

# Retos tecnológicos para medir el tráfico en Bogotá mediante GPS y comunicación celular

Technological Challenges to Measure Vial Traffic in Bogota using GPS and Cellular Communications

Germán Bravo C. <sup>(1)\*</sup>, Harold Castro B. <sup>(2)\*</sup>, Luis Javier Bautista M. <sup>(3)\*</sup>, Juan Pablo Bocarejo S. <sup>(4)\*</sup>, Álvaro Rodríguez-Valencia <sup>(5)\*</sup>, Pedro Fabián Pérez-Arteaga <sup>(6)\*</sup>, Sebastián Velázquez G. <sup>(7)\*</sup>

<sup>(1)</sup> MsC. Profesor Asociado Ing. Sistemas y Computación. gbravo@uniandes.edu.co

<sup>(2)</sup> Ph.D. Profesor Asociado Ing. Sistemas y Computación. hcastro@uniandes.edu.co

<sup>(3)</sup> MsC. Ing. de Sistemas y Computación. lj.bautista31@uniandes.edu.co

<sup>(4)</sup> Ph.D. Profesor Asistente Ing. Civil y Ambiental. jboicarej@uniandes.edu.co

<sup>(5)</sup> MsC. Estudiante de doctorado, Universidad de California, Davis. rod@ucdavis.edu

<sup>(6)</sup> MsC. Profesor Asistente Ing. Civil. pperez@uniandes.edu.co

<sup>(7)</sup> MsC. Ingeniería Civil. s.velazquez52@uniandes.edu.co

\* Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Recibido 30 de mayo de 2012, aprobado 10 de mayo de 2013

## Palabras claves

Comunicaciones, georeferenciación, map matching, SIG, tráfico.

## Resumen

El Sistema de Información de Tráfico y Movilidad Urbana (SITYMUR) es una herramienta que busca recolectar información proveniente de agentes que circulan en las vías, con el fin de obtener información del tráfico y de la movilidad en un tiempo cercano al real. Lograr este resultado plantea retos tecnológicos importantes, tanto de comunicaciones como de procesamiento de los datos y publicación de los resultados. El artículo describe estos retos y discute la efectividad de las soluciones planteadas para cada uno mostrando algunos resultados de tráfico y de velocidad para Bogotá y posibles alternativas de mejora.

## Key words

Communications, georeferencing, GIS, map matching, traffic.

## Abstract

The Traffic and Urban Mobility System (*Sistema de Información de Tráfico y Movilidad Urbana - SITYMUR*) is a tool used to collect positional data from circulating agents on the roads, in order to generate traffic and mobility information in near real time. This issue raises important technological challenges concerning communications, data processing and publication of the results. This article describes these challenges and discusses the effectiveness of solutions proposed by showing a number of traffic and speed results for Bogotá as well as suggesting possible alternatives for improvement.

## INTRODUCCIÓN

Para tratar de entender cómo se comporta el tráfico en Bogotá, la Universidad de Los Andes desarrolló un prototipo (Bocarejo et al., 2010) de un sistema de información de tráfico y movilidad urbana, SITYMUR, que busca recolectar datos provenientes de agentes que circulan en las vías y generar información del tráfico en un tiempo cercano al real. Basados en experiencias previas en otras ciudades, que han demostrado su efectividad y validez, SITYMUR propone estudiar el tráfico sobre la malla vial principal de la ciudad mediante una flota de taxis equipados con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que envían su posición, cada 10 segundos por

la red de telefonía celular, a un servidor que analiza estos datos y genera información sobre el tráfico en la malla vial principal. Esta información es publicada en un portal Web, para disponibilidad del público en general y de las entidades de tránsito de la ciudad.

Este trabajo presenta los retos tecnológicos planteados por SITYMUR y cómo fueron solucionados para el desarrollo del prototipo. Entre estos retos se incluyen los modelos de comunicación, el volumen de datos, la georeferenciación de las tramas GPS, el cálculo de velocidades, la publicación y visualización de la información generada.

