

# Indicadores operativos para un servicio periférico de autobuses utilizando sistemas automáticos de localización de vehículos

Jorge Lynch Mejía , Henry Hernández Vega 

Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil. República de Costa Rica

jorgelynch25@hotmail.com; henry.hernandezvega@ucr.ac.cr

DOI: 10.33412/pri.v16.1.4007



**Resumen:** En el presente estudio, se utiliza un sistema automático de localización de vehículos en transporte público para la generación de una serie de indicadores operativos relacionados a la variabilidad de tiempo de viaje (VTV) en un caso de aplicación. Se busca identificar, a partir de estos indicadores, segmentos de ruta con altos índices de variabilidad, situación desfavorable para la persona usuaria del transporte público. Se realiza el estudio a partir de una base de datos facilitada por la empresa Discar, responsable de la operación de la ruta Periférica en el área metropolitana de San José, Costa Rica. Se generan indicadores de VTV para cada segmento de ruta para lapsos de 15 minutos. Se observa la variabilidad horaria de estos indicadores y se generan indicadores ponderados en función de la longitud del segmento y velocidad promedio, identificando los tramos más críticos de la ruta en términos de indicadores de tiempo de viaje.

**Palabras clave:** transporte público, tiempos de viaje, indicadores operativos, autobús, sistema automático de localización de vehículos

**Title:** Operational indicators for a peripheral bus service using automatic vehicle location systems.

**Abstract:** In the present study, an automatic vehicle location system in public transport is used by generating a series of operational indicators related to travel time variability (VTV) for an application case. The aim is to identify, based on these indicators, route segments with high rates of variability, an unfavorable situation for the user of public transportation. The study is carried out from a database provided by the company Discar, responsible for the operation of the Periférica route in the metropolitan area of San José, Costa Rica. VTV indicators are generated for each route segment for periods of 15 minutes. The hourly variability of these indicators is observed and weighted indicators are generated based on the length of the segment and average speed, identifying the most critical sections of the route in terms of travel time indicators.

**Keywords:** public transportation, autobus, travel time, operative indicator, automatic vehicle location system

Tipo de artículo: estudio.

Fecha de recepción: 1 de febrero de 2024.

Fecha de aceptación: 20 de febrero de 2025.

## 1. Introducción

Durante las últimas décadas, el autobús es el principal modo de transporte en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica [1]. Sin embargo, la proporción de viajes en autobús ha ido decreciendo en los últimos años [2], y el estado costarricense tiene limitaciones técnicas que dificultan la mejora del sistema de transporte público [3].

El uso de la información recolectada por sistemas automáticos de localización de vehículo (AVL, por sus siglas en inglés, *Automated Vehicle Location*) pueden ser de gran provecho para identificar oportunidades de mejora en el servicio de transporte brindado [4], [5]. Estos sistemas permiten cuantificar variables operativas de los sistemas de transporte público tales como demoras, tiempos de espera y confiabilidad en tiempos de espera [6]. Además, los sistemas AVL al integrarse con otras tecnologías, como control de barras o flota, permite un rango mucho mayor de posibles usos [7].

Los usuarios prefieren servicios con menor tiempo promedio y menor variabilidad en los tiempos de recorrido [8]; por lo que contar con información relacionada con los tiempos de viaje es sumamente relevante ya que podría permitir los elementos que inciden en los mismos y en su variabilidad. Por ejemplo, en el 2014, en un estudio para autobuses en Portland, se obtuvo que las demoras en el tiempo de viaje de los autobuses están casi linealmente relacionadas con la relación entre la duración de la fase roja en el sentido de movimiento y el tiempo del ciclo del semáforo [9]. También en este estudio se encontró que, en promedio, el 50 % de la variabilidad del tiempo de viaje es causado por el retraso en las intersecciones semaforizadas y que cada adición del número de intersecciones por kilómetro aumenta el tiempo de viaje en un 22 %.

