

Análisis basado en optimización de externalidades negativas del servicio de transporte público urbano: Un caso de estudio

Optimization-based analysis of negative externalities of urban public transport service: A case study

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.15>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 12/04/2021. Fecha de Aceptación: 10/08/2021.

John Paúl Reyes-Vásquez 


Universidad Técnica de Ambato. Ambato (Ecuador)
johnpreyes@uta.edu.ec

Darwin Santiago Aldás-Salazar 

Universidad Técnica de Ambato. Ambato (Ecuador)
darwinsaldas@uta.edu.ec

César Medardo Mayorga-Abril 

Universidad Técnica de Ambato. Ambato (Ecuador)
cesarmmayorga@uta.edu.ec

Mery Esperanza Ruiz Guajala 

Universidad Técnica de Ambato. Ambato (Ecuador)
meryeruiz@uta.edu.ec

Mayra-Stephanie Barahona Sánchez 

Consultora Independiente. Ambato (Ecuador)
mayra.sbs@hotmail.com

Para citar este artículo

J. Reyes-Vásquez, D. Aldas Salazar, C. Mayorga Abril, M. Ruiz Guajala & M. Barahona Sánchez, “Análisis basado en optimización de externalidades negativas del servicio de transporte público urbano: Un caso de estudio”, *INGE CUC*, vol. 17, no. 2, pp. 1–11, 2021. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.15>

Resumen

Introducción— Utilizando los principios de movilidad sostenible para el transporte público urbano, en la presente investigación se modela y resuelve un problema de optimización de externalidades negativas del servicio de transporte público como: congestión, cambio climático, contaminación del aire, ruido y accidentes de tránsito, planteando la posibilidad de minimizar los costos sociales variables.

Objetivo— Plantear y resolver un modelo de optimización de externalidades negativas en un sistema de transporte de la ciudad de Ambato- Ecuador.

Metodología— Para el modelado y solución del programa se toma como base el modelo de Ngamchai y Lovell, programado en el software LINGO, se aplica en el sistema que cuenta con 5 operadoras, 22 líneas y 397 unidades de buses.

Resultados— A través de los resultados obtenidos se logra disminuir el costo total para la operación del sistema de transporte de \$ 8910.72 a \$ 6608.39 por unidad por hora, esto implica una reducción del 25.9% con las consideraciones individuales del headway (separación en tiempo entre vehículos) para cada una de las líneas que lo conforman, se logra disminuir además la flota utilizada actualmente en un 21%.

Conclusiones— La investigación deja abierta la posibilidad de plantear futuros estudios que busquen estrategias que permitan mitigar cada una de las externalidades desde una perspectiva técnico-económica de sostenibilidad medioambiental.

Palabras clave— Modelos matemáticos; transporte público; externalidades; movilidad sostenible; optimización

Abstract

Introduction— Using the principles of sustainable mobility for urban public transport, this research models and solves a problem of optimization of negative externalities of the public transport service such as congestion, climate change, air pollution, noise and traffic accidents, raising the possibility of minimizing the variable social costs.

Objective— The study was carried out in Ecuador, in the transportation system of the city of Ambato, which has 5 operators, 22 lines and 397 bus units.

Methodology— The Ngamchai and Lovell model, programmed in LINGO software, is used as the basis for the modeling and solution of the program.

Results— Through the results obtained, the total cost for the operation of the transportation system was reduced from \$ 8910.72 to \$ 6608.39 per unit per hour, which implies a reduction of 25.9% with the individual considerations of the headway (separation in time between vehicles) for each of the lines that comprise it, and the fleet currently used is also reduced by 21%.

Conclusions— The research leaves open the possibility of proposing future studies that seek strategies to mitigate each of the externalities from a technical-economic perspective of environmental sustainability.

Keywords— Mathematical models; public transportation; externalities; sustainable mobility; optimization



I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado, el aumento de las distancias para el desplazamiento territorial generan una mayor demanda de movilidad y uso de transporte [1], haciendo de los vehículos una fuente crucial de externalidades negativas y positivas [2], [3]. En la actualidad, tanto las grandes como las pequeñas ciudades buscan optimizar sus sistemas de transporte público urbano a través de modelos que permitan reducir los tiempos de transferencia y los impactos ambientales [4]. La planificación de los nuevos sistemas de transporte se las realiza enfocadas en la sostenibilidad social, económica y medioambiental orientada a sistemas complejos [5], [6]. Las externalidades asociadas con el uso de automóviles hoy en día incluyen la contaminación local y global, la dependencia del petróleo, la congestión vehicular y la vida humana misma [7]. La contaminación, ruido, tráfico y otros factores aún no han sido explícitamente examinados por décadas en la literatura económica. Las externalidades negativas del transporte no son fenómenos aislados, más bien están interrelacionados y pueden organizarse jerárquicamente según las relaciones entre ellos para que se asignen determinadas políticas públicas y se aborden con mayor eficacia los impactos negativos [8].

La discusión de fondo de la idea económica de las externalidades proporciona una visión conceptual del término dentro del marco de la teoría costo–beneficio para proporcionar al sistema de transporte convencional inteligencia, flexibilidad y sostenibilidad medioambiental [6]. Si a un estudio de transporte, no se le incorporan externalidades en los precios, se puede afirmar que se ha asignado implícitamente un valor de cero, un número incorrecto, ya que varios son los efectos que pueden tornarse en valores económicos representativos contrarios al beneficio del uso vehicular [9]. Existe teorías que motivan los incentivos como mecanismos socio-económicos para combatir las externalidades del transporte y la gestión adecuada de las emisiones [10], otros utilizan como una excelente estrategia la movilidad colaborativa permitiendo reducir de forma significativa los impactos ambientales del transporte [11]. Finalmente hay otros modelos, especialmente en Latinoamérica que utilizan sistema de subsidios para los usuarios [12].

Varios investigadores han aplicado diferentes métodos matemáticos para optimizar el costo del transporte, teniendo en cuenta principalmente el efecto nocivo que este proporciona al medio ambiente por la emisión de gases de efecto invernadero y residuales [13]. Investigadores del Instituto Tecnológico de Israel estudian el diseño general de sistemas de transporte desde la arquitectura de las redes, pasando por el análisis de frecuencias para unidades, hasta la asignación de horarios y personal para operar el sistema [14].

Los problemas de externalidades por congestión se pueden solucionar planificando una ruta óptima y horario, aumentando la velocidad promedio, reduciendo la distancia entre los puntos de parada o siendo capaces de controlar el servicio sin reducir la calidad. Importantes estudios muestran claramente que deben adoptarse diversas medidas para moderar los resultados dañinos de la incesante e indiscriminada escalada de la amenaza del tráfico masivo en muchas ciudades del mundo [15]. Otra alternativa para optimizar los sistemas de transporte publico son analizar los modos de transporte que respondan a la demanda como bicicletas, viajes compartidos, autos autónomos y ampliar la cobertura de los recorridos de autobuses y la implementación de políticas y estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas [16], [17], [18].

