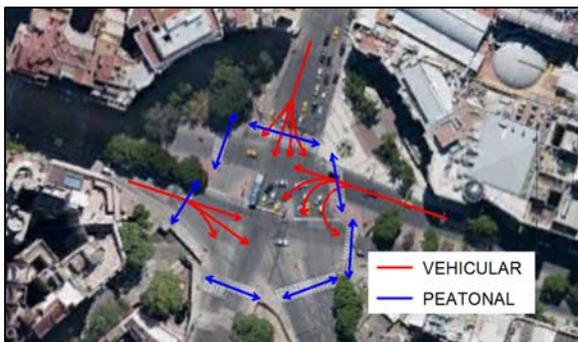


Figura N° 3 – Movimientos de la intersección



Figura N° 4 – Proyecto de ampliación de espacios peatonales y fuente

### 3. MODELO DE SIMULACIÓN APLICADO

El requerimiento de verificar la viabilidad de la intersección con las remodelaciones propuestas respecto de la operación del tránsito de vehículos livianos y de ómnibus se abordó con modelación microscópica.

Para la evaluación se empleó el modelo de simulación NETSIM, integrado al software TSIS (Mc Trans Center ,2010), que incluye herramientas para edición TRAFED, para simulación CORSIM, para animación TRAFVU y otras. El modelo de simulación CORSIM es un paquete integrado por dos modelos microscópicos: uno de tránsito urbano, NETSIM (Network Simulation) y otro de tránsito en autopistas, FRESIM, (Freeway Simulation). Ambos modelos pueden ser corridos en forma conjunta, representando redes en las que el tránsito puede pasar de calles urbanas (flujo interrumpido) a autopistas y rutas (flujo ininterrumpido). En este caso que comprende exclusivamente una red de arterias y calles urbanas se empleó el modelo de simulación NETSIM. El mismo desarrolla la simulación basada en intervalos, la posición de cada vehículo, cada instrumento de control variable tal como las señales de tránsito y cada evento se actualizan cada segundo. Los vehículos están identificados por categoría ya sea, auto, camión, ómnibus, y por tipo (hasta nueve diferentes tipo de vehículos que difieren en operación y características de performance se pueden especificar), además también la característica del comportamiento del conductor (ya sea pasivo o agresivo) se puede asignar a cada uno de los vehículos. Los movimientos de giro se asignan estocásticamente como así también las velocidades de flujo libre, los intervalos de descarga de las colas y otros atributos de comportamiento. Como resultado cada comportamiento vehicular se puede simular para poder reflejar el proceso real, cada vez que se mueve un vehículo su posición tanto lateral como longitudinal en el arco y su relación con otros vehículos cercanos se recalcula, así como su velocidad aceleración y estado.

Los semáforos y la interacción entre los vehículos y colectivos se modelan explícitamente. Los vehículos se mueven de acuerdo a una lógica de seguimiento y responden a los controladores de tránsito y a otras demandas, por ejemplo los colectivos deben prestar servicios en las paradas a los pasajeros, por lo tanto sus movimientos son distintos de los vehículos particulares.

La congestión puede resultar en colas que se extiendan a lo largo del arco y bloqueen la intersección que está corriente arriba impidiendo así el flujo de tránsito. También el tráfico de peatones puede demorar los movimientos de giro en las intersecciones. El modelo cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario animar el tráfico, o sea ver en la pantalla la intersección y cada uno de los vehículos en movimiento, lo cual facilita mucho el trabajo con el mismo. (Mc Trans Center ,2010).

#### 4. SITUACIÓN SIN PROYECTO

Se requirió caracterizar la dimensión espacial y temporal de la simulación, para lo cual se identificaron los arcos y nodos con influencia en el área de interés, y se identificó la hora pico representativa de la semana. Dado que los semáforos de cada intersección se encuentran coordinados con los correspondientes a las esquinas corriente arriba, resultó necesario incluir los arcos de acceso. Por otra parte, debido a la lógica del modelo, en los arcos de entrada a la red no pueden imponerse dispositivos de control (señales de ceda el paso, de pare o semafóricas) y tampoco son calculadas en los mismos las medidas de eficiencia. Por ello se agregaron como entradas arcos adicionales a los correspondientes al área a modelar. La Figura N° 4 muestra la ubicación de la red simulada superpuesta a una imagen satelital