El identificar los tramos que presentan menores velocidades y mayores variabilidades en los tiempos de viaje permitirían generar acciones a ejecutar por parte de los entes responsables del sistema en búsqueda de la disminución de la variabilidad del tiempo de viaje. Algunas de las posibles acciones podrían ser: eliminar o reubicar algunas paradas, dar tratamiento preferencial a autobuses, en segmentos de ruta mediante el uso de carriles exclusivos o modificar el comportamiento de intersecciones mediante el uso de señales exclusivas, prioridad de fase o salto de cola para el transporte público [10].

## 2. Materiales y métodos

El objetivo del estudio es aplicar, como caso de estudio, indicadores operativos a partir de la información que generan los sistemas automáticos de localización de vehículos a bordo del transporte público modalidad autobús, para una ruta específica con el fin de cuantificar seis aspectos operativos del servicio prestado y promover su mejora continua.

La recopilación de información se realizó en colaboración con la empresa Discar, concesionaria de la Ruta 08, La Periférica. Se realizaron visitas de campo, recorridos en cada una de las rutas y obtención de la información del sistema AVL.

Además, se realizaron entrevistas a empresas operadoras que contaban con sistemas AVL. Las entrevistas tenían como fin determinar las aplicaciones que se les estaban dando, por parte de los operadores, a los sistemas AVL. A partir de la información recopilada, se determinó que, en Costa Rica, estos sistemas se utilizan para determinar el cumplimiento de horarios, además, para la verificación del comportamiento de los choferes de autobús (por ejemplo, se puede determinar si en efecto un chofer maneja de manera temeraria: altas velocidades, cambios bruscos de velocidad, conducción en contravía, etc.) o bien, si hace caso omiso a las solicitudes de parada de los pasajeros. Estos sistemas se utilizan, además, para gestionar la flota de autobuses ante eventos no recurrentes (por ejemplo, congestión generada por un accidente de tránsito)

Durante los recorridos se recopila información de interés utilizando GPS. Los datos obtenidos corresponden al periodo comprendido entre noviembre 2018 a mayo 2019, lo que representa un total de 223 días, unas 32 semanas, aproximadamente.

Primeramente, se realiza la conglomeración de datos en una base de datos única, esto genera una base de datos con poco más de 8 millones de entradas. Primeramente, se purga la base de datos para incluir únicamente entradas que puedan ser ubicadas espacialmente. Esto da como resultado una base de datos con 1.2 millones de entradas. Estas entradas especialmente ubicadas corresponden a puntos de control los cuales son utilizados para definir los tramos de análisis. A manera de ejemplo, la figura 1 muestra los puntos de control que se ubican en una zona a lo largo del recorrido de la ruta del autobús

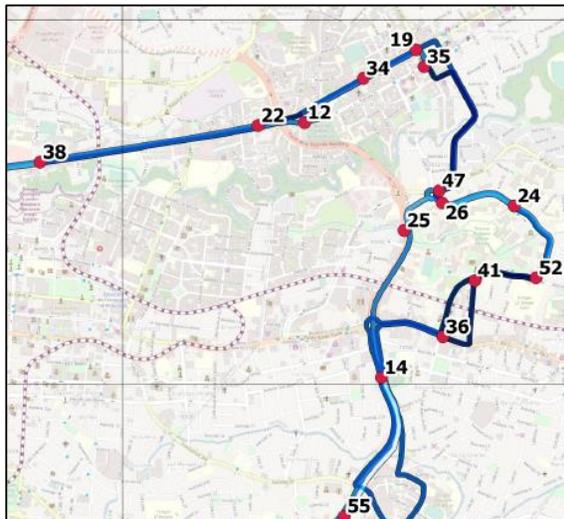


Figura 1. Detalle de ubicación de puntos de control utilizados para generar los tramos de análisis en parte del recorrido de la Ruta Periférica

Después de generar una limpieza de los datos, se generan bandas horarias de 15 minutos de duración, a manera de categorizar cronológicamente la información, con esto se analiza la variación diaria de los tiempos de viaje y se determina la hora pico para cada tramo. Se analizaron aquellos tramos con al menos 1000 entradas en cada banda horaria.