Dentro de la temática de la Universidad Estatal de Arizona los investigadores enfocan su estudio en las formulaciones matemáticas del Problema de Diseño de Redes de Tránsito-TNDP, buscando configuraciones de rutas de tránsito y frecuencias apropiadas [19]. La Universidad de Maryland ha desarrollado modelos matemáticos orientados al subsistema táctico, considerando que en la mayoría de ciudades en desarrollo ya existen redes de transporte que requieren optimizar frecuencia de sus servicios e itinerarios de operación [20], [21]. Otros modelos como el desarrollado por Universidad de la República (Uruguay), agrupan el diseño general del conjunto de recorridos y valores de frecuencias, en una forma de optimizar los beneficios del usuario y los operadores sintetizando la información geográfica y demanda [22]. Los autores coinciden en que la aplicación de modelos de optimización del transporte se orienta a disminuir el costo de operación logística y por ende a la reducción de externalidades negativas presentadas en el servicio de movilidad.

El resto del artículo se ha estructurado de la siguiente manera. La sección 2 identifican los fundamentos teóricos. La sección 3 presenta la metodología de investigación adoptada en este estudio. La sección 4 presenta los resultados y las discusiones llevadas a cabo. Las conclusiones, limitaciones e implicaciones futuras del estudio se presentan en la sección 5.

II. MARCO TEÓRICO

La ingeniería de transporte se orienta a la planeación, diseño, ejecución y administración de proyecto con tendencia a mejorar las vías y los sistemas de transporte públicos. Teniendo claro la concepción integral de la movilidad, con una visión orientadora de la capacidad de acoplarla al ordenamiento territorial y desarrollo urbano, se usan métodos y metodologías las cuales permiten la integración de sistemas de valor al alcance de los usuarios [23]. Las actividades desarrolladas en el proceso de planeación de transporte urbano, se agrupan en tres subsistemas; el subsistema estratégico se encarga del diseño de la red conjuntamente con la asignación de demandas, el subsistema táctico determina la flota con su frecuencia e itinerarios de servicio, y el subsistema de planificación operacional maneja la asignación de vehículos y operadores [24]. La presente investigación toma como fundamento teórico los siguientes conceptos:

A. Costos generados por el transporte

Los costos del transporte público son un factor de decisión importante a la hora de elegir el diseño del sistema y planificar la red o el horario [25]. Se considera exhaustivamente el costo de viaje del pasajero, que incluye el costo de espera y viaje en el autobús y el costo de transferencia entre estos dos modos de transporte, estos estudios utilizan algoritmos genéticos que determina las frecuencias óptimas de operación del autobús alimentador bajo estrictas condiciones de restricción [26].

El transporte es un eslabón estratégico para la satisfacción de necesidades sociales y económicas. Es importante notar que los efectos de una acción determinada no siempre están reflejados en los precios de un mercado sino también en políticas de precios emergentes, incluidos los peajes por congestión y seguros [7]. Los costos de transporte pueden ser fijos y variables, en la [Tabla 1](#) se observa de una manera más detallada su clasificación.

TABLA 1. COSTOS DEL TRANSPORTE DE CARRETERA.

Detalle		Costos Fijos	Costos Variables
Costos Privados	Costos Internos	Precio de Adquisición	Combustible
		Permisos de circulación	Impuestos por circulación
		Mantenimiento fijo	Mantenimiento Variable
Costos Sociales o Públicos	Costos Administrativos	Construcción de vías	Mantenimiento Vial
		Planificación	Planes de Movilidad
		Construcción	Iluminación y Seguridad
	Costos Sociales o Externalidades	Biodiversidad y Paisaje	Accidentes
		Ocupación de espacios	Ruido
			Congestión
		Uso de energía	Contaminación Ambiental
	Cambio Climático		

Fuente: Autores.

Las externalidades son decisiones de consumo, que llegan a afectar o beneficiar a terceros, sin que los mismos participen en una acción directa. El transporte urbano posee externalidades positivas y negativas, entre las positivas se destaca la plusvalía del sector al cual transporte urbano tiene acceso, mientras que las externalidades negativas, se relacionan principalmente con los accidentes de tránsito, la contaminación del aire, el cambio climático, el ruido y la congestión vehicular [2]. Existen estudios que consideran en los costos de transporte variables como: longitud del tramo de cada ruta de servicio de buses, promedio de vehículos por intersección, tiempo y velocidad de congestión [27].

Las redes de transporte son un apoyo visual y conceptual que muestra las relaciones entre las componentes de un sistema. Se encuentran compuestas principalmente por enlaces y nodos, mismos que son denominados de manera específica; las paradas reciben el nombre de nodos de la red y cada una de las flechas que aparecen entre los nodos, son denominados arcos de red [13].

B. Modelos de optimización

Para obtener un desempeño adecuado de los servicios de transporte, se deben utilizar modelos que optimicen los mismos. Varios estudios de optimización tienen como objetivo principal maximizar la utilidad de los vehículos para transporte y minimizar la longitud de ruta [28], los modelos deben estar coordinados con las rutas de alimentación y las frecuencias y horarios de los autobuses, así como también con el tránsito principal. Dichos modelos se desarrollan simultáneamente utilizando también algoritmos genéticos.

Dentro del modelo, la función objetivo se adopta como minimización de los costos del usuario y del operador. El costo del usuario es la suma del costo de tiempo en el vehículo y el tiempo de transferencia. El costo del operador es asociado con el costo de funcionamiento [29], otros modelos se basan en minimizar los gastos de viaje de los pasajeros y el costo del operador [26]. Otros modelos utilizan supuestos de muchos a muchos, en el que varias paradas de autobús son atendidas por múltiples rutas. Este modelo se denomina problema de diseño de red de bus de alimentación con entrega dividida reduciendo los gastos de viaje generalizados de los pasajeros y optimizando la estructura de la red [30].

La planificación del correcto funcionamiento de unidades de transporte masivo incorpora análisis estratégicos, tácticos y operacionales, que engloban varios costos a ser considerados. Si bien se promociona al uso del transporte público como opción adecuada para evitar la congestión por vehículos particulares, este debe cumplir con un servicio de calidad mediante la movilización de determinadas unidades en un tiempo establecido. Como punto referencial para el estudio se consideran modelos que incorporan entre sus variables de decisión; el costo y estructura de la red, la demanda, las frecuencias de las unidades y el interés de operadores y usuarios. En la [Tabla 2](#) se muestran varios modelos desarrollados anteriormente, y las características mínimas usadas en su correcta aplicación.

TABLA 2. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN Y SUS CARACTERÍSTICAS.

Modelo	Nivel	Objetivos	Consideraciones
Ceder y Wilson (1986)	Estratégico	Determinación de recorridos óptimos.	Diferencia entre tiempos reales y óptimos de viaje, espera y transbordos.
	Táctico	Establecimiento de frecuencias.	
Baaj y Mahmassani (1991)	Táctico	Minimización del tamaño de la flota.	Tiempos de viaje, espera y transbordos.
Ngamchai y Lovell (2003)	Táctico	Optimización de frecuencias.	Demanda, costo de operación, headway y distancia entre nodos.
Fan y Machehl (2004)	Estratégico	Mejor diseño de rutas.	Considera el número de unidades y el flujo crítico entre orígenes y destinos.
	Táctico	Mejores frecuencias.	