El artículo presenta inicialmente algunos antecedentes que validan el uso de GPS para la medición de tráfico y luego una

descripción un poco más detallada de SITYMUR que pone en relevancia los retos tecnológicos que deben ser resueltos; se detalla cada uno de los retos y cómo fueron abordados; luego, se presentan algunos de los resultados de SITYMUR que reflejan la efectividad de la solución propuesta a los retos; por último, se discuten mejoras y se compara con algunas soluciones que han surgido recientemente.

#### SITYMUR Y LOS RETOS QUE PLANTEA SU DESARROLLO

Varios estudios en diversas ciudades del mundo monitorean las condiciones del tráfico en tiempo real por medio de diversas metodologías. Rose (2006) muestra la aplicabilidad del uso de dispositivos móviles y la red celular para la localización de vehículos; Yoo, Kang & Park (2005) muestran el caso de Cheongjui, Corea, comparan el uso de la red celular con el uso de GPS, concluyendo que los GPS proveen mejor precisión; Bar-Gera (2007) usa la red celular para mediciones de tráfico sobre una autopista de 14 km en Israel y muestra que los resultados son similares a los obtenidos por sensores magnéticos en la vía; Faghri y Hamad (2002) usaron GPS para el estudio de tráfico en 64 vías del estado de Delaware, mostraron que la calidad de los datos GPS es equivalente al obtenido por otros medios, pero mucho más eficiente en términos de mano de obra; Tong, Merry & Coifman (2005)

desarrollaron una metodología similar en Columbus, Ohio, determinando que la diferencia de la información recolectada con GPS con respecto a lo recolectado con sensores de velocidad es en promedio, menor de 6.5 km/h y la metodología es considerada altamente efectiva.

Con base en los estudios anteriores y los resultados de Rodríguez y Quijano (2010), que concluye que los taxis se mueven de manera similar a los otros vehículos, SITYMUR plantea el uso de una flota de taxis equipados con GPS y teléfonos celulares programados para enviar datos acerca de su localización y velocidad cada 10 segundos, que son procesados para generar información actualizada del tráfico de la ciudad y publicados como muestra la Figura 1.

Uno de los objetivos de SITYMUR es recolectar datos de tráfico, analizarlos y generar mapas de tráfico de la malla vial principal de Bogotá, que son puestos a disposición de la comunidad, de manera similar a como lo hace Sigalert para los Estados Unidos<sup>1</sup>, en el caso de Sao Paulo, la Companhia de Engenharia de Tráfego (CET)<sup>2</sup>, Itraffic para África del Sur<sup>3</sup> y Waze<sup>4</sup>. A diferencia de estos proyectos, SITYMUR plantea la obtención de datos reales de tráfico sin utilizar infraestructuras dedicadas para ello. Al aprovechar la información generada por taxis en sus recorridos normales, esta solución puede ser implementada independientemente de organismos gubernamentales poseedores de dichas infraestructuras.