Con el fin de identificar los tramos críticos ante la gran variedad de indicadores utilizados, se genera un sistema de puntaje, a partir de las variabilidades promedio durante el día, que otorga de 1 a 10 puntos a las primeras 10 posiciones peor posicionadas para cada indicador, de manera que el peor situado obtiene 10 puntos y el situado en la décima posición recibe 1 punto. La escogencia de los indicadores utilizados se basó en indicadores disponibles en la literatura [6, 11, 12]. y corresponden a:

- a) Tiempo de viaje promedio (TVP)
- b) Desviación estándar de tiempo de viaje (SD)
- c) Ventana de tiempo de viaje (VTV)
- d) Semidesviación estándar de tiempo de viaje (SD)
- e) Variación porcentual del tiempo de viaje (VP)
- f) Índice de simetría de tiempo de viaje (IS)
- g) Asimetría en el tiempo de viaje (ASTV)
- h) Ancho del tiempo de viaje (ATV)
- i) Índice de reserva o índice buffer del tiempo de viaje (IB)
- j) Índice en el tiempo de planificación (PTI)

A continuación, se resumen estos indicadores.

#### Tiempo de viaje promedio

El tiempo de viaje promedio (TVP), es la suma de todos los tiempos de viaje (TV) que componen la muestra dividida entre el número de elementos, Ecuación 1.

$$TVP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n TV_i \text{ (min/km)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

N: Número de elementos de la muestra

TV<sub>i</sub>: Tiempo de viaje (min/km)

#### Desviación estándar del tiempo de viaje (SD)

Es la variación del tiempo de viaje con respecto al tiempo de viaje promedio de la muestra a analizar. Indica la dispersión de un conjunto de datos con respecto a la media. Mientras mayor sea el valor de la desviación estándar, se tiene que existe una mayor dispersión de los datos con respecto a la media [11].

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (TV_i - TVP)^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

N: Número de elementos de la muestra

TV: Tiempo de viaje

TVP: Tiempo de viaje promedio

**Ventana de tiempo de viaje**

Pone en perspectiva el valor de la desviación estándar, al combinarlo con el valor de tiempo de viaje promedio, o cualquier otro parámetro, y obtener límites de confiabilidad [12].

$$VeTiVi = TVP \mp SD \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

TVP: Tiempo de viaje promedio

SD: Desviación estándar del tiempo de viaje

**Semidesviación estándar del tiempo de viaje (SSD)**

Es la variación del tiempo de viaje con respecto al tiempo de viaje a flujo libre de la muestra a analizar. Indica la probabilidad de que el viaje dure más del valor de SSD en realizar el viaje en comparación con lo que tarda al realizar el recorrido al flujo libre [11].

$$SSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (TV_i - TV_{fl})^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

N: Número de elementos de la muestra

TV: Tiempo de viaje

TV<sub>i</sub>: Tiempo de viaje a flujo libre

**Variación porcentual del tiempo de viaje (VP)**

Variación porcentual entre la desviación estándar del tiempo de viaje y el promedio en el tiempo de viaje [12].

$$VP = \frac{SD}{TVP} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

SD: Desviación estándar del tiempo de viaje

TVP: Tiempo de viaje promedio

**Índice de simetría del tiempo de viaje (IS)**

Se utiliza para determinar la simetría de la distribución de los tiempos de viaje, entre mayor es el valor la distribución menos simétrica es, se encuentra inclinada, siendo menor la confiabilidad. Una distribución completamente simétrica es cuando su valor es uno [6].

$$IS = \frac{P_{90} - P_{50}}{P_{90} - P_{10}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

