

MÉTODO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA MAXIMIZAR LOS INGRESOS DE UNA EMPRESA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

AUTOR

KATERINE ANDREA ABRIL TORRES

Administradora de Empresas
Especialista en gerencia logística integral
katerineabril@gmail.com

Artículo Trabajo Final del programa de Especialización en Gerencia Logística Integral



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA LOGISTICA INTEGRAL
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
JUNIO, 2019**

MÉTODO DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA MAXIMIZAR LOS INGRESOS DE UNA EMPRESA DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

METHOD OF LINEAR PROGRAMMING TO MAXIMIZE THE INCOMES OF A COMPANY OF THE INTEGRATED SYSTEM OF PUBLIC TRANSPORT IN THE CITY OF BOGOTÁ

Katerine Andrea Abril Torres
Especialización en gerencia logística integral
U9500936@unimilitar.edu.co

RESUMEN

En la ciudad de Bogotá se presenta una crisis financiera en el transporte público de pasajeros, las empresas operadoras optan por implementar estrategias que puedan reducir costos y maximizar ingresos. En el presente artículo se desarrolla un modelo de programación lineal cuya función objetivo es maximizar los ingresos teniendo en cuenta unas variables discretas que intervienen en el proceso de asignación de flota, en cada una de las rutas que opera una de las empresas del sistema integrado de transporte público; obteniendo, finalmente, una nueva distribución de los tipos de bus disponibles en cada una de las rutas, para lograr esto se tiene en cuenta: ingresos por validaciones de pasajes y kilómetros recorridos, capacidad de buses y cantidad máxima promedio de pasajeros por hora, tratando de garantizar que los usuarios del sistema no se vean afectados por dichos ajustes, este resultado sugiere un cambio de tipologías en las rutas el cual incrementa los ingresos por día y permite dar un mejor sostenimiento económico a la empresa.

Palabras Clave: Asignación de flota, maximizar ingresos, programación lineal, rutas, sistema integrado de transporte público, transporte de pasajeros.

ABSTRACT

In the city of Bogotá there is a financial crisis in the public transport of passengers, the operating companies choose to implement strategies that can reduce costs and maximize revenues. In the present article a linear programming model is developed whose objective function is to maximize revenues taking into account some discrete variables that intervene in the process of fleet allocation, in each of the routes operated by one of the companies of the integrated system of public transport; obtaining, finally, a new distribution of bus types available in each of the routes, to achieve this is taken into account: revenues for validations of passages and

kilometers traveled, bus capacity and average maximum number of passengers per hour, trying To guarantee that the users of the system are not affected by these adjustments, this result suggests a change of typologies in the routes which increases the income per day and allows to give a better economic support to the company.

Keywords: Fleet allocation, maximize revenue, linear programming, routes, integrated public transport system, passenger transport.

INTRODUCCIÓN

Existen diversos problemas que enfrentan los sistemas de transporte en los países subdesarrollados, como: escasa planificación, falta de recursos, falta de proyección en el tiempo, pocos profesionales en la materia, bajos ingresos para el costo de operación, acelerada urbanización, falta de inversión gubernamental, congestión, infraestructura vial, contaminación, accidentes y sistemas o programas tecnológicos escasos; sin embargo, cada vez existen más soluciones técnicas en comparación a años atrás, lo que ha permitido evolucionar en algunos aspectos gracias al avance tecnológico de herramientas como el GPS, internet, conexión con usuarios por redes sociales, aplicaciones, desarrollos de software, celulares y pagos electrónicos [1].

En el transporte público de pasajeros existen varios factores, que son necesarios planificar para el buen funcionamiento, sostenibilidad y prestación de servicio, como: la demanda esperada, las rutas a ofertar, la cantidad y tipo de flota, mantenimiento, combustible requerido, recurso humano necesario y demás aspectos que se consideren para el desarrollo de la operación; para cada uno de los aspectos es necesario implementar métodos que faciliten el análisis y la optimización de lo que se pretende ejecutar.

Actualmente el sistema integrado de transporte en la ciudad de Bogotá, atraviesa una crisis por la grave situación financiera de las empresas operadoras lo que genera un problema de prestación de servicio para todos los habitantes de la ciudad, según un informe de 2018 de la Contraloría de Bogotá, los gastos del SITP son mayores a sus ingresos [2], por esto, las empresas operadoras deben optar por reducir sus costos y maximizar sus ingresos, para ello, es necesario analizar estrategias que permitan mejorar estos dos aspectos, siempre, bajo los parámetros establecidos, con el ente gestor, en el manual de operaciones del componente zonal del SITP [3].

Con las condiciones mencionadas previamente, es insostenible cubrir la financiación y operación del transporte público con base en la tarifa cobrada a los usuarios. Aún más cuando las finanzas del sistema son agravadas por la masiva cantidad de colados y la reventa de pasajes con tarjetas subsidiadas; razón por la cual es necesario efectuar cambios que mejoren la rentabilidad de las operadoras [2-1].

En el presente documento se desarrolla la implementación de un método de programación lineal con variables discretas cuyo objetivo principal es maximizar los ingresos, teniendo en cuenta la asignación de flota para las rutas en operación de una de las zonas en la ciudad de Bogotá, esta aplicación no es actualmente

desarrollada, ni se ejecuta algún método matemático que permita optimizar dicha asignación de recursos.

La información del funcionamiento del SITP se encuentra disponible en internet y es de acceso público.

1. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal es un conjunto de técnicas matemáticas de optimización. Se entiende por técnica de optimización al procedimiento o algoritmo cuya finalidad es minimizar o maximizar una función objetivo, ya sea maximizar las utilidades, maximizar los ingresos, minimizar los costos o minimizar tiempos de producción [4].