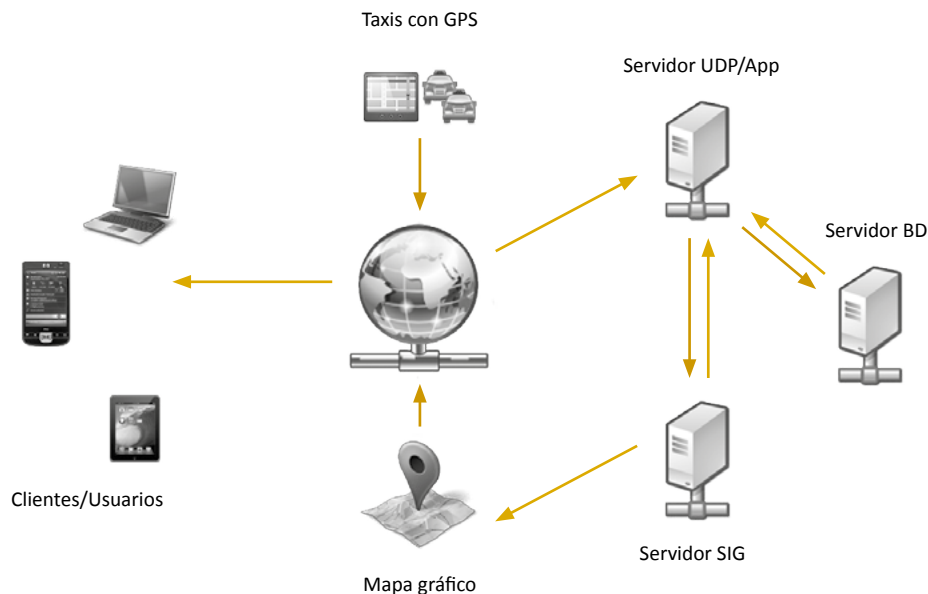


Figura 1. Arquitectura de SITYMUR

1 <http://sigalert.com>  
 2 <http://www.cetsp.com.br/transito-agora/mapa-de-fluidez.aspx>  
 3 <https://www.i-traffic.co.za/>  
 4 <http://www.waze.com/livemap/>

Otros objetivos comprenden la utilización de estos datos para estudiar y caracterizar el tráfico de la ciudad.

El desarrollo de dicho proyecto presenta los siguientes retos tecnológicos:

- Manejo de gran volumen de datos y de comunicación.
- Georeferenciación de las tramas GPS, proceso mediante el cual cada una de las tramas GPS se asocia de la manera más precisa posible a un segmento de un tramo de vía.
- Cálculo de velocidades promedio en cada tramo de vía, que se realiza con base en todas las observaciones recibidas por el servidor en el período de tiempo definido (5 minutos).
- Visualización y publicación de resultados, que debe ser de gran accesibilidad y facilidad de uso para el público en general.

## SOLUCIÓN PROPUESTA

### MANEJO DE GRAN VOLUMEN DE DATOS Y DE COMUNICACIONES

Obtener información en tiempo real de numerosos dispositivos móviles en una región de área extendida como Bogotá plantea retos a nivel de comunicaciones y transmisión de datos. En el esquema propuesto, cada vehículo debe enviar la información disponible en su GPS local en promedio 6 veces por minuto. El éxito de un sistema como SITYMUR depende de tener un buen cubrimiento de la ciudad con los vehículos que hacen parte del sistema. Si bien estimamos que con 1000 agentes, se puede obtener un cubrimiento de las principales vías, entre más vehículos se tengan, mejor la información que se puede recolectar y más preciso el cálculo de congestión en las vías.

Dada la variabilidad de rutas que pueden seguir los taxis y el deseo de poder implementar un piloto rápido, se escogió la tecnología celular como la red de comunicaciones para transmitir la tramas recolectadas por los GPS hasta la central de SITYMUR. De esta manera, se evita el despliegue de una red propietaria y se aprovecha la disponibilidad de dispositivos GPS que incorporan la posibilidad de agregar una SIM y programar el envío de la información con la cadencia deseada. Realizando un envío cada 10 segundos, 1000 agentes móviles generarán 6000 tramas por minuto, factor que exige un servidor en estado permanente de recepción. El pequeño tamaño de las tramas (menos de 100 Bytes) permite aprovechar esta infraestructura ya disponible en la ciudad sin incurrir en nuevas inversiones.

Con este volumen mínimo de información se seleccionó entonces el protocolo User Datagram Protocol (UDP) para la transmisión de estos datos. Además de ser un protocolo más ligero por no requerir confirmación de la información que se transmite, la pérdida eventual de algunas tramas no se considera grave pues se puede extrapolar posiciones con las tramas que sí logren llegar al servidor central. Adicionalmente, a medida que el número de agentes aumente, se puede usar información de varios agentes sobre la misma vía para el cálculo de la congestión.