P<sub>90</sub>: Percentil 90 del tiempo de viaje

P<sub>50</sub>: Percentil 50 del tiempo de viaje

P<sub>10</sub>: Percentil 10 del tiempo de viaje

**Asimetría del tiempo de viaje (ASTV)**

El ancho relativo de la distribución del tiempo de viaje en relación con la mediana en un periodo de tiempo determinado. Los valores altos de asimetría del tiempo de viaje indican que el rango de tiempo de viaje es mayor, siendo por consiguiente menor la confiabilidad del tiempo de viaje [13].

$$ASTV = \frac{P_{90} - P_{50}}{P_{50} - P_{10}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

P<sub>90</sub>: Percentil 90 del tiempo de viaje

P<sub>50</sub>: Percentil 50 del tiempo de viaje

P<sub>10</sub>: Percentil 10 del tiempo de viaje

**Ancho del tiempo de viaje (ATV)**

Otra manera de establecer el ancho relativo de la distribución de tiempo de viaje en relación con la mediana en un cierto período. Al igual que la ASTV, entre más alto es el valor del ATV mayor va a ser el rango de tiempo de viaje, siendo menor la confiabilidad del tiempo de viaje [6].

$$ATV = \frac{P_{90} - P_{10}}{P_{50}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

P<sub>90</sub>: Percentil 90 del tiempo de viaje

P<sub>50</sub>: Percentil 50 del tiempo de viaje

P<sub>10</sub>: Percentil 10 del tiempo de viaje

**Índice de reserva o índice buffer del tiempo de viaje (IB)**

El índice de reserva indica el tiempo extra que un usuario debe agregarle a su tiempo de viaje promedio para llegar a la hora deseada el 95 % de las veces. Por ejemplo, cuando se tiene un IB de 30 % y un tiempo de viaje promedio de 50 minutos, para llegar el 95 % de las veces "a tiempo" el usuario debe salir 15 minutos antes [11].

$$IB = \frac{P_{95} - TVP}{TVP} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

P<sub>95</sub>: Percentil 95 del tiempo de viaje

TVP: Tiempo de viaje promedio

**Índice en el tiempo de planificación (PTI)**

El índice en el tiempo de planificación, al igual que el índice de reserva, indica el tiempo extra que un usuario debe agregar a su tiempo de viaje promedio para llegar a la hora deseada el 95 % de las veces, pero en este, se toma en cuenta el retraso inesperado comparando el tiempo de viaje en las peores condiciones, con el tiempo de viaje con tráfico liviano o a flujo libre. Así que tiene resultados muy consistentes. Se puede calcular para el viaje total o segmentos de este. Por ejemplo, un PTI de 1,7 significa que, para un viaje de 50 minutos, se tiene un tiempo de planificación de 85 minutos teniendo un tiempo extra de 35 minutos.

$$PTI = \frac{P_{95}}{TV_{fl}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde,

P<sub>95</sub>: Percentil 95 del tiempo de viaje

TV<sub>fl</sub>: Tiempo de viaje a flujo libre

El índice de reserva y el índice en el tiempo de planificación, en este caso, se calculan con el percentil 95 del tiempo de viaje, pero se puede usar cualquier otro percentil dependiendo del nivel de confianza deseado [6].

A partir de la información recolectada en campo, es posible determinar cuáles elementos físicos del recorrido están relacionados con los resultados obtenidos. Se identifican en

el sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) los tramos con mayor puntaje y se genera un mapa con la información de las zonas críticas para la totalidad de recorridos servidos por la ruta en estudio. Se logran determinar entes específicos conflictivos en las rutas. Estos resultados son comparados con la información empírica obtenida en las visitas de campo.