Fuente: Autores [14], [19], [20], [21].

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará la metodología con enfoque mixto propuesta por Universidad de Maryland [20], y la Universidad del Sur de Florida [21]. En primer lugar, se lleva a cabo un estudio de literatura sobre de modelos de optimización en transporte considerando externalidades negativas. Seguidamente, se realiza una observación de campo para recopilar información de transporte, tomando en cuenta que el transporte público en Ecuador las rutas y frecuencias son de propiedad exclusiva del estado, y pueden ser comercialmente explotadas mediante contratos de operación [31]. También se realizan mediciones de aspectos ambientales. Luego, se analiza modelos matemáticos que consideren externalidades negativas para el transporte público urbano en una localidad específica de Ecuador. Finalmente, se aplica y valida el modelo propuesto y se analiza los resultados obtenidos a través de software LINGO.

A. Levantamiento de información

En el cantón Ambato la movilidad pública es otorgada como un servicio por entes privados (socios de cooperativas), pero la regulación de rutas y tarifas está a cargo de entidades gubernamentales. La Dirección de Transporte, Tránsito y Movilidad del Gobierno Provincial de Tungurahua en Ecuador, tiene como competencia la regulación de uso de las rutas y frecuencias en la operación del servicio de transporte terrestre público de pasajeros de la ciudad de Ambato.

Actualmente operan 21 líneas de transporte urbano, numeradas del 1 al 22, ya que ninguna línea maneja la numeración 13, se dispone de una flota con 397 unidades (buses), que cumplen rutas establecidas por línea cumpliendo su servicio en una única línea y operadora. En la [Tabla 3](#) se presenta las operadoras con sus respectivas líneas de funcionamiento y características generales como tiempo promedio de recorrido y número de paradas preestablecidas.

TABLA 3. LÍNEAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO DE LA CIUDAD DE AMBATO.

Cooperativas de Transporte Urbano de Ambato	Rutas		Línea N#	Número de Unidades	Distancia (Km)	Tiempo promedio de Recorrido		Número de Paradas Prestablecidas
	Referencial inicial	Referencial final				(h: min: s)	Horas	
Cooperativa de transporte Los Libertadores	Techo Propio	Andiglata	1	11	37.40	1:47:37	1.79	57
	La Florida	Cashapamba	2	22	26.70	1:25:17	1.42	62
	La Península	Las Orquídeas	3	11	38.10	1:39:55	1.67	78
	Seminario Mayor	Ingahurco Bajo	4	11	37.50	1:47:12	1.79	75
	Tangaiche	Macasto-Pondoa	5	10	38.50	1:42:10	1.70	73
Cooperativa de Transportes Tungurahua	La Libertad	Miraflores	6	10	38.70	1:51:14	1.85	77
	Letamendi	El Mirador	7	20	40.70	2:17:12	2.29	108
	Montalvo	El Recreo	8	18	32.40	1:35:13	1.59	110
	Huachi el Progreso	Izamba-Quillán	9	29	62.70	2:12:11	2.20	112
	Barrio Solís	Augusto N. Martínez	10	26	63.40	1:49:55	1.83	82
	Pucarumí	Tiugua	11	12	34.10	2:00:05	2.00	78
	La Libertad	Centro	12	11	38.70	1:55:00	1.92	72
Cooperativa de Transporte Urbano Unión Ambateña	Ficoa	Totoras	14	19	36.00	2:42:18	2.71	44
	Ficoa	Totoras	14	15	36.00	2:30:10	2.50	46
	La Joya	Parque Industrial	15	25	37.50	1:45:00	1.75	75
	Pinllo	Nueva Ambato	16	16	20.97	1:41:28	1.69	78
	Picaihua	Cdla. España	17	16	26.50	0:58:15	0.97	58
Cooperativa Vía Flores	San Juan	Barrio Amazonas	18	15	36.00	1:40:10	1.67	65
	San Pablo	Plaza Pachano	19	22	54.50	2:10:00	2.17	58
Compañía Jerpazsol	Juan Benigno Vela	Ex Redondel de Izamba	20	23	58.60	2:30:25	2.51	86
	Manzana de Oro	Puerto Arturo	21	28	42.70	2:01:58	2.03	86
	Los Ángeles	Izamba	22	27	36.70	1:43:28	1.72	78

Fuente: Autores.

Ambato por su relieve territorial y construcción centralizada, no cuenta con estaciones de gran tamaño, pero existen paradas establecidas que se identifican gracias a pequeñas estructuras y señalética localizada donde los autobuses pasan hacia su destino y regresan por los mismos puntos hacia la partida, y en ocasiones se evidencia que varias unidades de la misma línea se encuentran al mismo tiempo en un intervalo de espera antes de partir al servicio. En el presente estudio se consideran 36 nodos, por los cuales todas las líneas cumplen su recorrido formando un total de 100 posibles arcos de traslado que permiten cubrir el amplio territorio urbano del cantón en todas las direcciones. En la Fig. 1 se muestra la red aplicada en el sistema de transporte, que en conjunto con la Tabla 4 permite notar las paradas de intersección (nodos).

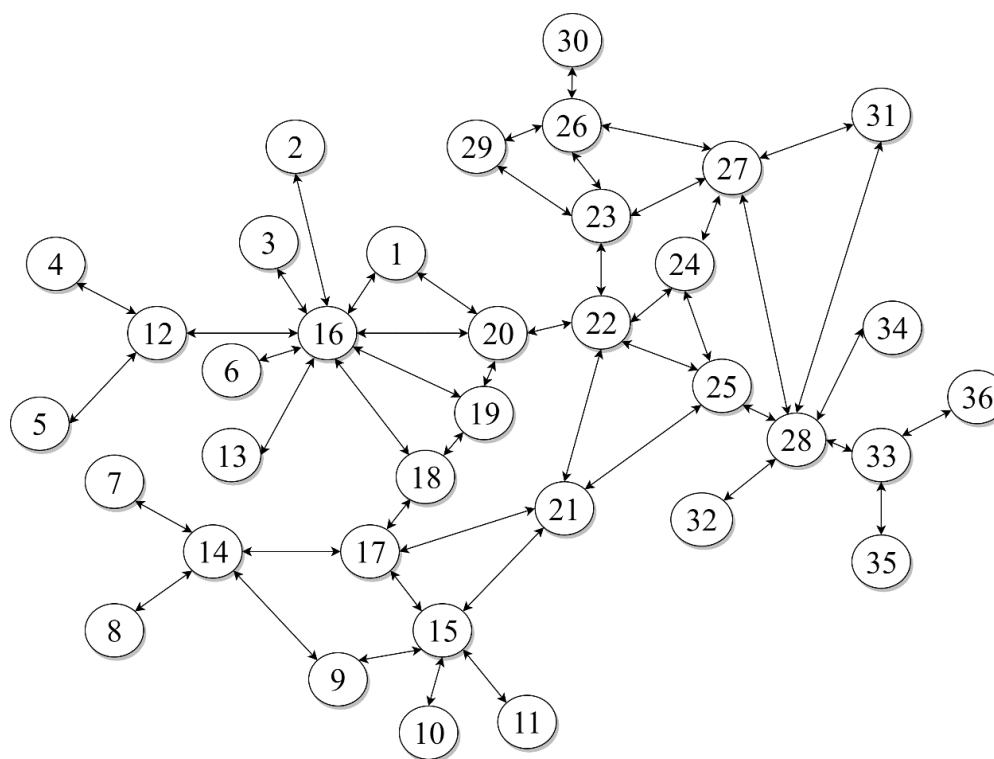


Fig. 1. Red de representación del transporte público urbano de Ambato.
Fuente: Autores.