### GEOREFERENCIACIÓN DE LAS TRAMAS GPS

La red vial para la ciudad de Bogotá definida dentro del alcance del sistema consta de 32 vías principales que atraviesan la ciudad tanto de Norte a Sur como de Oriente a Occidente; cada vía se divide en arcos con longitud entre 2 y 5 km, con base en las intersecciones existentes y una velocidad promedio, según la Cámara de Comercio de Bogotá (2010), de 25km/h; cada arco está formado por una secuencia de segmentos de recta, donde el número de segmentos de recta en un arco depende de la geometría de la vía y de la precisión con que se generó la malla vial. Para ajustar con suficiente precisión los datos obtenidos de los dispositivos GPS a la malla vial, se utiliza una escala de 1:2000 y se considera un *buffer* de 2.5 m. a cada lado del eje vial.

Las tramas de datos provenientes de los dispositivos GPS tienen la información de localización del agente móvil en el momento del envío. Con estos datos, se utiliza un algoritmo simple de *map matching*, que considera las distancias de las tramas GPS a los arcos de la red vial y las asocia con el arco más cercano.

El proceso para cada trama GPS es: se toma la información de localización  $p_{(lat,lon)}$  y se proyecta sobre cada uno de los segmentos de línea de los arcos de la malla vial, guardando la información de distancia entre  $p_{(lat,lon)}$  y el segmento correspondiente; cuando dicha distancia es menor que el *buffer* definido alrededor del eje vial, se escoge el segmento y se “traslada” la trama al punto  $p'_{(PlatProy,lonProy)}$ . Para las tramas enviadas en las intersecciones de la malla vial, se escoge el segmento más cercano y a éste se le asocia la trama GPS.

Esta información se almacena en la base de datos del sistema, en la tabla Tramas GPS, ilustrada en la Tabla 1.

### EL CÁLCULO DE VELOCIDADES

El cálculo de la velocidad promedio de los arcos se basa en las lecturas consecutivas de los agentes que circulan por ellos. Para cada par de tramas GPS proyectadas sobre el mismo

Tabla 1. Definición y ejemplo de la tabla "Tramas GPS" de la base de datos

| ID | GPS | Fecha      | Hora     | Latitud NS  | Longitud EW  | ID Arco | latProy | lonProy  |
|----|-----|------------|----------|-------------|--------------|---------|---------|----------|
| 01 | 05  | 2010-07-04 | 15:56:57 | 0437.6175 N | 07406.4831 W | 67      | 4.6268  | -74.1067 |

arco de la malla vial se calcula entonces la distancia  $x$ , que hay entre ellas, siguiendo la geometría de la vía; se calcula la diferencia de tiempo  $t$ , entre las dos tramas GPS, y se calcula la velocidad ( $v = x/t$ ).

Esta información se almacena en la base de datos del sistema, como un ítem de información de tráfico, como lo muestra la Tabla 2.

Cada ítem de información de tráfico se asocia con el arco correspondiente de la malla vial, conformando una información de tráfico, ilustrada en la tabla 3.

**Tabla 3.** Definición y ejemplo de la tabla "Información tráfico" de la base de datos

| ID Arco | ID Info. Tráfico |
|---------|------------------|
| 67      | 167              |

Finalmente, para el cálculo de la velocidad promedio del arco para un período de tiempo determinado (5 minutos), se toman todas las informaciones de tráfico de un arco en el lapso de tiempo dado y se saca el promedio de las velocidades. Se genera así un ítem de velocidad promedio, como muestra la tabla 4, que tiene la misma estructura que los ítems de tráfico, pero un significado diferente.

**Tabla 2.** Definición y ejemplo de la tabla "Ítem información tráfico" de la base de datos

| ID Info. | Hora inicio         | Hora fin            | Día semana | Velocidad  |
|----------|---------------------|---------------------|------------|------------|
| 167      | 2010-07-04 15:56:57 | 2010-07-04 15:57:07 | DOMINGO    | 19.1844518 |

**Tabla 4.** Definición y ejemplo de la tabla "Ítem velocidad promedio" de la base de datos

| ID InfoT | Hora inicio         | Hora fin            | Día semana | Vel. Prom. arco |
|----------|---------------------|---------------------|------------|-----------------|
| 466      | 2010-07-04 15:55:00 | 2010-07-04 15:59:59 | DOMINGO    | 16.456837       |