La programación lineal es una rama de las matemáticas relativamente reciente (mitad del siglo XX) cuyo nombre tiene su origen en la terminología militar de la segunda guerra mundial, en la cual se le llamaba *programa* a todos los problemas de asignación de recursos y dada la naturaleza lineal de muchos de ellos, la técnica se denominó *programación lineal*. Los problemas que pueden resolverse por medio de ella abarcan un amplio abanico de situaciones que incluyen una gran variedad de aplicaciones en ciencias económicas y administrativas [4-1].

Todos los problemas de programación lineal requieren de la toma de decisiones sobre ciertos factores cuantificables que se pueden simbolizar por variables x_j y se denominan variables de decisión. La Función Objetivo está sujeta a una serie de condiciones que plantean las restricciones específicas del problema (limitaciones), estas condiciones reciben el nombre de condiciones estructurales y se expresan también en función x_j , como ecuaciones desigualdades lineales. Existen, además, condiciones de no negatividad que garantizan que ninguna de las variables de decisión puede ser negativas [4-2].

2. MÉTODO SIMPLEX

El método simplex fue desarrollado por el matemático estadounidense George dantzig, es un procedimiento iterativo que consiste en encontrar, de manera sucesiva, mejores soluciones a un problema de programación lineal hasta que el problema ya no sea susceptible de mejora, en cuyo caso se encontró ya la solución óptima. Este método utiliza el procedimiento de eliminación gaussiana, una técnica matemática para resolver sistemas de ecuaciones lineales con n variables, basado en la aplicación de ciertas operaciones con renglones que puede efectuarse, toda vez que los coeficientes del sistema de ecuaciones estén dispuestos matricialmente [4-3].

2.1. CASOS DE TRANSPORTE Y PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal es aplicada, muy comúnmente, a problemas de transporte y distribución, como: minimización de costos para transporte de pasajeros en helicóptero [5], estudio de rutas para transporte multimodal minimizando costos,

tiempos, riesgos y emisión de CO₂ [6], programación de trenes [7], formulación de LP a la implementación y resolución para estrategias de optimización para redes de transporte teniendo en cuenta distancia y horas de viaje [8].

La variedad de factores que se pueden analizar y optimizar en procesos de transporte son muchos, según la necesidad, estos se ejecutan; ello constituye otro ejemplo que, tal vez con el tiempo, tenga mucha más investigación es el transporte autónomo [9], por lo tanto, es importante seguir analizando los diferentes métodos que pueden evolucionar con el transporte.

3. DISEÑO DE TRANSPORTE

Desde 1988 en Bogotá, Colombia, se iniciaron las propuestas, desde la alcaldía, para implementar un sistema masivo de transporte público en la ciudad, con el cual surgió la implementación de los corredores troncales de TRANSMILENIO y posteriormente el sistema de transporte urbano SITP [10].

Transmilenio S.A. es una empresa comercial e industrial del estado en la que el 100% de las acciones pertenecen a instituciones públicas distritales que otorgan y definen el sistema de transporte en la capital, conceden la operación y recaudo a empresas privadas que prestan el servicio a las cuales se les remunera por disponibilidad de vehículos, kilometraje recorrido y validaciones de pasajeros. Transmilenio fue el motor que llevo a otras ciudades colombianas a adoptar sistemas masivos similares (Pereira, Cali, Cartagena, Barranquilla, Bucaramanga) y que mostró también la validez del sistema empresarial centralizado en una sociedad y no en incontables propietarios afiliados [10-1].

3.1. ZONIFICACIÓN Y EMPRESAS OPERADORAS

En Bogotá hay 13 zonas para operación (Ver Figura 1) y una zona neutra que debe ser cubierta por los nueve operadores, dos de ellos liquidados (Ver Figura 2).



Figura 1 Mapa de división de las zonas del SITP
Fuente: Transmilenio S.A., 2013 [11]

Operador	Zonas Adjudicadas
Consortio Express	Usaquén y San Cristóbal
Masivo Capital	Suba Oriental y Kennedy
Egobus (liquidada)	Suba Centro y Perdomo
Este es mi Bus	Calle 80 y Tintal-Zona Franca
Gmóvil	Engativá
Coobus (liquidada)	Fontibón
ETIB	Bosa
SUMA	Ciudad Bolívar
Tranzit	Usme
Todos los operadores	Zona neutra

Figura 2. Empresas adjudicadas a la operación del SITP
Fuente: Transmilenio S.A., 2013 [11]

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA FLOTA

Las empresas operadoras cuentan con una flota para su operación en cada zona, dichos vehículos tienen unos aspectos técnicos y se clasifican en cuatro tipologías (Ver Figura 3).