### 3. Resultados y discusión

Para cada uno de los segmentos de ruta se genera un perfil diario de tiempo de viaje. Se utilizan diagramas del tipo Cajas y bigotes, de esta manera se logra observar la variación horaria del tiempo promedio de viaje y la respectiva dispersión para cada franja horaria. Se observan comportamientos variados para estos perfiles de tiempo de viaje, se logran identificar tres casos relativamente típicos.

El primer caso corresponde a aquellos que presentan horas pico claramente marcadas, tanto en tiempo de viaje promedio como en variabilidad del mismo, en los momentos del día esperados, como el que se muestra en la figura 2.

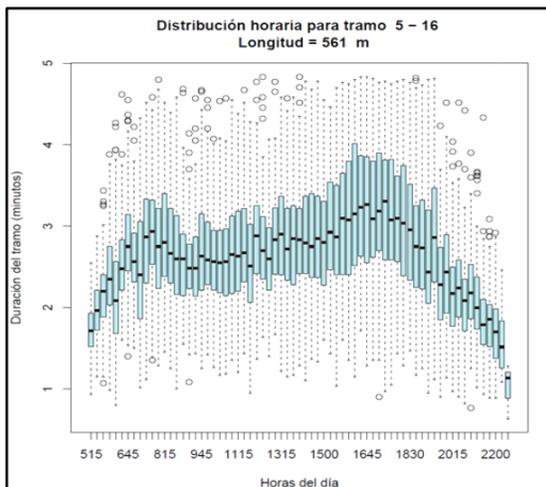


Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes para la duración del recorrido por el tramo durante las diferentes horas del día, tramo 5-16

También existen casos en los que se observa un comportamiento hacia un solo pico, ya sea en la mañana o en la tarde, dejando el pico alterno en horas cercanas al mediodía. En la figura 3, se observa un aumento continuo del tiempo promedio de viaje durante el día hasta tener un pico cercano a las 13:00 y un segundo pico, más marcado, durante horas de la tarde. Se observa, además, que el aumento en el tiempo de viaje va acompañado de un aumento en la variabilidad del tiempo de viaje.

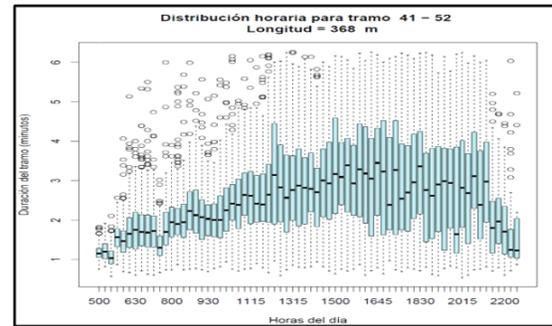


Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes para la duración del recorrido por el tramo durante las diferentes horas del día, tramo 41-52

El tercer caso es en el tiempo de viaje promedio se mantiene relativamente similar durante todo el día, con un repunte hacia el mediodía, tal como se observa en la figura 4.

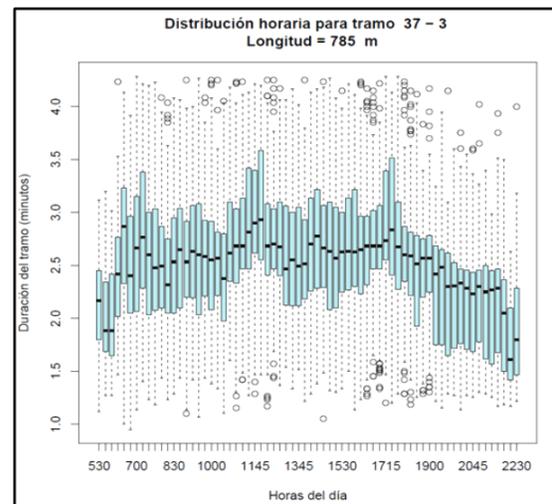


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes para la duración del recorrido por el tramo durante las diferentes horas del día, tramo 37-3

La mayor parte del recorrido se encuentra en un rango de velocidad promedio entre 10 y 30 km/h, valores aceptables para el tipo de ruta que conforman. Sin embargo, se logran detectar algunos tramos con velocidades de operación bastante bajas a ciertas horas del día.