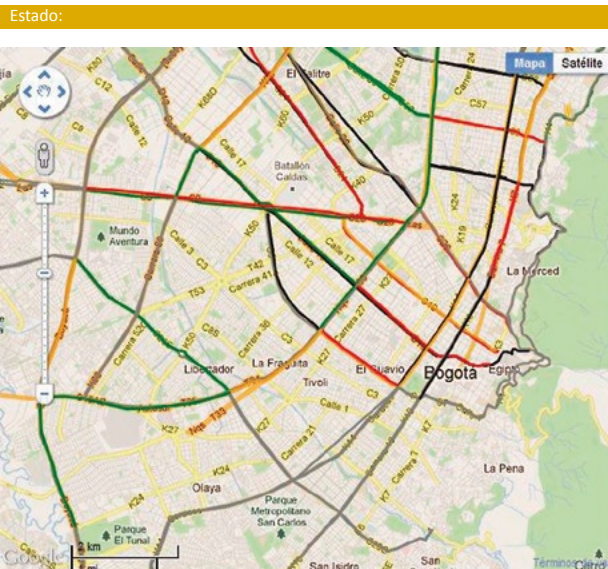
### VISUALIZACIÓN Y PUBLICACIÓN DE RESULTADOS

Para la visualización de la información es necesario convertir los datos recolectados por cada uno de los agentes móviles en información visible y de fácil entendimiento para los usuarios. Esto se logra mediante (1) la generación de la malla vial principal de la ciudad compatible con Google Maps; (2) la definición de rangos de velocidades para mostrar la información de la red vial en función de la velocidad promedio de cada uno de los arcos; y (3) la creación de un portal que interactúa con Google Maps para mostrar la información al usuario.

Esta herramienta (Figura 2) está basada en la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) de Google Maps, por lo que el usuario puede tener de fondo imágenes satelitales y mapas que ayudan a comprender la información. En la visualización del portal se manejan algunas restricciones del zoom que el usuario puede realizar, con el fin de optimizar el tiempo que el usuario gasta en el portal y la confiabilidad de la información. Para lograr esto se limita el zoom de la aplicación al rango 13x-15x (propio del API de Google Maps).

#### Tráfico en tiempo real: Bogotá

Mapa de Bogotá



**Figura 2.** Portal de consulta SITYMUR, en la página "Tráfico en Tiempo Real: Bogotá"

Fuente. Desarrollo propio

## RESULTADOS, COMENTARIOS Y PERSPECTIVAS

Este capítulo presenta y analiza los resultados de SITYMUR desde los puntos de vista de la problemática del tráfico, de los usos actuales y potenciales de la información recolectada y de la solución informática.

### CON RESPECTO A SITYMUR

Los resultados obtenidos de SITYMUR son interesantes en la medida que dan una visión de la ciudad en cuanto a la movilidad y a su vez aborda un enfoque que va desde el análisis general de toda la red vial, hasta el análisis detallado de los tramos que la componen. Por ejemplo, la velocidad promedio de los tramos de la red vial principal para un día y un rango de horas determinado (Figura 3).

Dentro de los grandes proyectos en los cuales se puede enmarcar SITYMUR está el Observatorio de Movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá. En este observatorio se busca llevar control de la movilidad de la ciudad y, periódicamente, generar informes que presenten el estado actual de la ciudad.