Figura N°4 - Ubicación de la Red Modelada

Aunque para la lógica del modelo, cada arco corresponde a una cuadra y cada nodo a una esquina deben también considerarse arcos a las calles de ingreso/egreso a cocheras y nodos a los ingresos a las mismas. Es de especial interés por su localización cercana al hito, y por su magnitud la correcta caracterización de la playa de estacionamiento del Centro Comercial Patio Olmos ubicada sobre Bv. San Juan. Así también, debido a que las decisiones estocásticas de giros en intersecciones son tomadas al iniciar el arco correspondiente, resultó necesario para simular un comportamiento del tránsito comparable con el real la incorporación de intersecciones ficticias dentro de un mismo arco real a fin de disponer de mayores opciones a la hora de la toma de decisión de giro.

Para que la simulación represente adecuadamente las condiciones de circulación resultó necesario suministrar datos correspondientes a infraestructura (longitudes de arcos y cantidad de carriles funcionales), control (tiempos semafóricos, paradas y líneas de ómnibus) y tránsito (volúmenes y porcentajes de giro).

Con datos del Centro de Control de Tránsito de la Municipalidad de Córdoba se identificó como hora pico de día hábil, la correspondiente a los días viernes en horario de 18 a 19 horas. Quedó definida así la dimensión temporal para la simulación y todos los relevamientos fueron efectuados en tal horario. La Tabla N° 1 muestra los volúmenes de entrada en cada uno de los arcos correspondientes.

Arco N°	Calle	Sentido	Intersección	Veh. Por hora
8007-20	Montevideo	Único	M.T. Alvear (N-S)	898
8008-16	Belgrano	Único	Montevideo	914
8015-8	D. Quirós	Único	Obispo Trejo	614
8017-19	M.T. de Alvear	Sur – Norte	Montevideo	1005
8001-15	Vélez Sarsfield	Único	Duarte Quirós	2128
8011-14	Obispo Trejo	Único	H. Irigoyen	405
8014-24	Bv. San Juan	Este – Oeste	Obispo Trejo	1319
8006-22	Bv. San Juan	Oeste – Este	M.T. Alvear (N-S)	1533
8004-18	M.T. de Alvear	Norte – Sur	Bv. San Juan	921
8111-111	Playa C.C.	Salida	Bv. San Juan	192

Tabla N° 1- Volúmenes de Entrada

También resultó necesario relevar los porcentajes de giro en todas las intersecciones modeladas y los ciclos, fases, repartos de tiempos y desfases de las intersecciones semaforizadas los que fueron colocados de acuerdo a la información obtenida del Centro de Control y la correspondiente verificación de en campo.

Debido a la necesidad de entrecruzar carriles para giros a la izquierda de ómnibus del acceso Av. Velez Sarsfield hacia Bv. San Juan y Av. Irigoyen, del carril, se consideró imprescindible modelar las paradas y líneas de transporte público en toda el área de accesos a la intersección. La posición de cada parada, las líneas que le sirven, los intervalos de esas líneas y las demoras promedio de los tiempos de parada para ascenso y descenso de pasajeros fueron relevadas e incluidas en la red. La Figura N° 5 muestra la red modelada, indicando la designación de los nodos, la ubicación de los semáforos y de las paradas de ómnibus.

Con los datos consignados en el apartado anterior se corrió el modelo y se efectuaron los ajustes necesarios para representar adecuadamente la situación sin proyecto.

Para ello se relevaron volúmenes de tránsito pasantes, formación de colas y uso de carriles en numerosas intersecciones.