Para cada hora de operación del día, para cada tramo analizado se calculó, la desviación estándar de tiempos de viaje, la ventana de tiempos de viaje, la semi-desviación estándar de tiempos de viaje, la variación porcentual de tiempos de viaje, el índice de simetría de tiempos de viaje, la asimetría de tiempo de viaje, el ancho de tiempo de viaje y el índice Buffer de tiempos de viaje. A manera de ejemplo, en el Cuadro 1 se muestran las ventanas de tiempo de viaje para los tramos 13-28,13-32 y 14-18, y en el cuadro 2 se muestran los indicadores operativos obtenidos para estos tramos.

Cuadro 1. Ventana de tiempo de viaje para tres tramos analizados

Hora/Tramo	13 - 28	13 - 32	14 - 18
500	72.3	72.5	90.5
600	247.6	133.3	210.2
700	291.3	161.2	250.5
800	264.5	180.0	247.3
900	175.7	133.2	180.1
1000	164.7	130.1	234.0
1100	180.9	124.3	237.9
1200	162.9	133.9	280.6
1300	165.3	119.3	279.4
1400	181.5	143.9	298.9
1500	261.3	181.8	365.0
1600	345.7	201.8	418.3
1700	344.7	211.1	451.9
1800	316.7	201.3	423.2
1900	168.0	122.7	367.3
2000	113.1	85.7	302.6
2100	116.0	106.1	273.9
2200	89.0	80.2	84.5

Cuadro 2. Resumen de indicadores operativos para tres tramos analizados

Indicador/Tramo	13 - 28	13 - 32	14 - 18
Distancia (m)	1274.0	644.0	1518.0
Tiempo Promedio (s)	354.3	184.8	407.1
Velocidad promedio(km/h)	12.9	12.5	13.4
Ventana Total (s)	205.57	141.89	277.38
Desviación Estándar (s)	102.78	70.95	138.69
Semi Desviación Estándar (s)	210.00	137.02	271.63
Variación Porcentual (%)	28.17	37.80	33.18
índice de simetría	0.57	0.59	0.61
Asimetría del tiempo de viaje	1.54	1.56	1.75
Ancho de tiempo de viaje	0.74	1.00	0.89
Índice Buffer	0.49	0.68	0.62
Índice de tiempo de planificación	3.12	4.62	4.18

Además, se encontró que para los indicadores del índice de planificación de tiempo de viaje se encuentra relacionado con la distancia del tramo, tal como se muestra en la figura 4. Similarmente, la semi-desviación estándar promedio se encuentra relacionada con el tiempo de viaje promedio en el tramo (ver figura 5).

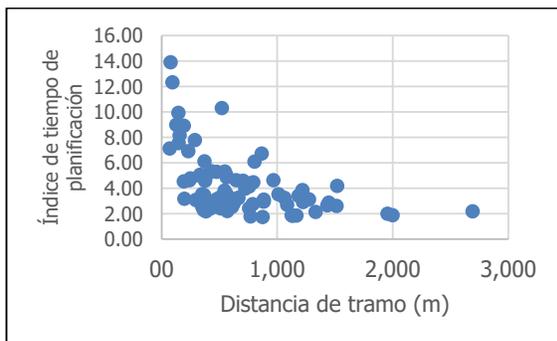


Figura 4. Índice de tiempo de planificación promedio en función de la distancia.