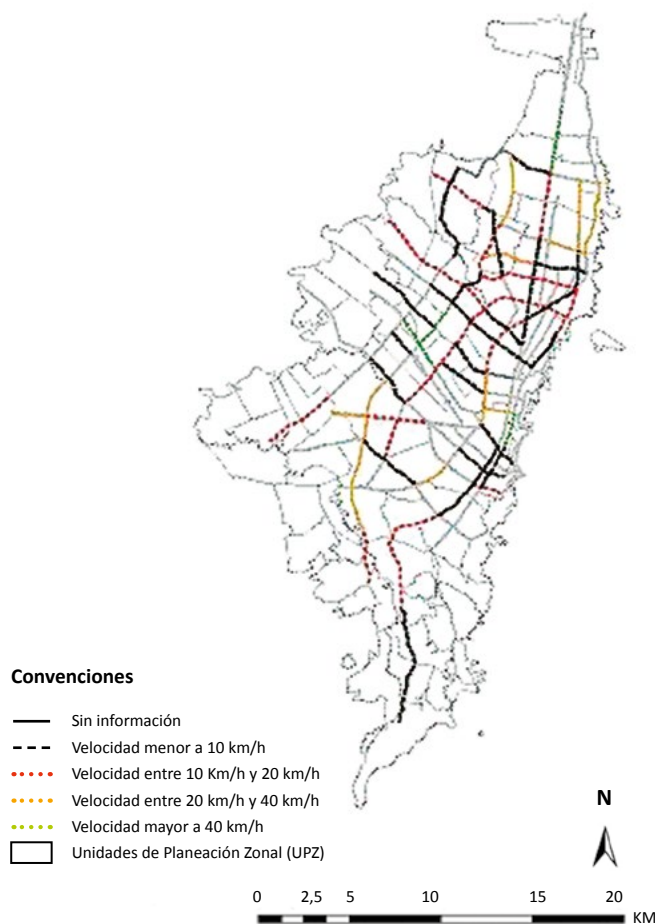
La principal ventaja de la solución propuesta, es que no requiere de inversiones en infraestructura ni en equipos especializados para equipar la ciudad (cámaras, sensores, etc.). La solución que se plantea en el proyecto es relevante desde el punto de vista investigativo, ya que permite analizar el tráfico de una ciudad como Bogotá utilizando alternativas de bajo costo.

### CON RESPECTO A LA INFORMACIÓN

La información recolectada tiene múltiples aplicaciones, pues conociendo la información de velocidad promedio de las vías, es posible refinar modelos de tráfico, así como también se pueden identificar coyunturas de tráfico en puntos específicos y es posible tomar decisiones al respecto.

Otros resultados obtenidos del análisis de los datos incluyen (1) las velocidades por día de la semana, que evidencian el efecto de la restricción de pico y placa en la ciudad de Bogotá; (2) el monitoreo de la flota de taxis para determinar el promedio de horas de operación, la distancia recorrida diaria, el total de horas detenido, la velocidad de operación y el control de límite de velocidad (Rodríguez y Quijano, 2010); (3) el análisis de intersecciones viales y (4) de cuellos de botella (Bocarejo, Rodríguez & Velázquez, 2010).

Una consideración particular debe ser tenida en cuenta si se quiere en realidad tener un mapa de velocidades actualizado cada 5 minutos de la ciudad. La dinámica del servicio de taxis no puede garantizar que haya uno o dos vehículos en cada uno de los arcos de la malla vial en cada período de 5 minutos y por lo tanto no es posible calcular la velocidad en algunos arcos. Para estos casos se utiliza información histórica recolectada con anterioridad y en el momento de la visualización se hace explícito este hecho.



| Nombre vía                 | Id . Arco | Vel-Km/h |
|----------------------------|-----------|----------|
| Autopista Norte            | 114       | 55,57    |
| Circunvalar/Calle 92       | 89        | 54,18    |
| Carrera 11                 | 156       | 53,76    |
| Avenida Boyacá             | 183       | 49,76    |
| Carrera 9                  | 102       | 48,08    |
| ---                        | ---       | ---      |
| Avenida carrera 68         | 57        | 0,81     |
| Avenida carrera 68         | 173       | 0,70     |
| Avenida Caracas            | 134       | 0,38     |
| Calle 72 (Avenida Chile)   | 49        | 0,25     |
| Autop: Sur/Ciudad de Quito | 212       | 0,21     |

**Figura 3.** Tabla y Mapa de tráfico para los sábados al medio día (12:00 - 2:00 pm)  
Fuente: Desarrollo propio

Un hallazgo interesante con respecto a los datos es que sólo el 12.34% de las tramas GPS enviadas se asocian a la malla vial principal. Esto indica que los taxis no circulan mayoritariamente por la malla vial principal, pero también que existe un gran potencial en el sistema para que, sin incurrir en costos adicionales, se pueda estudiar el tráfico sobre toda la malla vial de la ciudad.