TABLA 4. DESCRIPCIÓN Y NUMERACIÓN DE NODOS DEL SISTEMA.

Descripción del Nodo	N#
Av. José Peralta y Gustavo Lemos	1
Unidad Educativa Huayna Cápac	2
Av. Gabriel García Mogrovejo y Julio Andrade	3
Cemeag / Huachi La Libertad	4
Parque Central de Montalvo	5
...	...
Pucarumi o Quillan Loma Alto	36

Fuente: Autores.

Así, en términos del mayor volumen de demanda de los clientes del sistema, la gran demanda del transporte público urbano es evidente, al ser Ambato capital provincial concentra el comercio en su territorio céntrico, lo que hace necesario el uso de una red de transporte interconectado, que permita el transbordo de pasajeros entre unidades de diversas líneas. En promedio se trasladarán 91 pasajeros en cada unidad en hora pico, superando la capacidad nominal de 80 personas en una unidad Bus Tipo I. Es necesario optimizar frecuencias, considerando un factor de carga óptimo, sin dejar fuera la necesidad de traslado de los usuarios y la calidad de servicio.

Normalmente el transporte urbano opera de 5h 30 a 22h 00, es decir un total de 16 horas con 30 minutos. Actualmente el sistema de transporte público se maneja con parámetros individuales colocados por las cooperativas y orientados netamente al cliente. Con evidencia

de cada ruta una y el armado correspondiente mediante arcos, se desarrolla la matriz de distancias origen destino D_{ij} . Igualmente considerando la demanda actual se arma la matriz $Q = \{q_{ij}\}$. En la **Tabla 5** se ejemplifica la estructura de las mencionadas matrices.

TABLA 5. ESTRUCTURA DE LAS MATRICES ORIGEN-DESTINO.

		Destinos									
		1	11	12	13	14	15	16	17	...	36
Orígenes	1	-	-	-	-	-	-	53	-	-	-
	...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	-	-	-	-	-	36	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-	-	265	-	-	-
	13	-	-	-	-	-	-	36	-	-	-
	14	-	-	-	-	-	-	-	413	-	-
	15	-	24	-	-	-	-	-	15	-	-
	16	55	-	361	31	-	-	-	152	-	-
	17	-	-	-	-	327	33	152	-	-	-
	...	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autores.

B. Planteamiento del modelo matemático

Como punto de partida para la elaboración del modelo matemático, se debe describir el problema de estudio conforme las interrogantes de investigación detalladas a continuación:

- 1) ¿Existen un conjunto de líneas establecidas, con paradas y nodos conocidos?
- 2) Para resolver el modelo planteado se determinó puntos de orígenes y destinos, sin embargo, al ser Ambato una ciudad
- 3) ¿Las líneas no pasan más de una vez por la misma parada de su recorrido, en la misma dirección?
- 4) ¿La detención en paradas distintas separadas por una distancia nula entre sí, se asumen como detenciones en una misma parada?
- 5) ¿Los buses disponibles en flota, prestan servicios en una única línea?
- 6) ¿El número de pasajeros que esperan abordar en una parada nunca superan la capacidad disponible de una unidad (bus)?
- 7) ¿ Los tiempos de separación entre vehículos (Headway) son homogéneos entre todas las unidades del mismo recorrido?
- 8) ¿Nunca se encuentran dos unidades de la misma línea en la misma parada?
- 9) ¿El servicio opera en el horario asignado con intervalos entre unidades constantes a lo largo del tiempo?

El modelo de transporte para optimizar frecuencias y horarios de movilidad es necesario, teniendo en cuenta la reducción de costos. La función objetivo de la presente investigación se enfoca en proporcionar un modelo que plantea la posibilidad de minimizar los costos sociales variables o externalidades negativas del transporte público urbano de la ciudad de Ambato, mediante un eficiente control administrativo. Se toma como base el modelo de la Universidad de Maryland [20], y se plantea un modelo incluyendo el costo del tráfico conjuntamente con el valor por la internalización del costo del ruido y la contaminación ambiental. En (1) se puede visualizar la función objetivo.

$$\min(Z) = CF + UVF + UWC + CT + CIE \quad (1)$$

Donde:

CF	:	Costo de flota
UVF	:	Costo del usuario
UWC	:	Costo de esperas
CT	:	Costo del tráfico
CIE	:	Costo de internalización de externalidades

En esta etapa, el costo correspondiente a la flota se considera a partir del costo de operación de una unidad por hora (C_v), en relación con la frecuencia de cada una de las rutas y fijando un valor constante a la velocidad en la cual operan las unidades en el sistema. En (2) se observa el planteamiento de este parámetro perteneciente a la función objetivo.

$$CF = \frac{2C_v}{V} \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k} \quad (2)$$

Además, en (3), se evidencia el costo que experimenta el usuario para poder movilizarse. Este valor es establecido por el método del coste de sustitución, mismo que permite denotar un valor monetario por el tiempo de una hora en la cual el usuario estará sobre la unidad (γ_v), incluyendo el valor de \$ 0.30 que se cancela como pasaje para poder acceder al servicio. Se considera el salario básico unificado vigente en el país al momento del estudio.

$$UVF = \frac{\gamma_v}{V} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N q_{ij} D_{ij} \quad (3)$$

Por otra parte, hoy en día, en la operación de los sistemas de transporte público se maneja horarios, por lo cual se busca no dejar de lado la atención personalizada que se debe prestar en cuanto a tiempos y disponibilidad, reduciendo las esperas de los usuarios. Con (4) se calcula el costo de esperas, considerando el coeficiente del valor subjetivo de los usuarios por el tiempo de espera durante una hora (γ_w).

$$UWC = \frac{\gamma_w}{2} \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N q_{ij} \alpha_{ijk} h_k \quad (4)$$

La ecuación 5 es la fórmula relacionada con el costo que implicaría al sistema el experimentar situaciones de tráfico. El tráfico no es únicamente desencadenado por la circulación de unidades de transporte público, por lo cual se busca determinar un valor de la ocurrencia del evento por históricos de la hora pico en los cuales la velocidad de circulación de las unidades es mucho más baja. Igualmente se determina que mientras más personas se encuentren en el embotellamiento mayor es el costo experimentado, limitando la capacidad en la cual deben operar las unidades.

$$CT = KL\gamma_x \left(\frac{1}{V_c} - \frac{1}{V} \right) \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{D_{ij} \alpha_{ijk}}{h_k} \quad (5)$$