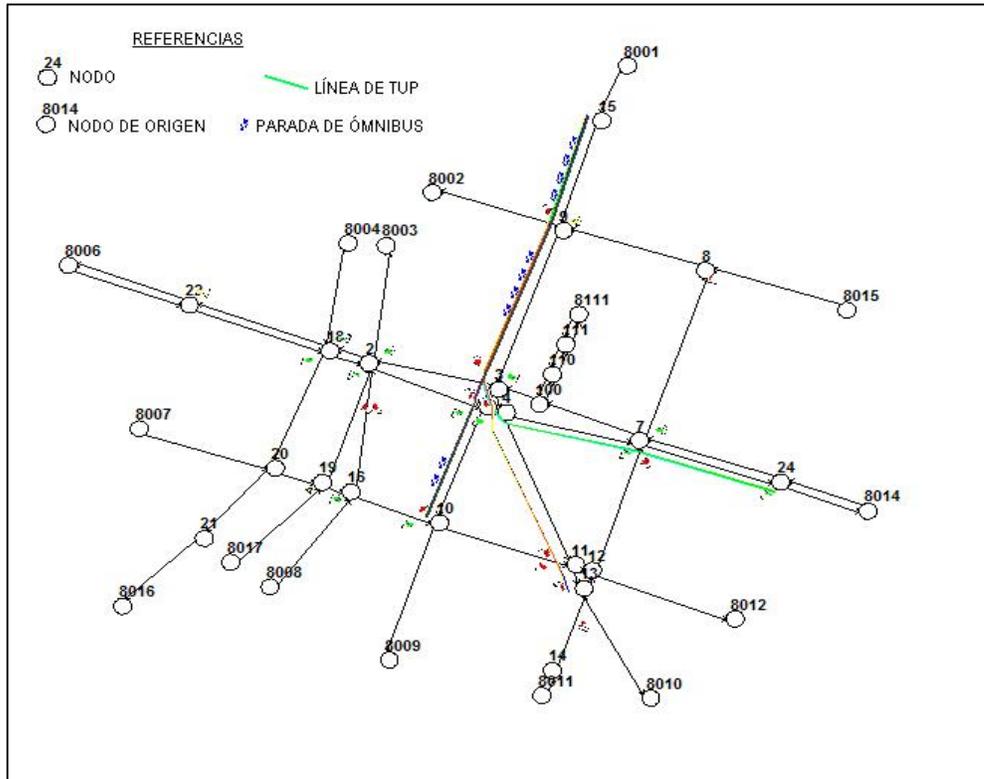


Figura 5 – Esquema de la Red modelada sin proyecto

El modelo permite modificar características de los vehículos, de los conductores y del control. Se variaron parámetros tales como el tiempo perdido en el arranque, el intervalo de descarga y la canalización de los carriles (asignación preferencial de movimientos). Debido a la característica estocástica del modelo, las corridas se realizaron usando distintas semillas de inicialización, y las medidas de eficiencia se determinaron como promedio de los valores obtenidos en cada una de ellas. Una vez que las medidas de eficiencia simuladas resultaron similares a las observadas en campo se consideró razonablemente calibrado al modelo. Con el mismo fin se utilizó la interfaz gráfica, que permite visualizar el estado de congestión en los arcos, especialmente medidas en términos de longitudes de cola.

El modelo reporta una gran cantidad de datos y medidas de eficiencia. Para cada arco calcula, entre otros: los vehículos milla, los viajes, el tiempo en movimiento, el tiempo de demora, el tiempo total, la relación del tiempo en movimiento sobre el total, el promedio de paradas, la ocupación media, la cola promedio y máxima por carril, el número de cambio de carriles, el volumen y la velocidad. Similares estadísticas, en el caso de poder agregarse, se informan también para la red en su conjunto. También suministra medidas de consumo de combustible y emisiones contaminantes. Si bien las mismas corresponden a flotas de vehículos norteamericanos, en términos relativos sirven para identificar el signo y el porcentaje de variaciones entre las alternativas.

La Figura N° 6 muestra una vista de la simulación en la situación sin proyecto. Importantes colas se presentan en los tres accesos a la intersección en estudio. Asimismo se observan demoras importantes en las calles Montevideo y Trejo. Este orden magnitud de las colas fue corroborado en el terreno, validando la calibración