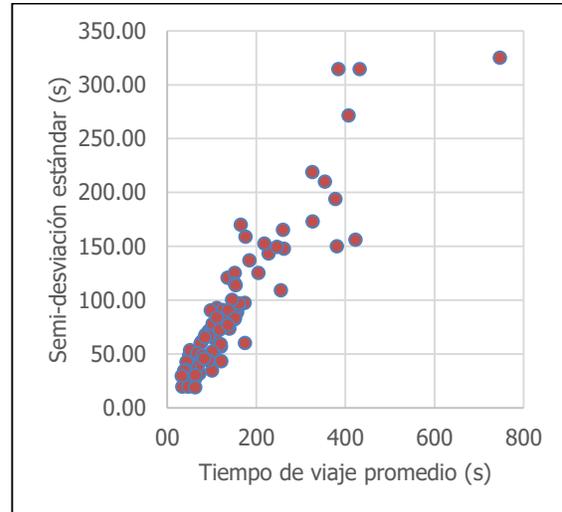


Figura 5. Semi-desviación estándar de las mediciones obtenidas en función del tiempo de viaje promedio (s).

Para cada uno de los indicadores, se asignaron las posiciones en las que quedaron cada uno de los 80 tramos. De manera posterior se asignaron puntajes a las diez peores posiciones, tal como se explicó anteriormente. A manera de ejemplo, el cuadro 3 muestra las posiciones para tres de los tramos respecto a 80 tramos analizados; con esta información, se calculan los puntajes para los tramos 55 -14, 39 - 15 y 9 -27 que obtuvieron 76, 71 y 37 puntos respectivamente, tal como se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 3. Posiciones por indicador de tres tramos tres tramos analizados respecto a los 80 tramos analizados

Indicador/Tramo	55 - 14	39 - 15	9 - 27
Distancia (m)	64	66	3
Tiempo Promedio (s)	80	79	46
Velocidad promedio(km/h)	79	80	18
Ventana Total (s)	79	80	18
Desviación Estándar (s)	80	77	11
Semi Desviación Estándar (s)	80	79	78
Variación Porcentual (%)	20	31	71
índice de simetría	32	43	75
Asimetría del tiempo de viaje	80	79	78
Ancho de tiempo de viaje	78	78	80
Índice Buffer	80	79	75
Índice de tiempo de planificación	64	66	3

Cuadro 4. Puntajes obtenidos por indicador para tres tramos analizados

Indicador/Tramo	55 - 14	39 - 15	9 - 27
Distancia (m)	0	0	0
Tiempo Promedio (s)	10	9	0
Velocidad promedio(km/h)	9	10	0
Ventana Total (s)	9	10	0
Desviación Estándar (s)	10	7	0
Semi Desviación Estándar (s)	10	9	8
Variación Porcentual (%)	0	0	1
índice de simetría	0	0	5
Asimetría del tiempo de viaje	10	9	8
Ancho de tiempo de viaje	8	8	10
Índice Buffer	10	9	5
Índice de tiempo de planificación	0	0	0

### Conclusiones

Cómo principal conclusión se logró aplicar indicadores operativos a partir de la información que generan los sistemas automáticos de localización de vehículos para la ruta estudiada y se lograron cuantificar aspectos operativos del servicio prestado. Estos resultados podrían promover la mejora del servicio si se atienden los tramos críticos del proyecto.

Para la ruta se determinaron tramos críticos, donde se presentaron altos índices de variabilidad en los tiempos de viaje como son el tramo que va de la Casa Presidencial hasta el centro de Zapote, las rotondas de Betania y de las Garantías Sociales, las cercanías de la Sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica, el Paseo Colón y la intersección de la Escuela República Dominicana. Los resultados coinciden con la experiencia del operador, confirmando los resultados obtenidos. El uso de sistemas de información geográfica permite la identificación espacial de los tramos más conflictivos y determinar si los mismos forman parte de un corredor en particular o si se encuentran conglomerados en un sector de la ciudad.

Se recomienda a los operadores del servicio y, especialmente al Consejo de Transporte Público, contar con especialistas en el área de transportes dentro de sus equipos de trabajo para poder dar un mayor y mejor uso de la información que diario generan estos sistemas automáticos.