#### CON RESPECTO A LA SOLUCIÓN INFORMÁTICA

El sistema generado puede tener otras aplicaciones a nivel funcional y además se puede extrapolar a otros lugares. En cuanto a las aplicaciones a nivel funcional, el sistema permite llevar registro del comportamiento de los conductores de servicio público, en especial, el de los taxistas. En relación a la extrapolación del sistema, éste está planteado de manera genérica con el fin de que al cambiar la fuente de información siga en funcionamiento, es decir que se podría tener información de la red vial de otra ciudad y solo bastaría con tener agentes móviles en esta nueva ciudad para utilizar el sistema.

El esquema de creación de la malla vial principal y el algoritmo de *map matching* pueden ser utilizados en otros contextos, como por ejemplo el mapeo de emisiones de los modos de transporte público para evaluar la calidad del aire en la red vial principal de Bogotá y el mapeo de accidentes de tránsito ocurridos en la malla vial principal para generar mapas de riesgo de accidentalidad de Bogotá.

Con respecto al desempeño del sistema es necesario analizar el desempeño del algoritmo de *map matching*, que toma más tiempo del esperado para georeferenciar cada trama GPS a la malla vial principal, influyendo negativamente en el desempeño total del sistema. Una alternativa a estudiar es disminuir la frecuencia de envío de tramas GPS por parte de los taxis e implementar el algoritmo de *map matching* propuesto por Lou et al. (2009) precisamente para envíos espaciados de tramas GPS.

Con respecto al futuro, el sistema puede sufrir un proceso de redefinición de la arquitectura, con el fin de prestar servicios de información adicionales a la visualización de los resultados, propios de un sistema de información geográfica que preste servicios de planeación de desplazamientos por la ciudad e identificación de rutas alternas.

#### REFERENCIAS

- Bar-Gera, H. (2007). Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel. *Transportation Research Part C*, 15(6), 380–391.
- Bocarejo, J. P., Bravo, G., Castro, H., Rodríguez, A., Perez, P., Velásquez S., & Bautista, L. (2010). Prototipo de un sistema de información de tráfico y movilidad urbana para la ciudad de Bogotá, Colombia. XVI Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano. Ciudad de México D.F.
- Bocarejo, J.P., Rodríguez, A. Velázquez, S. (2010) “Oportunidades de medición de indicadores de tráfico basados en el sistema de información de tráfico y movilidad urbana (SITYMUR). Universidad de Los Andes. Reporte interno.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) y Universidad de los Andes, (2010). Observatorio de Movilidad. 5: 79p
- Faghri, A., & Hamad, K. (2002). Application of GPS in Traffic Management Systems. *GPS Solutions*, 5(3), 52-60.
- Lou Y., Chengyang Z., Zheng, Y., Xie, X., Wang, W. & Huang, Y. (2009) “Map-Matching for Low-Sampling-Rate GPSTrajectories”. ACM GIS ‘09. Seattle, WA, USA
- Rodríguez, A. Quijano, J. P. (2010) “Caracterización del sistema de taxis en Bogotá, Colombia y la metodología de adquisición de información”. XVI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte y Logística. Lisboa, Portugal.
- Rose, G. (2006) Mobile phones as traffic probes: practices, prospects and issues. *Transport Reviews*, 26(3), 275-291.
- Tong, D., Merry, C. J., y Coifman, B. (2005). Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS. Center for Urban and Regional Analysis and Department of Geography. The Ohio State University. Ohio, USA.
- Yoo, B.S., Kang, S.P. & Park, C.H., (2005). Travel time estimation using mobile data. In: Satoh K. (Ed.), Proceedings of the Eastern Asia Society of Transportation Studies. Eastern Asia Society for Transportation Studies. Tokyo, Japan. 5: 1533–1547.