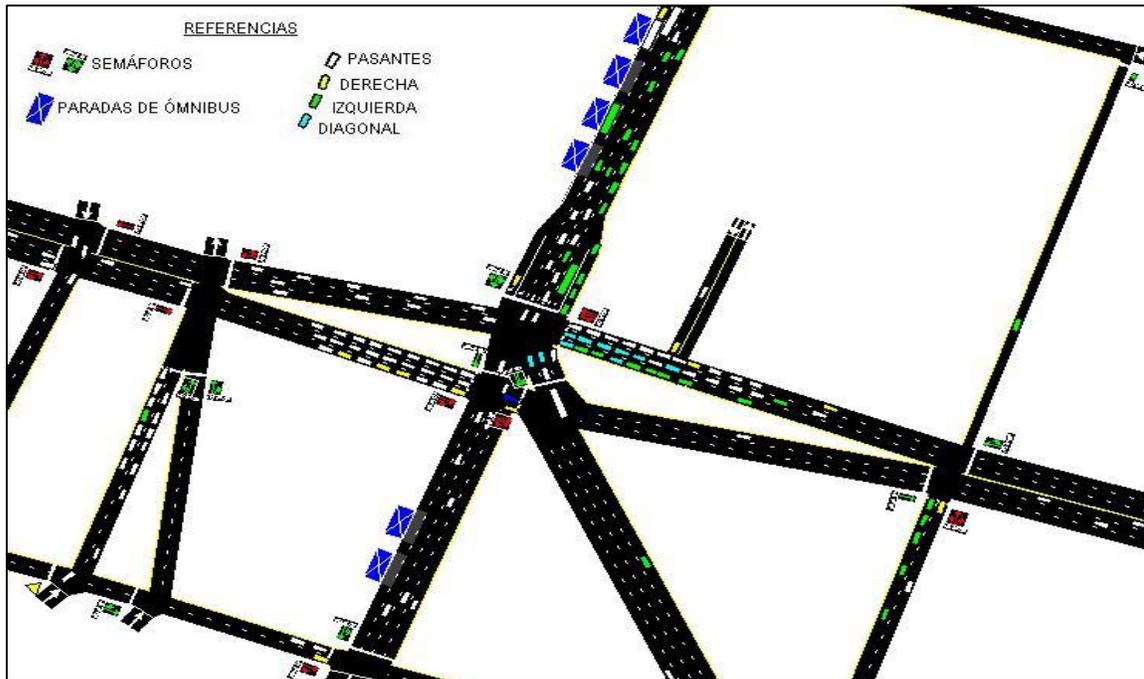


Figura N° 6 - Simulación Situación sin proyecto

## 5. SITUACIÓN CON PROYECTO

Se requirió considerar la modificación necesaria para representar el impacto de la construcción del hito deseado, previsto con una longitud del orden de 35m en el sentido de Av. Vélez Sarsfield y un ancho aproximado de 15m en el sentido de Bv. San Juan. Acorde a esta situación se decidió simular el tránsito pasante por Avenida Vélez Sarsfield circulando por la derecha del hito y al tránsito que gira hacia Avenida Hipólito Irigoyen o Bv. San Juan hacia el este circulando por la izquierda del hito. Se agregaron nuevos nodos a la red para contemplar estas modificaciones. El resto de la red, los volúmenes de entrada, los porcentajes de giro y los tiempos de semáforos se mantuvieron iguales a los de la situación sin proyecto.

Las paradas de ómnibus existentes sobre Av. Vélez Sarsfield entre Duarte Quirós y Bv. San Juan se mantuvieron exclusivamente para los ómnibus que al cruzar Bv. San Juan siguen recto por Avenida Vélez Sarsfield. La Figura N° 7 muestra la red modelada en la situación con proyecto, indicando la designación de los nodos, la ubicación de los semáforos y de las paradas de ómnibus.