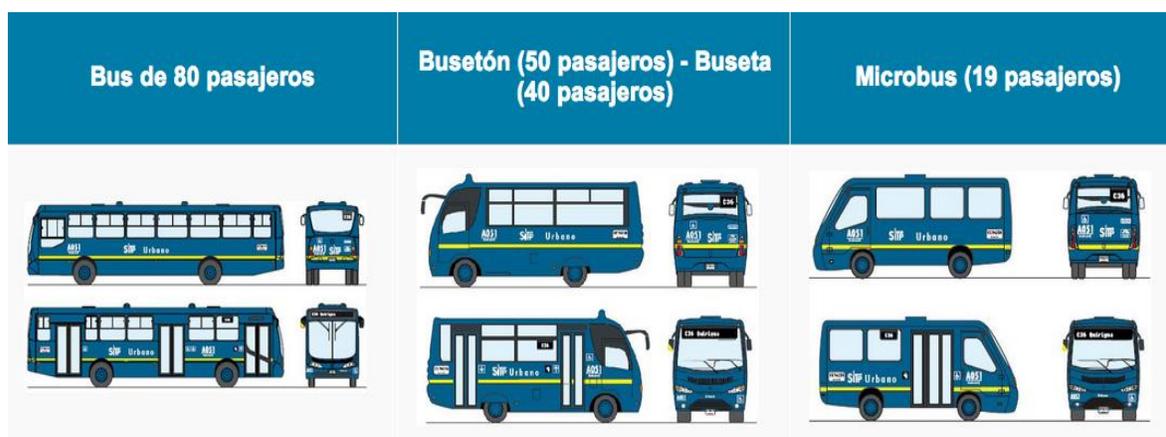


Figura 3. Características de Flota vinculada al SITP
Fuente: Transmilenio S.A., 2013 [11]

Cada ruta tiene una o varias tipologías asignadas; cuando, por necesidades de la operación, se requiera efectuar un cambio de un bus que está en operación deberán tener expresa autorización de TRANSMILENIO S.A [3-1].

3.3. RECAUDO

El Sistema de Recaudo se basa en la utilización de una tarjeta inteligente, para utilizar los servicios, el usuario debe adquirir previamente este medio de pago. Es responsabilidad del recaudador recolectar el dinero proveniente del cobro de la tarifa, proveer los equipos para la operación del recaudo, consolidar la información proveniente de las transacciones, garantizar la disponibilidad de los medios de pago y controlar el acceso al sistema [12].

4. APLICACIÓN DEL MODELO

La recolección de información necesaria para el desarrollo del modelo de programación lineal se obtuvo teniendo en cuenta un día hábil, así mismo, la flota disponible, los kilómetros recorridos, pronóstico de validaciones de pasajeros, los ingresos por cada variable y las restricciones para cumplir con la operación.

4.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

En la empresa analizada hay 10 rutas en operación cada está condicionada por la cantidad de flota disponible según la tipología, las rutas tienen ingresos por kilómetros que recorren en un día y por validaciones de pasajeros (Ver Figura 4).

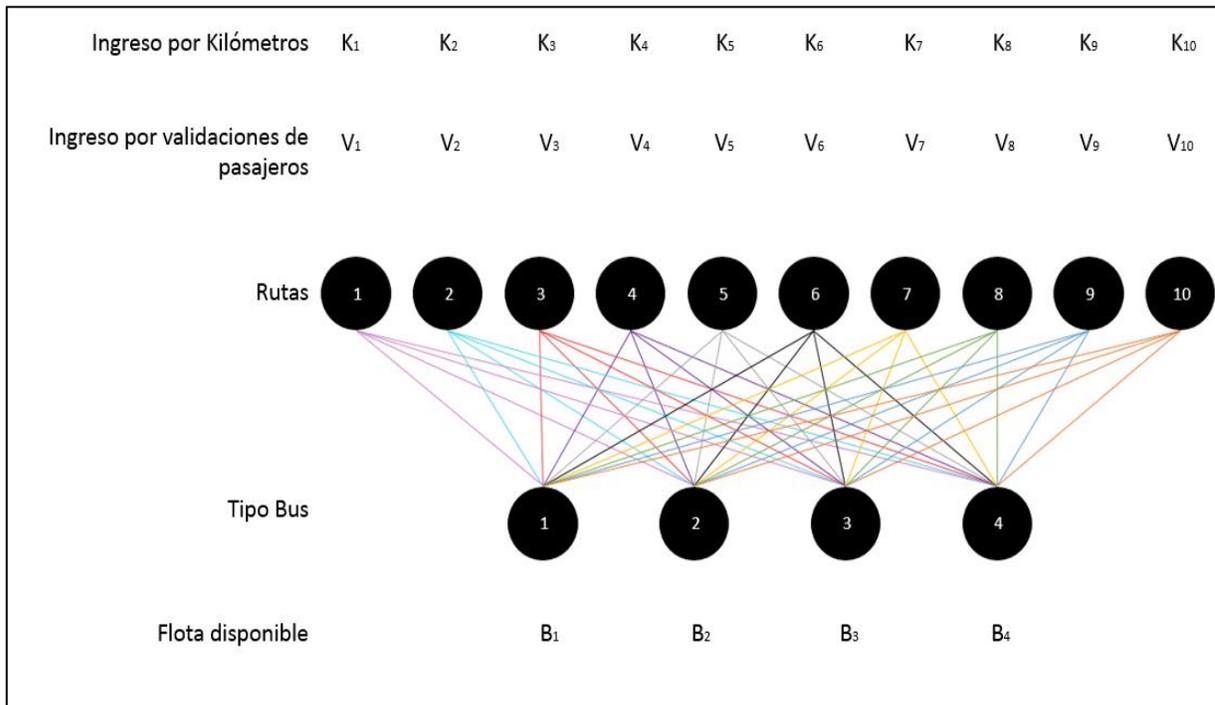


Figura 4. Esquema general de los ingresos de una operadora del SITP

Fuente: Elaboración propia

4.2. FLOTA DISPONIBLE

La cantidad y distribución de flota disponible para la operación, por tipología, para día hábil se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución actual de flota

Distribución de flota					
Ruta	Tipología				Total
	Padrón	Buseta	Busetón	Microbus	
1	11				11
2	15				15
3	21				21
4	20				20
5		12			12
6		15	5		20
7			14		14
8			11		11
9		14			14
10		6		17	23
Total	67	47	30	17	161

Fuente: Elaboración propia

4.3. VALIDACIONES DE PASAJEROS Y KILÓMETROS RECORRIDOS

Las validaciones de pasajeros por ruta se obtienen descargando la base de datos de todas las validaciones que se realizan por día hábil (lunes a viernes) en cada bus, según ruta asignada. En lo corrido del año 2019, para predecir los valores futuros en función de los datos históricos, se realiza un pronóstico (Ver Figura 5).

Los kilómetros por ruta se mantienen en el tiempo por lo cual no se realiza pronóstico sino se trabaja con la información actual (Ver Figura 5).

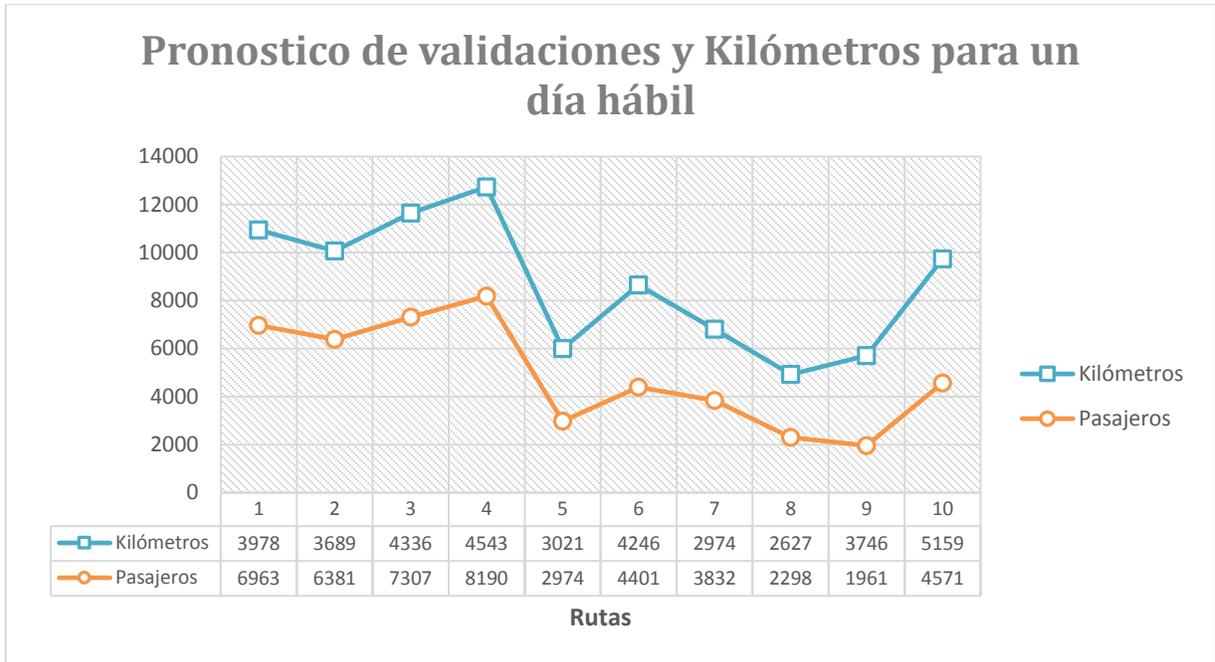


Figura 5. Validaciones y kilómetros para un día hábil
Fuente: Elaboración propia

Para poder resolver el modelo se promedian validaciones y kilómetros por bus, la información se obtienen dividiendo kilómetros totales por ruta y pasajeros en la cantidad de buses asignados a cada ruta. (Ver Figura 6).

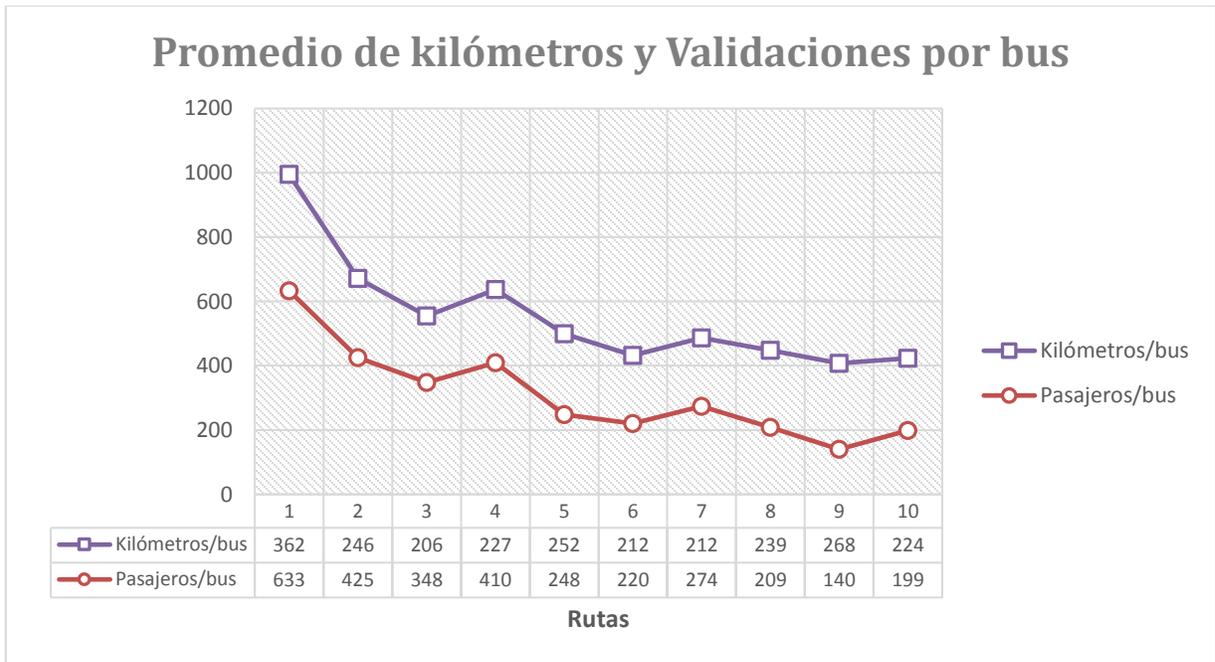


Figura 6. Validaciones y kilómetros para un día hábil por bus
Fuente: Elaboración propia

4.4. INGRESOS

La remuneración a la empresa operadora está dada por la disponibilidad de vehículos, validaciones de pasajeros y kilómetros recorridos, en este modelo se tiene en cuenta las dos últimas.

La tarifa con la que se remunera a la empresa por las validaciones es de, aproximadamente, \$380 para todas las rutas sin importar la tipología de bus.

Los kilómetros comerciales (prestando servicio) se remuneran a la empresa según el tipo bus, en la Tabla 2 se muestran las tarifas.

Tabla 2. Ingreso por kilómetro recorrido según el tipo bus

Microbus	Buseta	Busetón	Padrón
\$1.807	\$1.939	\$1.911	\$2.453

Fuente: Elaboración propia

4.5. PASAJEROS

Para garantizar la prestación de servicio a los usuarios y asignar las restricciones, se hace necesario conocer la ocupación del bus para poder determinar el tipo de flota con la que puede operar cada ruta, las validaciones se analizan por bloques de una hora, desde las 03:00:00 hasta las 24:00:00, y se selecciona la máxima cantidad de pasajeros en el día, con esta información se promedia los días hábiles de los cuatro meses analizados (Enero a Abril de 2019), el resultado se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Promedio por hora de pasajeros en las rutas

Ruta	Promedio máx. mes 1	Promedio máx. mes 2	Promedio máx. mes 3	Promedio máx. mes 4	Promedio general
1	80	93	91	86	88
2	58	64	63	62	62
3	62	72	72	69	69
4	65	68	67	65	66
5	45	52	52	51	50
6	46	46	45	43	45
7	45	51	50	47	48
8	37	44	45	41	42
9	24	28	27	27	27
10	34	36	35	33	35

Fuente: Elaboración propia

5. EXPRESIÓN MATEMÁTICA

Se determinan las variables de decisión:

X_j = números de buses asignados del tipo bus j (j = padrón, buseta, busetón, microbus).

La función objetivo está enfocada en la maximización de los ingresos, es la suma de los ingresos de km/bus de tipología padrón, más los ingresos de km/bus de tipología buseta, más los ingresos de km/bus de tipología busetón más los ingresos de km/bus de microbuses; y la suma de los ingresos por validaciones/bus de tipología padrón, más los ingresos por validaciones/bus de tipología buseta, más los ingresos por validaciones/bus de tipología busetón más los ingresos por validaciones/bus de microbuses.

Matemáticamente se expresa con la siguiente función

Maximizar

$$\sum K_j X_j + \sum V X_j \quad (1)$$

Donde,

K_j = Ingresos por kilómetros recorridos del tipo bus j (Ver Tabla 2)

V = Ingresos por validaciones de pasajeros (4.4.)

La oferta, en cualquiera de los dos escenarios, debe ser asignada en su totalidad, quiere decir, la cantidad de buses por tipología debe ser igual a la cantidad actual de flota por tipo bus:

$\sum X_1 = 67$ $\sum X_2 = 47$ $\sum X_3 = 30$ $\sum X_4 = 17$	(2)
---	-----

Donde,

Cada sub-número representa a: 1 padrón, 2 buseta, 3 busetón y 4 microbus.

5.1. RESTRICCIONES PRIMER ESCENARIO

En la siguiente función se determina que cada ruta debe tener la misma cantidad de flota que actualmente tiene asignada:

$Ruta\ 1: \sum X_j = 11$	(3)
$Ruta\ 2: \sum X_j = 15$	
$Ruta\ 3: \sum X_j = 21$	
$Ruta\ 4: \sum X_j = 20$	
$Ruta\ 5: \sum X_j = 12$	
$Ruta\ 6: \sum X_j = 20$	
$Ruta\ 7: \sum X_j = 14$	
$Ruta\ 8: \sum X_j = 11$	
$Ruta\ 9: \sum X_j = 14$	
$Ruta\ 10: \sum X_j = 23$	

Sujeto a:

$Ruta\ 1: X_2 = 0, \quad X_3 = 0, \quad X_4 = 0$	(4)
$Ruta\ 2: X_4 = 0$	
$Ruta\ 3: X_4 = 0$	
$Ruta\ 4: X_4 = 0$	
$Ruta\ 5: X_1 = 0$	
$Ruta\ 6: X_1 = 0$	

<p>Ruta 9: $X_1 = 0$</p> <p>Ruta 10: $X_1 = 0$</p>	
--	--

Las restricciones se asignan de acuerdo a la Tabla 3, las rutas 2, 3 y 4 están dadas por la cantidad de pasajeros promedio en una hora por lo que para garantizar un buen servicio a los usuarios no se podrá asignar tipología microbus, para la ruta 1 que es de carácter especial, no puede operar en otra tipología que no sea padrón, por el recorrido que hace; la ruta 5 por infraestructura vial no puede ser asignada en tipología padrón; las rutas 6, 9 y 10 por la cantidad mínima de pasajeros promedio no se le puede asignar padrón ya que se desperdiciarían recursos.

5.2. RESTRICCIONES SEGUNDO ESCENARIO

El segundo escenario se plantea quitando la ruta 9 de operación, que es la que menor número de pasajeros tiene, lo que significa que la flota se volverá a distribuir en todas las rutas, teniendo en cuenta que se garantiza como mínimo la cantidad con la que actualmente opera cada ruta, el máximo de buses para asignar a cada ruta se determina dividiendo las validaciones totales para cada ruta sobre el mínimo valor de validaciones promedio, por bus, según la tipología (Ver Figura 5 y 6), se agrupan las rutas de busetas y busetones y otro grupo con rutas de padrón, para microbus no se realiza el análisis ya que solo se programa una ruta como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites máximos para restricciones del escenario dos

Tipología	Ruta	Mínimo valor de validaciones promedio por bus	Limitación máximo de flota para cada ruta
Padrón	1	348	20
	2		18
	3		21
	4		24
Busetas y Busetón	5	209	14
	6		21
	7		18
	8		11

Fuente: Elaboración propia

La función matemática se muestra a continuación:

$\text{Ruta 1: } \sum X_j \geq 11 \text{ y } \leq 20$ $\text{Ruta 2: } \sum X_j \geq 15 \text{ y } \leq 18$ $\text{Ruta 3: } \sum X_j \geq 21 \text{ y } \leq 21$ $\text{Ruta 4: } \sum X_j \geq 20 \text{ y } \leq 24$ $\text{Ruta 5: } \sum X_j \geq 12 \text{ y } \leq 14$ $\text{Ruta 6: } \sum X_j \geq 20 \text{ y } \leq 21$ $\text{Ruta 7: } \sum X_j \geq 14 \text{ y } \leq 18$ $\text{Ruta 8: } \sum X_j \geq 11 \text{ y } \leq 11$ $\text{Ruta 10: } \sum X_j \geq 23$	(5)
---	-----

Sujeto a:

$\text{Ruta 1: } X_2 = 0, \quad X_3 = 0, \quad X_4 = 0$ $\text{Ruta 2: } X_1 \geq 10, \quad X_4 = 0$ $\text{Ruta 3: } X_1 \geq 10, \quad X_4 = 0$ $\text{Ruta 4: } X_1 \geq 10, \quad X_4 = 0$ $\text{Ruta 5: } X_1 = 0$ $\text{Ruta 6: } X_1 = 0$ $\text{Ruta 10: } X_1 = 0, \quad X_4 \geq 10$	(6)
--	-----

Las restricciones para las rutas 2, 3 y 4 están dadas por la cantidad de pasajeros promedio en una hora por lo que para garantizar un buen servicio a los usuarios no se podrá asignar tipología microbús (Ver Tabla 3), también se tiene en cuenta que por la cantidad de pasajeros mínimo debe operar con 10 buses de tipología padrón; para la ruta 1 que es de carácter especial no puede operar en otra tipología que no sea padrón por el recorrido que hace; la ruta 5 por infraestructura vial no puede ser asignada en tipología padrón; las rutas 6 y 10 por la cantidad mínima de pasajeros promedio no se puede asignar padrón ya que se desperdiciaría recursos, adicionalmente, para la ruta 10 se tiene en cuenta que por la cantidad de pasajeros debe operar con 10 buses mínimo de tipología microbus.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el escenario uno se obtiene una distribución de flota que sugiere cambios en: ruta 3 para que sea asignada flota de tipología busetón en su totalidad, la ruta 6 salga a operación con 3 busetones y 17 microbuses, ruta 7 opere con 10 padrones y 4 busetones, la ruta 8 con 11 padrones, la ruta 10 debe ser asignada a 21 busetas y 2 busetones. La distribución de buses para el primer escenario se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Distribución de flota escenario 1

Distribución de flota					
Ruta	Tipología				Total
	Padrón	Buseta	Busetón	Microbus	
1	11	0	0	0	11
2	15	0	0	0	15
3	0	0	21	0	21
4	20	0	0	0	20
5	0	12	0	0	12
6	0	0	3	17	20
7	10	0	4	0	14
8	11	0	0	0	11
9	0	14	0	0	14
10	0	21	2	0	23
Total	67	47	30	17	161

Fuente: Elaboración propia

Con el escenario dos se obtiene una distribución de flota que sugiere cambios en todas las rutas a excepción de la ruta 5: la ruta 1 debe ser asignada con 20 buses de tipología padrón, la ruta 2 con 18 buses de padrón, la ruta 3 operando con 10 padrones y 11 busetones, la ruta 4 debe tener una asignación de 19 padrones y 3 busetas, ruta 6 sugiere que salga a operación con 13 busetones y 7 microbuses, ruta 7 opere con 8 busetas y 6 busetones, la ruta 8 con 11 busetas, la ruta 10 debe ser asignada a 13 busetas y 10 microbuses, como se indica anteriormente la ruta 9 sale de operación. La distribución de buses para el segundo escenario se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Distribución de flota escenario 2

Distribución de flota					
Ruta	Tipología				Total
	Padrón	Buseta	Busetón	Microbus	
1	20	0	0	0	20
2	18	0	0	0	18
3	10	0	11	0	21
4	19	3	0	0	22
5	0	12	0	0	12
6	0	0	13	7	20
7	0	8	6	0	14
8	0	11	0	0	11
9	0	0	0	0	0
10	0	13	0	10	23
Total	67	47	30	17	161

Fuente: Elaboración propia

El resultado de los ingresos para un día hábil, cuya función objetivo es maximizarlos, en cualquiera de los dos escenarios, aumentan, cada uno en diferente porcentaje, el escenario uno muestra un incremento de 0,25% y el escenario dos incrementa 4,55% con respecto al escenario actual, se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Incremento porcentual y en pesos de los escenarios planteados

Escenario	Ingresos Por día	Incremento en pesos	Incremento porcentual
Actual	\$ 100.693.124		
Escenario 1	\$ 100.945.050	\$ 251.926	0,25%
Escenario 2	\$ 105.276.874	\$ 4.583.750	4,55%

Fuente: Elaboración propia

Las validaciones y kilómetros promedio por bus cambian en el escenario dos ya que se redistribuye la flota, como en el escenario uno no se ajusta la cantidad total de flota por ruta se mantiene con los promedios actuales. Los promedios en general se ven ajustados en el escenario dos, en las cuatro primeras rutas se observa un mayor cambio ya que quedan distribuidas de una manera similar y el promedio de pasajeros en las rutas no denota diferencias tan amplias como las actuales (ver figuras 7 y 8).

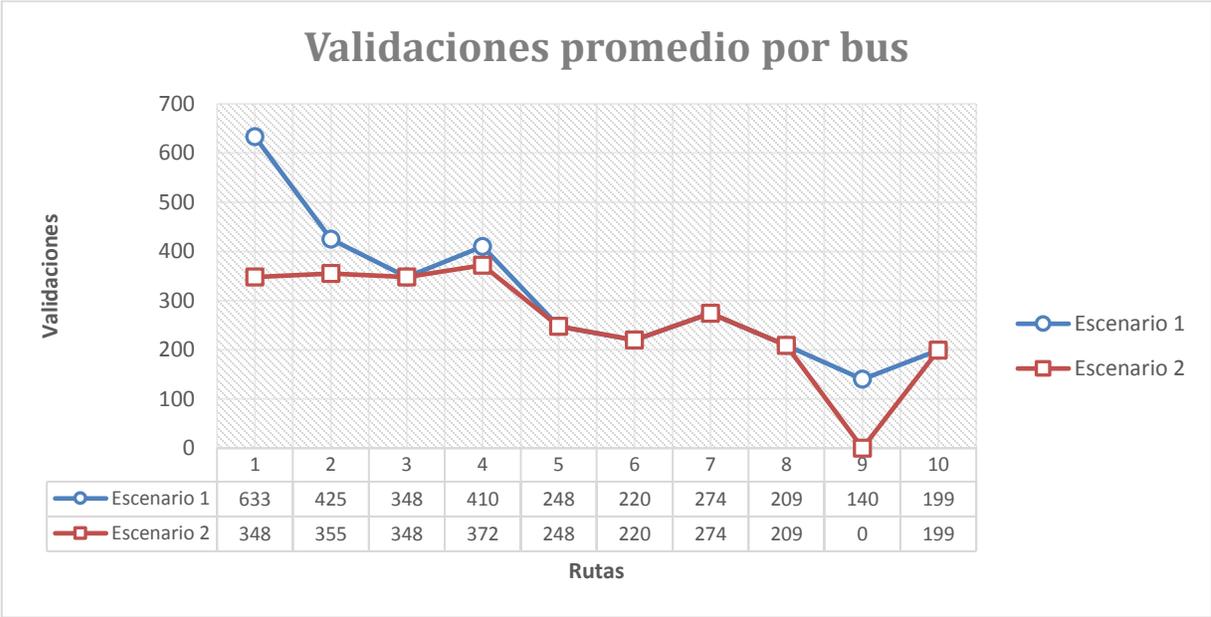


Figura 7. Validaciones promedio para día hábil por bus escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia

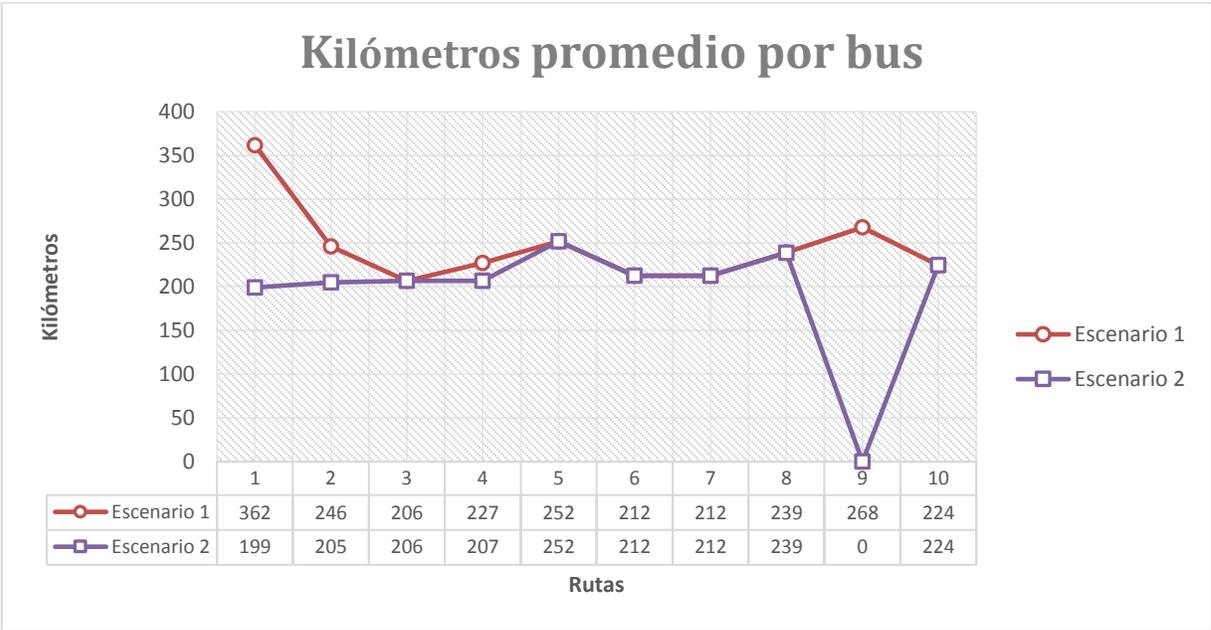


Figura 8. Kilómetros promedio para día hábil por bus escenarios propuestos
Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos la media de validaciones y kilómetros cambian en el escenario dos, los valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Media de validaciones y kilómetros para los escenarios planteados

	Escenario 1	Escenario 2
Media Validaciones	310	285
Media Kilómetros	245	217

Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

Inicialmente se ve la oportunidad de reasignar la tipología de los buses sin alterar la cantidad total de flota con la que debe salir a operar cada ruta, al aplicar el modelo se obtiene como resultado una mejora porcentualmente pequeña del 0,25% (pero importante para la situación financiera que atraviesa la empresa), por lo tanto, se opta por ajustar las restricciones quitando la ruta 9 que es la que menor promedio de pasajeros tiene y los recorridos se hacen con poca ocupación, lo que quiere decir que se puede aprovechar esta flota cubriendo otras rutas para mejorar frecuencias; una vez se ajustan las restricciones para distribuir la flota solo en las 9 rutas restantes, se obtiene un ingreso adicional del 4,55% que por día representa \$4.583.750, logrando así tener un incremento de ingresos que servirán para el sostenimiento económico y la recuperación del sistema.

Se debe tener en cuenta que en el escenario dos se recorren menos kilómetros, por lo tanto, los recursos disminuyen, el desgaste de la flota será menor y mejor distribuida en todos los buses, el mantenimiento y combustible por bus disminuye y se incrementan los ingresos.

La elección de qué modelo aplicar depende del análisis que cada empresa realice, otra opción puede ser crear una ruta o ajustar el recorrido de esta, teniendo en cuenta que para cualquier ajuste se debe tener un estudio técnico y presentar ante Transmilenio para su aprobación.

Un limitante para el análisis de los datos es saber la ocupación de los buses en una franja horario determinada, para conocer la cantidad de pasajeros que descienden del bus se tendría que medir con un torniquete de salida, un sensor o cualquier elemento que permita esta medición ya que ayudaría a conocer la ocupación real, esto daría una información más exacta del promedio de pasajeros en cada bus y cada ruta; se podría determinar también la cantidad de personas que evaden la validación del pasaje ya que es un factor importante que no es medible pero que genera no solo un efecto negativo para los ingresos sino también para la planificación de las rutas y la prestación de servicio.

Con la aplicación de este modelo de programación lineal para maximizar ingresos de una empresa del sistema integrado de transporte público se obtiene un resultado positivo, ya que en comparación a los ingresos actuales, con el modelo, se pueden incrementar, este estudio permite realizar ajustes operacionales y analizar nuevas propuestas que pueden mejorar, no solo a una empresa, sino en general a todas las empresas operadoras actuales, es decir, se mejora la crisis que atraviesa el transporte en la ciudad de Bogotá y también puede ser replicado a otros sistemas integrados de transporte de otras ciudades.

8. OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN

Las oportunidades de investigación para próximos estudios de caso se pueden enfocar en, adicionalmente, asignar costos de operación para cada una de las rutas (tiempos y kilómetros en vacío, costos de mantenimiento, costo nominal de operadores y los demás costos que intervienen en operación); también se puede enfocar el modelo en el que la flota de microbús llegué a cero, ya que es la menos rentable y la flota con mayor antigüedad de operación.

REFERENCIAS

[1] de Dios Ortúzar, J. (2012). Modelos de demanda de transporte. Ediciones UC.

[2] Nieves A., (2019). EL ABC DE LA CRISIS DEL SITP. En: <https://labitagora.com/el-abc-de-la-tesis-del-sitp/> (21 marzo del 2019).

[3] Alcaldía mayor de Bogotá. (2014). MANUAL DE OPERACIONES COMPONENTE ZONAL (RUTAS URBANAS - COMPLEMENTARIAS - ESPECIALES). BOGOTÁ

[4] Hoffmann, L., Bradley, G., & Sobecki, D. (2014). Matemáticas aplicadas a la administración y los negocios. McGraw-Hill Interamericana editores S.A DE C.V. 746 747 p.

[5] Castelluccio, F., Maritano, L., Amoroso, S., & Migliore, M. (2015). Cost analysis for a future helicopter for passenger transport. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, Vol.87(2).

[6] Kengpol, A., Tuammee, S., & Tuominen, M. (2014). The development of a framework for route selection in multimodal transportation. The International Journal of Logistics Management, Vol.25(3).

[7] Meng, X., Jia, L., Xiang, W., & Xu, J. (2015). Train re-scheduling based on an improved fuzzy linear programming model. Kybernetes, 44(10), 1472-1503.

[8] HF Chow, A., & Li, Y. (2014). Modeling and optimization of road transport facility operations. Journal of Facilities Management, 12(3), 268-285.

[9] Csiszár, C., & Zarkeshev, A. (2017). Demand-capacity coordination method in autonomous public transportation. *Transportation research procedia*, 27, 784-790.

[10] Pérgolis, J. C., & Valenzuela, J. A. (2007). *El libro de los buses de Bogotá*. Universidad Católica de Colombia.

[11] TRANSMILENIO S.A. (2013). Servicios del SITP. En: https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146270/servicios_del_sitp/. BOGOTÁ

[12] TRANSMILENIO S.A. (2013). Sistema de Recaudo. En: https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/146187/sistema_de_recaudo/