Este modelo considera dimensiones del paradigma del desarrollo sostenible [11]. El cálculo realizado para el costo de la internalización de externalidades de ruido y contaminación ambiental es evidenciado en (6). Se considera la disposición a pagar por ciudadano anualmente para atenuar efectos negativos que presenta el servicio de transporte público.

$$CIE = (\gamma_y + \gamma_z) \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{q_{ij} \alpha_{ijk}}{h_k} \quad (6)$$

En cuanto al Headway como principal variable de decisión del estudio, (7) considera el costo de operación y la demanda de cada uno de los puntos origen y destino, mientras (8) limita el headway en dos unidades de una línea como máximo operando en el mismo arco.

$$h_k \geq \sqrt{\frac{4 d_k C_v}{V \gamma_w \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk}}} \quad (7)$$

$$h_k \geq \frac{2t_u + d_{ij} \alpha_{ijk}}{2V} \quad (8)$$

Basado en lo mencionado anteriormente, en el modelo matemático de optimización planteado, se considera la demanda y velocidad en congestión de una hora pico. Los recorridos que actualmente son manejados en el transporte público urbano no son variados. Las frecuencias de operación se modificarán de acuerdo con la necesidad del servicio y la relación costo beneficio, considerando las externalidades negativas y los retardos que pueden llegar a presentarse en la movilidad de pasajeros. Los coeficientes de costo y valores establecidos se identifican como:

K	:	Capacidad del bus.
F	:	Factor de Carga.
V	:	Velocidad promedio de los buses en la red.
V_c	:	Velocidad promedio de los buses en la red durante un periodo de congestión.
C_v	:	Costo de operación de una unidad (bus) por hora.
t_u	:	Longitud de una unidad de bus tipo I.
γ_v	:	Coeficiente que refleja el valor subjetivo de los usuarios por el tiempo de viaje en vehículo.
γ_w	:	Coeficiente que refleja el valor subjetivo del tiempo de espera percibido por los usuarios.
γ_x	:	Coeficiente que refleja el valor subjetivo del tiempo de espera percibido por los usuarios causado por congestión vehicular.
γ_y	:	Coeficiente que refleja el valor de internalización del costo del ruido.
γ_z	:	Coeficiente que refleja el valor de internalización del costo de la contaminación ambiental.
d_k	:	Longitud del recorrido de la línea k .
D_{ij}	:	Longitud del camino considerado entre el origen i y el destino j .
$Q = \{q_{ij}\}$:	Las demandas de origen-destino pueden representarse como una matriz simétrica donde es la demanda de pasajeros desde el origen hasta el destino j . Las entradas diagonales son 0 y si $i \neq j$ siempre se evidenciara que $q_{ij} = q_{ji}$. Se considerada una velocidad constante del sistema.
α_{ijk}	:	Es igual a 1 si el flujo $i - j$ comienza su ruta en la línea k , o si es transferido a la misma, 0 en caso contrario.
h_k	:	Headway de la ruta manejada por la línea k .

C. Parámetros del Modelo. Velocidad promedio de los buses en la red

En el modelo matemático propuesto en este estudio, el parámetro de la velocidad puede ser una fuente de riesgo y perturbación debido a su naturaleza aleatoria. El 99.9% de las vías del cantón Ambato son asfaltadas, y presentan una calidad muy favorable para la circulación, al no tener baches y obstáculos que interrumpan el flujo vehicular. El ancho de las vías es variable debido a la trama urbana, por tanto, el ancho mínimo de carril es de 3.00 m y máximo de 5.00 m. Las velocidades de circulación muchas veces se ven afectadas por las interferencias en el camino, pero esta también se limita por normativas aplicadas en el país.

La Agencia Nacional de Tránsito con el objetivo de reducir siniestros, establece la regulación de velocidades para el transporte público de pasajeros. El límite de velocidad máxima en el sector urbano de 40 km/h y el rango moderado de 40 a 50 km/h; en el sector perimetral de 70 km/h y el rango moderado de 70 km/h a 100 km/h; en las rectas de las carreteras de 90 km/h y el rango moderado de 90 km/h a 115 km/h; y en las curvas de las vías de 50 km/h y el rango moderado de 50 km/h a 65 km/h [31]. Teniendo en cuenta que el estudio se realiza para el transporte público urbano se utiliza una velocidad de 25.00 km/h [32].

C. Parámetros del Modelo. Costo de operación de una unidad por hora

El objetivo económico de la función objetivo es minimizar los costos operativos y estratégicos. A partir de ello, en un análisis general de precios para unidades con un chasis Hino AK y diferentes carrocerías, se evidencia un valor de \$109 840.00, por una unidad que operara 15 años, 12 horas diarios los 365 días. En cuanto a seguros e impuestos se considera; impuesto a la propiedad de los vehículos, impuesto ambiental a la contaminación vehicular, las tasas ANT, impuesto al rodaje y el rubro correspondiente al Sistema Público para Pago de Accidentes de Tránsito (SPPAT), todos con sus respectivas exenciones dan un valor de \$255.00. El valor correspondiente a los conceptos por costo de garaje cuando la unidad se encuentra inactiva es de \$50.00. Para el valor de recurso humano de operación se toma en cuenta el salario de un chofer profesional establecido en \$605.62 mensuales, se estipula el contrato de dos choferes por unidad para laborar un mes de 30 días, 12 horas diarias con horarios rotativos. En cuando a mantenimientos se denotan los elementos mayormente remplazados como mantenimiento general, el tiempo estimado entre reposiciones, y el costo referencial por elemento en el mercado, teniendo como resultado un valor de \$1.2937 por hora. En el caso de llantas se estima el costo del juego y su periodo de duración. En la [Tabla 6](#) se observa el detalle de cada uno de los costos involucrados para la operación de una unidad y el costo total de poner en funcionamiento la misma durante una hora (C_v).

TABLA 6. DETALLE DE COSTO DE OPERACIÓN POR HORA

Descripción del Rubro	Valor
Costo capital por unidad	\$ 1.6718
Seguro o Impuesto	\$ 0.0582
Estacionamiento del vehículo	\$ 0.1389
Valor del Recurso Humano	\$ 4.6567
Mantenimiento	\$ 1.2937
Combustibles	\$ 6.0291
Lubricantes	\$ 0.2445
Llantas	\$ 0.8730
Sub Total	\$ 14.9659
Costo de operación total de una unidad por hora	\$ 16.4625

Fuente: Autores.

IV. RESULTADOS

En esta sección, se aborda un modelo de planificación de rutas lineal entero mixto para disminuir el costo total de la operación del sistema de transporte urbano. La programación del modelo matemático de optimización comienza con la declaración de la función objetivo, que el presente caso llevara una antelación de la palabra reservada MIN. Para modelos de gran tamaño LINGO maneja la opción de establecer conjuntos, en caso de que los datos posean las mismas características y se requiera una escritura sintetizada de la problemática. Los conjuntos (sets) son establecidos manejando la sintaxis que expresa a los conjuntos como: ck/L1..L22/d,h,;

Nuestro modelo matemático se resuelve asignando valores a ciertos atributos de conjunto. LINGO, aunque permite el manejo de información programada dentro del mismo software, también presenta la opción de interoperabilidad con hojas de cálculo en las cuales es más fácil el proceso de organizar información. En la presente investigación se usa el enlace de vinculación e incrustación de objetos (OLE) en tiempo real a Excel. Se presenta la programación del modelo:

```

MODEL:
Sets:
ck/L1..L22/:d,h;
ci/O1..O36/;
cj/D1..D36/;
Mq(ci,cj):q;
endsets

Data:
d=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','distanciaruta');
q=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','matrizdemanda');
di=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','matrizdistancias');
a=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','a');
b=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','b');
c=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','cc');
e=@Ole('MODELO MSBS.xlsx','e');
@Ole('MODELO MSBS.xlsx','headway')=h;
enddata

min=(a*@sum(ck(k):d(k)/h(k)))+(b*@sum(Mq(i,j):(q(i,j))*di(i,j)))+(c*@sum(SE(k,i,j):q(i,j)*s1(k,i,j)*h(k)))+(80*0.60*df*@sum(SE(k,i,j):(di(i,j)*s1(k,i,j))/h(k)))+(g*@sum(SE(k,i,j):(q(i,j)*s1(k,i,j))/h(k)));

@for(ck(k):h(k)>=@sqrt((e*@sum(ck(k):d(k)))/(f*@sum(SE(k,i,j):q(i,j)*s1(k,i,j))));
@for(SE(k,i,j):h(k)>=((2*0.01196)+(di(i,j)*s1(k,i,j))/(2*25.00)));
END
    
```

Los resultados indicaron que la programación lineal entera mixta fue bien elegida para hacer frente a la aleatoriedad. El sistema público promueve la interconectividad total con una calidad de servicio del abastecimiento de unidades. Se establece el headway de operación requerido para satisfacer la demanda en una hora pico de movilidad. En la [Tabla 7](#) se muestra el headway calculado de cada una de las líneas. Al realizar una comparación entre las frecuencias en hora pico establecidas por el contrato de operación y las frecuencias optimas calculadas mediante el modelo de optimización, se puede evidenciar varios cambios.

- 1) En las líneas 1, 8 y 17, se recomienda el manejo de un headway mayor al actual, haciendo que todas las líneas disminuyan el despliegue de dos unidades cada por hora pico.
- 2) Para líneas 2 y 7 se establece un intervalo entre buses 5.76 y 8.57 minutos respectivamente, disminuyendo 5 unidades por hora en comparación con su frecuencia actual de operación.
- 3) Las líneas 3, 4, 21 y 22, maneja actualmente un headway corto, que otorga 3 unidades más de las requeridas para abastecer correctamente al sistema.
- 4) En varias líneas también se maneja una frecuencia que no satisface la demanda de la ruta, este es el caso de las líneas 5, 6, 12 y 18, en las cuales se recomienda disminuir el headway y aumentar 3 unidades en la circulación de cada ruta por hora. Se recomienda también disminuir el intervalo de tiempo entre unidades de la línea 12, ya que para abastecer al sistema se requiere una frecuencia de 8 unidades por hora, número mayor a las 6 actualmente utilizadas.
- 5) El headway recomendado para la línea 9 es 7.44 minutos, actualmente opera con un headway de 4 minutos lo que hace que se desplieguen 7 unidades más de las requeridas por hora pico. El mismo caso se presenta en la línea 10 que ahora opera con una sobrecarga de 8 unidades en cada hora.

- 6) La línea 14 actualmente maneja el despliegue de una unidad cada 3 minutos, alternando buses de las 2 cooperativas. El resultado del modelo matemático concuerda con dicho manejo, por lo cual se sugiere mantener el headway de operación.
- 7) Las líneas 15 y 20 manejan un intervalo de tiempo de operación muy bajo, se recomienda disminuir las frecuencias en 6 y 20 unidades respectivamente. La línea 20 en su contrato de operación indica un headway de 3 minutos, sin embargo, el largo de la ruta y consideraciones como un abastecimiento tan grande de buses en el centro de la ciudad, hacen que se considere la aplicación de un intervalo de tiempo entre unidades mucho más amplio establecido en 11.45 minutos.
- 8) En la línea 16 y 19 el headway manejado actualmente debe variar, aumentándolo y permitiendo que una unidad menos sea enviada a circulación en la hora pico.

TABLA 7. HEADWAY CALCULADO POR LÍNEA.

Línea N#	Número de Unidades	Headway calculado		Frecuencias		
		Horas	Minutos	Hora	Día	Mes
1	11	0.0968	5.81	10	170	5 100
2	22	0.0960	5.76	10	171	5 130
3	11	0.1084	6.50	9	152	4 560
4	11	0.1084	6.50	9	152	4 560
5	10	0.1057	6.34	9	156	4 680
6	10	0.0993	5.96	10	166	4 980
7	20	0.1428	8.57	7	115	3 450
8	18	0.0968	5.81	10	170	5 100
9	29	0.1239	7.44	8	133	3 990
10	26	0.1428	8.57	7	115	3 450
11	12	0.1239	7.44	8	133	3 990
12	11	0.0999	5.99	10	165	4 950
14	19	0.0929	5.57	10	177	5 310
14	15	0.0929	5.57	10	177	5 310
15	25	0.1084	6.50	9	152	4 560
16	16	0.0898	5.39	11	183	5 490
17	16	0.0968	5.81	10	170	5 100
18	15	0.1084	6.50	9	152	4 560
19	22	0.1908	11.45	5	86	2 580
20	23	0.1908	11.45	5	86	2 580
21	28	0.1084	6.50	9	152	4 560
22	27	0.1043	6.26	9	158	4 740

Fuente: Autores.

Las soluciones óptimas, en términos de número de unidades de transporte a utilizar, se determinan como un compromiso entre el impacto medioambiental y los costos/beneficios financieros. El costo total de transportar un número elevado de personas es bastante alto, al monetizar el tiempo de los individuos que se involucran en el servicio y establecer coeficientes que represente las externalidades negativas que ocasionan su decisión de consumo. El costo de la flota calculado a partir de (2) ayuda a tener una visión más clara de la optimización de recursos mostrada por el desarrollo del modelo. Actualmente en una hora pico se tiene en ruta 246 unidades, mientras que con el modelo planteado se disminuirá esa cantidad a 194 es decir en un 21%, reduciendo además directamente el costo de flota manejado de \$ 8 910.72 a \$ 6 608.39.

V. CONCLUSIONES

El modelo de optimización para las externalidades negativas del servicio de transporte público urbano de la ciudad de Ambato determina que para la movilización por hora de aproximadamente 25188 personas que abordan las diferentes rutas, se requiere de un rubro de \$ 48616,04. El valor presentado considera directamente las externalidades; ruido, congestión vehicular y contaminación ambiental como aspectos principales de sostenibilidad, sin dejar de lado, los accidentes de tránsito y el cambio climático que se denotan al controlar las frecuencias y limitar factores como la velocidad y sobrecarga de las unidades. Los rubros presentados se logran establecer mediante coeficientes correspondientes a la disposición individual a pagar por mitigar un efecto negativo, y coeficientes que consideran el tiempo de un individuo en términos monetarios, y al headway de operación como la variable de relación general.

El planteamiento del modelo de optimización para las externalidades negativas se desarrolla desde un punto de vista táctico, con un levantamiento previo de la información existente del sistema de transporte y modelos planteados a lo largo del tiempo. El costo de movilización de usuarios se ve representado por el traslado de un individuo desde un origen i a un destino j , mismo que se representa por una función no lineal. Partiendo de la red de transporte con 36 nodos y 100 posibles arcos, se planteó la función objetivo en la cual se incluye el costo de operación de las unidades, los coeficientes monetarios representativos al tiempo de los usuarios y los valores correspondientes a la internalización de externalidades negativas del sistema. Con el headway otorgado por la resolución del modelo que integra los requerimientos de demanda y la calidad del servicio, se determina que un 68.18% es decir 15 líneas deben disminuir sus frecuencias, un 22.73% correspondiente a 5 líneas debe aumentarlas y las 2 líneas restante que conforman el 9.09% debe mantener su frecuencia conforme lo establecido en el contrato de operación vigente.

El modelo propuesto fue experimentado mediante el software LINGO 10.0, que posee una interoperabilidad con la hoja de cálculo de Microsoft Excel, misma en la que se desarrolló el levantamiento de información. En LINGO se ensayó el modelo logrando obtener menor costo total para la operación del sistema de transporte, con las consideraciones individuales del headway para cada una de las líneas que lo conforman. El costo generado por el tamaño de la flota se puede reducir un 25.90 % al aplicar los intervalos de tiempo entre unidades de la misma línea sugeridos en el modelo. En términos monetarios esto se vería reflejado en el pasar de invertir un total de \$ 8910.72 por hora a \$ 6608.39 en el mismo tiempo por concepto de la flota utilizada.

Algunas limitaciones han sido identificadas. Tales como el uso de recursos georeferenciación para visualizar las rutas de transporte público, y ubicación en tiempo real de cada unidad de transporte del sistema. La geografía y espacios viales dificultan la circulación de las unidades de transporte para el cumplimiento de las frecuencias de operación y satisfacción de la demanda. La investigación deja abierta la posibilidad de plantear futuros estudios que busquen estrategias que permitan mitigar cada una de las externalidades desde una perspectiva técnico-económica. Además, la aplicación de políticas generales de tránsito peatonal para mejorar el rendimiento del sistema

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato-UTA y a la Dirección de Investigación y Desarrollo-DIDE por el apoyo brindado para la ejecución de este trabajo como parte del proyecto de investigación “Impacto socioambiental de las externalidades del servicio de transporte urbano en Ambato. Modelo de optimización”, código PFCAUD10.

REFERENCIAS

- [1] I. Chatziioannou, L. Alvarez-Icaza & E. Bakogiannis, “A structural analysis method for the promotion of Mexico City’s integral plan of mobility,” *Cogent Eng*, vol. 7, no. 1, pp. 1–21, 2020. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1759395>

- [2] C. Regnier & S. Legras, “Urban Structure and Environmental Externalities,” *Environ Resour Econ*, vol. 70, no. 1, pp. 31–52, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0109-0>
- [3] S. Perveen, T. Yigitcanlar, M. Kamruzzaman & J. Hayes, “Evaluating transport externalities of urban growth: a critical review of scenario-based planning methods,” *Int J Environ Sci.Technol*, vol. 14, no. 3, pp. 663–678, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1144-7>
- [4] D. Aldas, J. Reyes, L. Morales, P. Pazmiño, J. Núñez & B. Toaza. Impacts analysis towards a sustainable urban public transport system. In *ICORES*, pp. 38–46, 2018. <https://doi.org/10.5220/0006537700380046>
- [5] I. Chatziioannou, L. Alvarez-Icaza, E. Bakogiannis, C. Kyriakidis & L. Chias-Becerril, “A CLIOS analysis for the promotion of sustainable plans of mobility: The case of Mexico City,” *Appl Sci*, vol. 10, no. 13, pp. 1–30, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134556>
- [6] I. Henke, A. Carteni, C. Moliterno & A. Errico, “Decision-Making in the transport sector: A sustainable evaluation method for road infrastructure,” *Sustain*, vol. 12, no. 3, pp. 1–19, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12030764>
- [7] I. W. H. Parry, M. Walls & W. Harrington, “Automobile Externalities and Policies,” *SSRN Electron J*, pp. 10–35, 2007. <https://doi.org/10.2139/ssrn.927794>
- [8] I. Chatziioannou, L. Alvarez-Icaza, E. Bakogiannis, C. Kyriakidis & L. Chias-Becerril, “A structural analysis for the categorization of the negative externalities of transport and the hierarchical organization of sustainable mobility’s strategies,” *Sustain*, vol. 12, no. 15, pp. 1–27, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12156011>
- [9] C. Dascalu, C. Caraiani, C. Iuliana Lungu, F. Colceag & G. Raluca Guse, “The externalities in social environmental accounting,” *Int J Account Inf Manag*, vol. 18, no. 1, pp. 19–30, 2010. <https://doi.org/10.1108/18347641011023252>
- [10] A. Tob-Ogu, N. Kumar, J. Cullen & E. E. F. Ballantyne, “Sustainability Intervention Mechanisms for Managing Road Freight Transport Externalities: A Systematic Literature Review,” *Sustain*, vol. 10, no. 6, pp. 1–18, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10061923>
- [11] A. Tirachini, “Ride-hailing, travel behaviour and sustainable mobility: an international review,” *Transportation (Amst)*, vol. 47, no. 4, pp. 2011–2047, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10070-2>
- [12] J. P. Bocarejo & L. F. Urrego, “The impacts of formalization and integration of public transport in social equity: The case of Bogota,” *Res Transp Bus Manag*, pp. 1–11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100560>
- [13] A. Tetteh & S. Dsane-Nsor, “Minimising negative externalities cost using 0-1 mixed integer linear programming model in e-commerce environment,” *J Transp Supply Chain Manag*, vol. 11, pp. 1–9, 2017. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v11i0.272>
- [14] A. Ceder, B. Golany & O. Tal, “Creating bus timetables with maximal synchronization,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 35, no. 10, pp. 913–928, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00032-X)
- [15] A. Virk, “Urbanisation: A Growing Story in Context of Efficient Urban Mob,” *RRIJM*, 2019. Available: <https://rrjournals.com/index.php/rrijm>
- [16] S. McLeod, J. Scheurer & C. Curtis, “Urban Public Transport: Planning Principles and Emerging Practice,” *J Plan Lit*, vol. 32, no. 3, pp. 223–239, 2017. <https://doi.org/10.1177/0885412217693570>
- [17] N. Ayu & Nahry, “Externalities aspects of freight distribution through the urban consolidation center,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 622, pp. 12024, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/622/1/012024>
- [18] R. Peñabaena-Niebles, V. Cantillo & J. Luis Moura, “The positive impacts of designing transition between traffic signal plans considering social cost,” *Transp Policy*, vol. 87, pp. 67–76, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.05.020>
- [19] M. H. Baaj & H. S. Mahmassani, “An AI-based approach for transit route system planning and design,” *J Adv Transp*, vol. 25, no. 2, pp. 187–209, 1991. <https://doi.org/10.1002/atr.5670250205>
- [20] S. Ngamchai & D. J. Lovell, “Optimal Time Transfer in Bus Transit Route Network Design Using a Genetic Algorithm,” *J Transp Eng*, vol. 129, no. 5, pp. 510–521, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:5\(510\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(510))
- [21] A. Eranki, “A Model to Create Bus Timetables to Attain Maximum Synchronization Considering Waiting Times at Transfer Stops,” *Thesis MSIE*, USF, TPA, FL, USA, 2004. Available: <https://digitalcommons.usf.edu/etd/1025/>
- [22] A. Mauttone, M. Urqhart & H. Cancela, “Optimización de Recorridos y Frecuencias en Sistemas de Transporte Público Urbano Colectivo,” *Tesis de Maestría*, UDELAR, MV, UY, 2005. Disponible en <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/2937>
- [23] M. Meyer, Estimating travel characteristics and volumes. In: *ITE, Transportation Planning Handbook*, NJ, USA, Meyer, pp. 35–52, 2016.
- [24] G. Desaulniers & M. D. Hickman, Public Transit. In: C. Barnhart & G. Laporte, eds., *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14, Chapt 2, NL, North Holand, pp. 69–127, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14002-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14002-5)
- [25] M. Sinner, U. Weidmann & A. Nash, “Application of a Cost-Allocation Model to Swiss Bus and Train Lines,” *Transp Res Rec*, vol. 2672, no. 8, pp. 431–442, 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118772702>
- [26] L. Deng, W. Gao, Y. Fu & W. Zhou, “Optimal design of the feeder-bus network based on the transfer system,” *Discret Dyn Nat Soc*, pp. 1–11, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/483682>

- [27] M. E. Ruiz, C. M. Mayorga, D. S. Aldas & J. P. Reyes, “El costo y la percepción en la sociedad por congestión vehicular causada por el transporte público urbano en la ciudad de Ambato, Ecuador,” *Espacios*, vol. 40, no. 43, pp. 42, 2019. Disponible en <https://www.revistaespacios.com/a19v40n43/19404322.html>
- [28] J. H. E. Taplin & Y. Sun, “Optimizing bus stop locations for walking access: Stops-first design of a feeder route to enhance a residential plan,” *Environ Plan. B Urban Anal City Sci*, vol. 47, no. 7, pp. 1237–1259, 2020. <https://doi.org/10.1177/2399808318824108>
- [29] P. Shrivastava & M. O’Mahony, “A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules-A genetic algorithms approach,” *Transp Policy*, vol. 13, no. 5, pp. 413–425, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
- [30] L. Deng, Y. He, N. Zeng & J. Zeng, “Optimal Design of Feeder-Bus Network with Split Delivery,” *ASCE*, vol. 146, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000305>
- [31] República del Ecuador. Asamblea Constituyente, Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial. *Registro Oficial*, Suplemento 398, 7 ago. 2008. Recuperado de <https://portovial.gob.ec/sitio/descargas/leyes/ley-organica-transporte-terrestre-transito-y-seguridad-vial.pdf>
- [32] J. Llamuca, “Estudio tarifario del transporte urbano en buses de la ciudad de Riobamba según el nivel de servicio que prestan las operadoras a los usuarios,” *Tesis - Maestría*, PUCE, DMQ, EC, 2017. Disponible en <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13128>

John Paúl Reyes Vásquez es profesor titular agregado e investigador de la Universidad Técnica de Ambato-UTA (Ecuador). Ha trabajado como ingeniero industrial en el área de consultoría para empresas mineras y del sector de calzado, en donde ha estado involucrado en los procesos logísticos, operativos y de gestión, así como en el área de análisis de riesgos. Actualmente está cursando un programa de doctorado en ingeniería y producción industrial en la Universidad Politécnica de Valencia (España). Además, se ha desempeñado como Director de Investigación y Desarrollo de la UTA. Sus intereses de investigación incluyen las tecnologías de la información, la ingeniería industrial, la gestión de la cadena de suministro, la planificación de operaciones, herramientas de manufactura ajustada, gestión de procesos empresariales, la modelización y la simulación. <http://orcid.org/0000-0002-5446-5490>

Darwin Santiago Aldás-Salazar es Ingeniero Industrial. Magister en Gestión Industrial y Sistemas Productivos de la ESPOCH (Ecuador). Magister en Docencia Universitaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador). Actualmente cursa un doctorado en Ingeniería y Producción industrial en la Universidad Politécnica de Valencia (España), docente e investigador de la Universidad Técnica de Ambato por 10 años, coordinador principal, subrogante e investigador en varios proyectos de investigación relacionados a manufactura esbelta, transporte público y visión artificial, autor de 30 artículos científicos en revistas indexadas en bases de datos regionales, Scopus y WOS en las áreas de Producción, transporte y gestión industrial. Ponente en importantes congresos internacionales y nacionales en temas relacionados a la computación, industria y manufactura y matemática. <https://orcid.org/0000-0001-8882-030X>

César Medardo Mayorga-Abril es Máster Universitario en Economía Agraria, Alimentaria y de los Recursos Naturales de la Universidad Politécnica de Madrid (España). Magister en Costos y Gestión Financiera de la Universidad Técnica de Ambato (Ecuador). Ha trabajado en el campo privado, en empresas industriales, comerciales y de servicios en calidad de Gerente financiero, Auditor externo, Auditor interno, Contador, profesor-investigador de la Universidad Técnica de Ambato desde 2002. <https://orcid.org/0000-0001-8671-4757>

Mery Esperanza Ruiz Guajala es Doctora en Ciencias Económicas de la Universidad Católica Andrés Bello (Caracas, Venezuela). Magíster en Costos y Gestión Financiera de la universidad Técnica de Ambato (Ambato, Ecuador). Economista de la Universidad Técnica Particular de Loja. Docente de la Universidad Técnica de Ambato en las cátedras de Contabilidad Nacional, Macroeconomía, Microeconomía, Planificación económica empresarial de la Carrera de Economía de la Facultad de Contabilidad y Auditoría. Autora de varios artículos científico indexados en importantes bases de datos, coordinadora Subrogante en el proyecto de Investigación de la Universidad Técnica de Ambato, titulado “Impacto socio ambiental de las externalidades del servicio de transporte urbano en Ambato. Modelo de optimización”, con una duración de 2 años y medio (2018-2020). <https://orcid.org/0000-0002-3684-7778>

Mayra Stephanie Barahona Sánchez ha trabajado para empresas de servicios desarrollando sistemas de gestión, logrando brindar pautas para el desarrollo institucional. Actualmente se desempeña como servidora pública de la Empresa Electrica Ambato Regional Centro Norte S.A. (EEASA), laborando en el departamento comercial. Su desarrollo profesional se encamina a la optimización de procesos y manejo de sistemas integrales de gestión. <https://orcid.org/0000-0003-3870-7792>