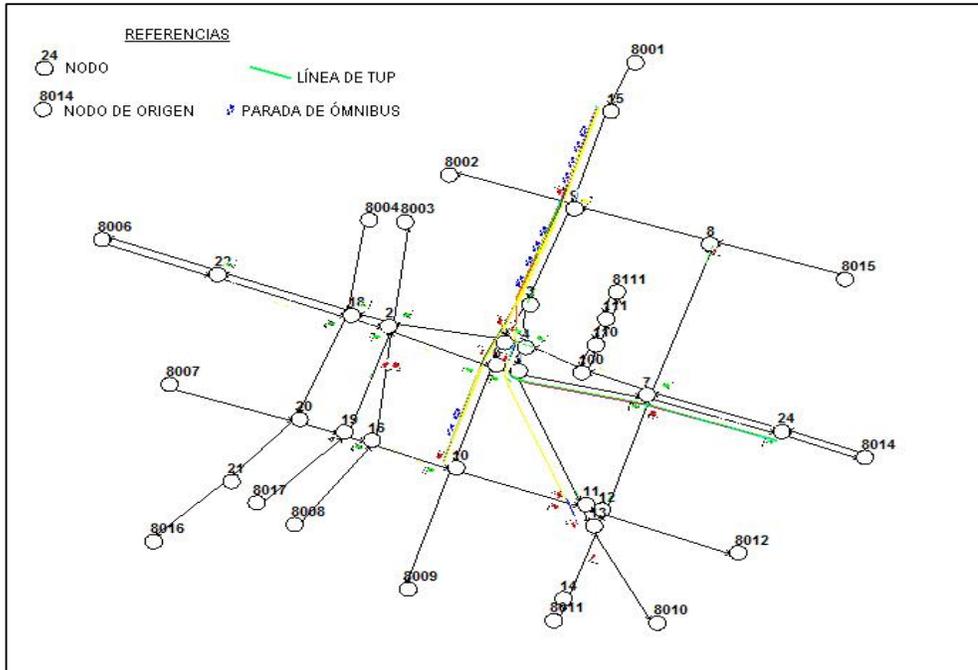


Figura N° 7 - Red Modelada. Situación con proyecto

La Figura N° 8 muestra una vista de la simulación en la situación con proyecto. Puede advertirse que el funcionamiento general de la red es similar al caso base, si bien se advierten algunas mejoras marginales.

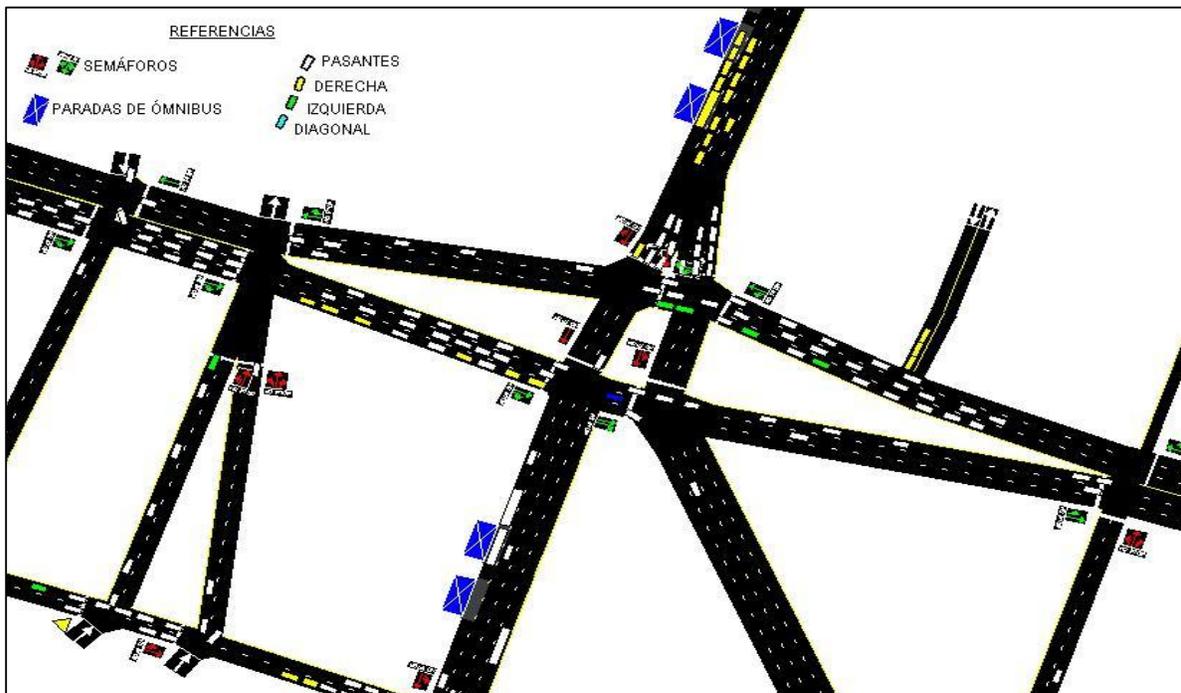


Figura N° 8 - Simulación Situación con proyecto

## 6. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

La Tabla N° 2 resume la información correspondiente a las alternativas sin proyecto y con proyecto, para un tiempo de simulación de diez (10) ciclos semafóricos de 86 segundos.

Parámetro	Unidad	S/Proyecto	C/ Proyecto	Relación CP/SP
Vehículos milla	Millas	476	485	1,019
Vehículos viaje	Viajes	2214	2233	1,009
Tiempo en movimiento	Vehículos hora	16,05	16,34	1,018
Tiempo de demora	Vehículos hora	45,75	40,99	0,896
Tiempo total	Vehículos hora	61,80	57,33	0,928
Relación. Movimiento/Total	Adimensional	0,26	0,28	1,077
Ocupación Media	Vehículos	291,6	259,6	0,890
Cambio de carriles	Número	2419	2513	1,039
Velocidad	Millas p/hora	7,7	8,5	1,104
Auto1 – Consumo Combustible	Millas p/galón	8,18	8,72	1,066
Auto 1- Emisiones HC	Gramos p/ milla	0,33	0,35	1,061
Auto 1- Emisiones CO	Gramos p/milla	24,02	25,05	1,043
Auto 1- Emisiones NOx	Gramos p/milla	1,29	1,34	1,039

Tabla N° 2 - Comparación de Resultados Red sin proyecto y con proyecto.