La mejora del sistema de transporte público depende de la tecnificación y profesionalización tanto de los operadores como de la administración del servicio.

Se recomienda realizar un análisis funcional sobre los tramos críticos obtenidos. Una mejora en estos tramos representaría una disminución generalizada en la variabilidad de tiempos de viaje en la ruta, mejorando la calidad del servicio de la ruta analizada.

Se recomienda aplicar la metodología y algoritmos aquí aplicados a otras rutas, de manera que se puedan identificar tramos conflictivos en otras rutas, y mejorar el proceso de toma de decisiones por parte del Consejo de Transporte Público.

Por otra parte, se debe de investigar a fondo las variables que afectan la generación de los valores extremos registrados, estos bien pueden ser un resultado natural de los

sistemas de información utilizados (GPS, conexión a internet, calidad de servidores, etc.). Dicha conclusión requiere del análisis de especialistas en estas áreas.

El uso de estas grandes bases de datos recolectadas por los operadores puede representar la manera más eficiente de destinar recursos públicos a la mejora en un servicio público, mejorando la calidad de servicio de transporte público a la ciudadanía. Se recomienda instaurar por parte de la administración del servicio, planes piloto de análisis de datos de distintos operadores, y verificar si dichas mejoras en efecto se traducen a la mejora de la percepción del servicio por parte del usuario.

Finalmente, estos indicadores podrían ser de utilidad para evaluar la implementación de diferentes medidas de priorización de transporte público. Estas medidas deben responder a la implementación de una política integral de transporte que prioriza al transporte público sobre el transporte privado [14].

### Referencias

- [1] Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2018). *Informe estado de la nación 2018*. San José: Servicios Graficos AC.
- [2] Contraloría General de la República. (2015). *Consulta Nacional sobre Servicios Públicos*.
- [3] INECO. (Septiembre de 2011). *Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035*.
- [4] National Center for Transit Research. (2016). *Transit Service Reliability: Analyzing Automatic Vehicle Location (AVL) Data for On-Time Performance and Identifying Conditions Leading to Service Degradation*. Miami.
- [5] El-Geneidy, A., Horing, J., & Krizek, K. (2011). Analyzing Transit Service Reliability Using Detailed Data from Automatic Vehicular Locator Systems. *Journal of Advanced Transportation*, 1(45), 66-79.
- [6] Chavarría, M. A. (2018). *Uso del sistema de posicionamiento global (GPS) para determinar indicadores de operación relacionados con los tiempos de viaje del sistema de transporte especial de la Universidad de Costa Rica*. Proyecto de Graduación, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, San José.
- [7] Transit Cooperative Research Program. (2013). *Report 165. Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- [8] Asensio, J., & Matas, A. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(6), 1074-1085.
- [9] Feng, W. (2014). *Analyses of Bus Travel Reliability and Transit Signal Priority at the Stop-To-Stop Segment Level*. Portland State University, Civil and Environmental Engineering. Portland: PDXScholar.
- [10] Rojas Ocampo, L. (2018). *Tratamientos preferenciales para el transporte público en autobús y su aplicación en intersecciones de la Gran Área Metropolitana*. Universidad de Costa Rica, San José.
- [11] SHRP. (2013). *Guide to Incorporating Reliability Performance Measures into the Transportation Planning and Programming Processes*. National Academy of Sciences.
- [12] Lomax, T., Schrank, D., Tumer, S., & Margiotta, R. (2003). *Selecting Travel Reliability Measures*.
- [13] Durán, E. (2016). *Caracterización de la variabilidad del tiempo de viaje en la ciudad de Santiago*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención transporte, Universidad de Chile, Ingeniería Civil, Santiago.
- [14] Chaves-Flores, G., & Hernández-Vega, H. N. (2015). Desempeño y calidad de servicio del sistema de autobuses externos de la Universidad de Costa Rica. *Revista Infraestructura Vial*, 17(30), 13-22.