Con estos resultados pudo concluirse que la implementación del proyecto no produce un impacto significativo sobre las condiciones de circulación de vehículos sin proyecto, lo que viabiliza la remodelación para favorecer a los peatones. Igualmente algunas mejoras de carácter marginal son alcanzables para el tránsito vehicular, si se implementan medidas que faciliten que el tránsito pasante por Av. Vélez Sarsfield circule por la derecha de la fuente (en el sentido del movimiento) y que el tránsito que gira hacia Av. H. Irigoyen o Bv. San Juan hacia el este lo haga por la izquierda de la fuente, para lo cuál se recomendó:

- Retirar de la cuadra de acceso de Av. Vélez Sarsfield las paradas de ómnibus de las líneas que giran a Bv. San Juan (hacia el este) y Av. H. Irigoyen para evitar el trenzado en un tramo muy corto que produce conflicto con los vehículos que siguen por Av. Vélez Sarsfield.
- Suprimir en la cuadra anterior a la cuadra de acceso de Av. Vélez Sarsfield los carriles selectivos de ómnibus, para aumentar la longitud de trenzado de los vehículos particulares que siguen por Av. Vélez Sarsfield.
- Que el ancho de la isleta elipse de la fuente fuera el menor posible para disminuir la inflexión que debe realizar el tránsito circulante por Av. Vélez Sarsfield.

## 7. CONCLUSIONES

Herramientas diseñadas para modelar tránsitos motorizados se han utilizado para un proyecto cuyo objetivo eran las mejoras peatonales, sujeto a verificación del no empeoramiento de las fricciones vehiculares en horas pico. La posibilidad de modelar microscópicamente las maniobras de entrecruzamiento de carriles de autos y ómnibus, así como los movimientos del acceso al estacionamiento subterráneo del Centro Comercial, permitió evaluar la compleja intersección en las situaciones sin y con proyecto. Además de verificar la admisibilidad del proyecto respecto al tránsito vehicular, se pudieron identificar recomendaciones para la geometría de la plazoleta y las paradas de ómnibus.

Desde el punto de vista de aplicación de modelos de simulación microscópicos estocásticos de tránsito, este caso ejemplifica el aporte que pueden realizar a la toma de decisiones, toda vez que el impacto de proyectos físicos que modifican la operación en áreas complejas es difícil de evaluar con otras técnicas. No obstante, la comprensión del contexto local, de las limitaciones del software y la correcta especificación del problema son imprescindibles para que la modelación sea confiable. Con el proyecto implementado (Figura N° 9), aunque no incluyó las modificaciones de paradas de ómnibus, se pudo confirmar el orden de magnitud de las estimaciones de la modelación.

Aunque en el presente caso no fue un limitante del análisis, sería deseable avanzar en modelos que permitan la simulación conjunta de vehículos con los movimientos peatonales, para obtener medidas de desempeño integrales. Esto permitiría evaluar los trade-offs entre facilidades peatonales y vehiculares a proveer en las calles con conflictos entre la función de arco (desplazamiento) y la función de lugar (destino).



Figura N° 9 – Proyecto implementado

## 8. REFERENCIAS

- BOIXADOS, M. Cristina (2013) “ *Plazoleta Velez Sarsfield*”. Colección Memorias de mi plaza. Secretaria de Ambiente de la Municipalidad de Córdoba. Secretaría de Extensión de la FFyH-UNC. Córdoba
- JONES Peter, BOUJENKO N., MARSHALL S. (2008) “ *Link and Place. A Guide to street planning and design*” Landor Publishing, Londres
- MAY, Adolf (1990). “*Traffic Flow Fundamentals*” - Prentice Hall, New Jersey.
- Mc TRANS CENTER (2010) – “*Traffic Software Integrated System TSIS CORSIM 6.2*” - University of Florida, Gainesville, FL.
- TRB (2010) TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – “*Highway Capacity Manual 2010*” – National Research Center. Washington, DC.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba, del Instituto Superior de Ingeniería del Transporte (ISIT) y la colaboración de becarios y alumnos de la Cátedra de Transporte I de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC