



DFSS FOR THE EFFICIENT ESTIMATION OF THE ORIGIN-DESTINATION MATRIX OF THE BRT SYSTEM OF BOGOTÁ

DFSS PARA LA ESTIMACIÓN EFICIENTE DE LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO DEL SISTEMA BRT DE BOGOTÁ

Liseth Daniela Grosso Bernal¹, Camilo Quiroga¹, Laura Katherine Quiroga Gómez² ✉

¹Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

²Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia

✉ lkuiroga@unbosque.edu.co

Recebido: 23 novembro 2019 / Aceito: 12 dezembro 2019 / Publicado: 17 dezembro 2019

ABSTRACT. The origin-destination matrix (OD) allows to characterize the demand temporarily in any mass transport system or Bus Rapid Transit (BRT), so that it is the premise for operational planning and route design. BRTs are characterized by the use of smart cards to record the start of a trip, however, the cards do not have the destination of trips made by users. The present work shows the design of a low-cost algorithm, efficient in computational terms and robust for the estimation and visualization of the OD matrix from the smart card registers within the framework of the IDDOV methodology of Design for Six Sigma (DFSS) for the case study of the BRT of Bogotá, Transmilenio.

Keywords: BRT, OD Matrix, SmartCards Data, DFSS, IDDOV, Visual Analytics.

RESUMEN. La matriz origen-destino (OD) permite caracterizar la demanda de forma espacio temporal en cualquier sistema de transporte masivo o Bus Rapid Transit (BRT), de tal forma que es la premisa para la planeación operacional y el diseño de rutas. Los BRT se caracterizan por el uso de tarjetas inteligentes para registrar el inicio de un viaje, sin embargo, las tarjetas no cuentan con el destino de los viajes realizados por los usuarios. El presente trabajo muestra el diseño de un algoritmo de bajo costo, eficiente en términos computacionales y robusto para la estimación y visualización de la matriz OD a partir de los registros de las tarjetas inteligentes dentro del marco de la metodología IDDOV de Design for Six Sigma (DFSS) para el caso de estudio del BRT de Bogotá, Transmilenio.

Palabras-Clave: BRT, OD Matrix, SmartCards Data, DFSS, IDDOV, Visual Analytics.



1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de transporte masivo o Bus Rapid Transit (BRT) es una solución de transporte público que combina la capacidad y velocidad de un tren ligero con la flexibilidad y el bajo costo de los sistemas de autobuses. Estos sistemas se caracterizan por el desarrollo de infraestructura que da prioridad al transporte público con el uso de buses especializados, carriles centrales exclusivos, estaciones de abordaje y des abordaje, junto con taquillas de recolección. (Lee, Miller y Skinner, 2007) (Levinson, Zimmerman, Clinger y Gast, 2003).

El acceso al sistema BRT suele realizarse en las estaciones. Para esto, cada pasajero tiene una tarjeta inteligente la cual debe acercarse a un dispositivo de pago al ingresar a cada estación. Cada dispositivo de pago tiene una identificación asociada con una estación determinada. La información registrada para cada transacción incluye la identificación y tipo de la tarjeta, la estación, la entrada de acceso, la fecha y la hora (Carrasco y Munizaga, 2013).

Aunque el propósito principal de las tarjetas inteligentes es recolectar ingresos, también producen una gran cantidad de datos detallados sobre las transacciones a bordo, conocidos como datos pasivos. La información de cada tarjeta inteligente se puede usar para estudiar patrones y comportamientos de viaje (Wang, Attanucci y Wilson, 2011) al permitir tres niveles de análisis: estratégico (planificación a largo plazo), táctico (ajustes de servicio y desarrollo de redes), y operacional (estadísticas de manejo e indicadores de desempeño) (Pelletier, Trépanier, & Morency, 2011). Si bien las tarjetas inteligentes tienen gran cantidad de información, los datos de la tarjeta inteligente solo almacenan la entrada (origen) al BRT, lo que deja al sistema con viajes incompletos, sin la trazabilidad de la salida (destino).

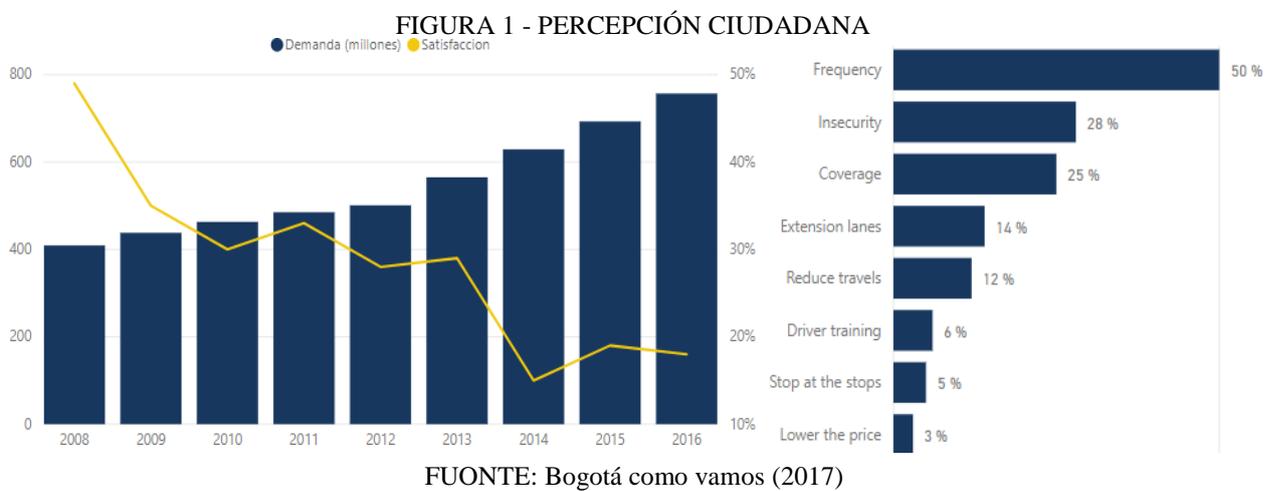
Actualmente, existen más de 150 sistemas de BRT en todo el mundo, que cubren más de 4.300 km en carriles de autobuses y que atienden a más de 28 millones de pasajeros por día. Los sistemas BRT están en uso en ciudades como Malmö (Suecia) y Rouen (Francia) en Europa; Pekín (China) y Pune (India) en Asia; Boston (EE. UU.) y Ottawa (Canadá) en América del Norte y Sao Paulo (Brasil) y Bogotá (Colombia) en América del Sur (ITDP, 2017).

Una de las implementaciones de BRT más reconocidas a nivel mundial entre los planificadores de transporte es TransMilenio, que atiende a la ciudad de Bogotá con casi 8 millones de habitantes. El gran éxito de este sistema BRT ha inspirado a otras ciudades de Colombia y de todo el mundo a emular el modelo TransMilenio. Solo en Colombia, el mismo



modelo ha sido implementado por sistemas de BRT a pequeña escala en Barranquilla (TransMetro), Bucaramanga (MetroLínea), Cali (MIO), Cartagena (TransCaribe), Medellín (MetroPlus) y Pereira (MegaBus).

No obstante, a pesar del éxito de los sistemas BRT en la etapa de planeación, en el funcionamiento, estos se someten a la insatisfacción de los usuarios. Para el caso de TransMilenio, el aumento de la demanda ha traído consigo una mayor insatisfacción relacionada con factores como la poca frecuencia de los buses, la inseguridad y la cobertura del sistema (Figura1).



Una de las explicaciones a este tipo de quejas, se debe al hecho de que la demanda modelada en la etapa de planificación difiere del comportamiento real una vez se encuentra en funcionamiento el BRT. Este desajuste entre las fases planificadas y operativas requiere una revisión exhaustiva de las rutas de viaje basándose en una estimación precisa de la matriz de distribución de viaje origen-destino (OD) la cual caracteriza el comportamiento de la demanda durante diferentes franjas horarias de tiempo. Este proceso requiere de un acercamiento efectivo al problema, por lo cual es necesario el uso de técnicas robustas como Seis Sigma, la cual permite identificar la etapa en la que se debe trabajar, así como los indicadores a utilizar para lograr la implementación de un proceso eficaz y eficiente.

Seis Sigma es un enfoque y una metodología para eliminar defectos en sistemas de producción o de servicios. La aplicación de esta metodología garantiza estándares de calidad bastantes altos, permitiendo satisfacer las necesidades del cliente. El objetivo principal es controlar la variabilidad del proceso, haciendo que seis veces la desviación estándar del mismo se encuentre dentro de los límites permitidos por los requerimientos técnicos del proceso. Para conseguirlo es necesario utilizar una metodología estructurada que facilite la



www.relainep.ufpr.br



implementación en cualquier proyecto y que permita obtener 3.4 defectos por 1 millón de oportunidades (The Council for Six Sigma Certification, 2018).

Cuando los procesos no existen y deben ser creados, es necesario garantizar que sean robustos desde el principio, para ello se aplica, el semejante de Seis Sigma para estos casos particulares: Diseño para Seis Sigma(DFSS). Esta metodología tiene como objetivo diseñar o reestructurar un proceso de tal forma que se maximice el rendimiento y el valor que se le otorga al cliente. De esta manera, DFSS permite evitar problemas desde la creación de un proceso, lo que genera un gran impacto en la calidad durante toda su vida útil. (Yang, 2005). Al igual que Seis Sigma, posee diferentes metodologías estructuradas para su implementación como DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify) e IDDOV (Identify, Define, Design, Optimize, Validate).

Actualmente, la empresa encargada del BRT de Bogotá, TransMilenio S.A. no cuenta con un proceso estandarizado para la creación de matrices OD, por lo tanto, el siguiente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un nuevo proceso robusto y eficiente para la estimación de la matriz OD de TransMilenio, que permita el análisis de los cambios en la demanda, mediante el uso de la información de las tarjetas inteligentes. Este proyecto se desarrolla bajo la estructura IDDOV de Diseño para Seis Sigma (DFSS), ya que permite tener un entendimiento mayor de todo el sistema BRT, así como los requerimientos del cliente ligados a este proceso.

2 DESIGN FOR SIX SIGMA

2.1 IDENTIFICAR

En Bogotá la empresa TransMilenio S.A. es la encargada de la planeación del Sistema Integrado de Transporte Publico de Bogotá (SITP), El SITP para su componente troncal comprende una red de 113 km de carriles exclusivos, 12 corredores, 155 estaciones, 2,027 autobuses articulados y biarticulados y 134 rutas. La Figura 2 muestra un mapa del sistema BRT TransMilenio. Actualmente, TransMilenio transporta más de 2,5 millones de pasajeros por día y más de 40 mil pasajeros por hora, un volumen normalmente asociado con los modos de transporte ferroviario pesado (Caín, Darido y Baltes, 2007).



FIGURA 2 - MAPA DEL COMPONENTE TRONCAL DEL SITP



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Para ofrecer el servicio adecuado se requiere de un diseño operacional detallado. El diseño operacional incluye cinco etapas: el análisis de la demanda, el desarrollo de la red, la planeación del servicio, la evaluación de velocidad y capacidad del sistema y finalmente la medición del impacto en el tráfico. Estas etapas son evaluadas no solo al inicio de la operación del BRT, sino también dentro de su evolución.

La primera etapa es el análisis de la demanda, en el que se identifica el comportamiento espacio temporal de los pasajeros, esta etapa es la base del diseño operacional y del financiamiento de un BRT. La segunda etapa es el desarrollo de la red, la cual consiste en identificación de las troncales y corredores de acuerdo con la concentración de la demanda. La tercera etapa es la planeación del servicio, en esta se crean las rutas junto con las frecuencias de viaje, de tal forma de que maximicen el nivel de servicio y satisfagan la demanda. La cuarta etapa mide el impacto del diseño físico, en la capacidad y la velocidad del BRT. La última etapa del diseño operacional mide el impacto de toda la implementación del BRT en términos del tráfico (ITDP,2017). En la Tabla 1 se miden tres aspectos para cada etapa: el impacto de cada una en las siguientes etapas, la factibilidad en términos de facilidad para realizar modificaciones y finalmente la economía de los costos para poder ejecutarla. De las 5 etapas mencionadas, la más importante según los pesos relativos de TransMilenio S.A. es el análisis de la demanda puesto que es la base para poder ejecutar las etapas sucesoras y el impacto que genera compensa los costos para realizarla.



TABLA 1: IMPORTANCIAS RELATIVAS DE LAS ETAPAS DEL
DISEÑO OPERACIONAL DE UN BRT

Steps of BRT Operation	Impact in next steps	Factibility	Costs	Relative weight	Relative importance
	98			24,3%	
Demand analysis	40	75	50	23,9%	42,5%
Service planning Speed and capacity Traffic-impact	30	90	90	22,3%	25%
Network development	15	90	85	16,9%	18,2%
	95	80	60	12,6%	7,3%
		20	1		6,9%

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Actualmente TransMilenio S.A. genera su diseño operacional a partir de análisis semestrales de la demanda, los cuales son realizados por una empresa consultora externa. En este punto se presenta una oportunidad de mejora ya que el lead time entre cada periodo de análisis es lo suficientemente amplio como para perder el control sobre la demanda del sistema. Si bien, habitualmente los pasajeros tienen dos patrones de viaje, días laborales y no laborales (Romero y Nieto, 2017), existen jornadas en el año que se consideran como atípicas, tales como: días sin carro, días con partidos de futbol, días con extensión de horarios de comercio, días con conciertos, días con exámenes de estado, entre otros (Semana,2014) (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2016). Estas variaciones afectan el diseño operacional del sistema BRT, y alteran el comportamiento típico de la demanda, por lo cual se requieren análisis concretos para estas jornadas, así como configuraciones específicas del sistema para dar a los pasajeros un nivel de servicio adecuado.

2.2 DEFINIR

En esta sección se pretende entender cómo se realiza la etapa del análisis de la demanda en la empresa TransMilenio S.A., los clientes internos y externos, así como los requerimientos y necesidades del sistema. Al final de la sección se definen los objetivos específicos del proyecto y del nuevo proceso a diseñar.

En primera instancia, se presentan los términos básicos que se usan en el contexto del análisis de la demanda en TransMilenio S.A. tales como:

- Servicio troncal: Es el servicio de tipo BRT del SITP (Sistema Integrado de Transporte Público), este servicio transita por las principales vías de la ciudad



en carriles de uso exclusivo y permiten la conexión entre estaciones y portales (SITP,2017). Este servicio es mayormente conocido como Transmilenio

- Troncal: Vía principal de la ciudad por donde transita los buses rojos articulados del Servicio Troncal, Transmilenio (SITP,2017)
- Servicio zonal: Es el servicio de buses organizados del SITP, este servicio transita por las diferentes vías de la ciudad sin carriles exclusivos, pero con paraderos definidos.
- Viaje: Es el recorrido que realiza un usuario para ir de un origen $o \in S$ a un destino $d \in S$, S es el conjunto de estaciones del sistema troncal. Dentro de un viaje pueden existir múltiples transbordos, pero el usuario, solo sale del sistema al llegar a su destino.
- Transbordo: Se refiere a la acción de pasar de un bus a otro, para el sistema troncal los transbordos se realizan dentro de las estaciones que conectan diferentes rutas, lo que permite realizarlos sin necesidad de salir del sistema.
- Datos pasivos: Es la información que es recolectada de manera secundaria a una acción específica, no requiere del consentimiento del usuario.
- Matriz origen destino: Es una descripción de la demanda de forma espacio temporal que determina la cantidad de viajes de una estación de origen $o \in S$ a una estación de destino $d \in S$ para un periodo de tiempo específico $k \in P$, con lo cual se obtiene una matriz de tres dimensiones en la que S es el conjunto de estaciones del sistema troncal y

P es el conjunto de periodos que se desea analizar.

Estas definiciones permiten describir las dos fases que componen la etapa del análisis de la demanda. La primera fase, consiste en la estimación de la demanda del sistema troncal para cada periodo, esto es, TransMilenio S.A. debe poder conocer los requerimientos de los usuarios en términos de la cantidad de viajes para cada par de estaciones en cada fragmento del día. La forma más común de representar estos requerimientos es en una matriz de parejas de estaciones por unidad de tiempo (ITDP, 2017). La segunda fase, consiste en la realización de estudios derivados del análisis de esta matriz. Estos estudios incluyen la identificación de comportamientos entre estaciones, diferencias entre franjas horarias, evaluación de la



www.relainep.ufpr.br

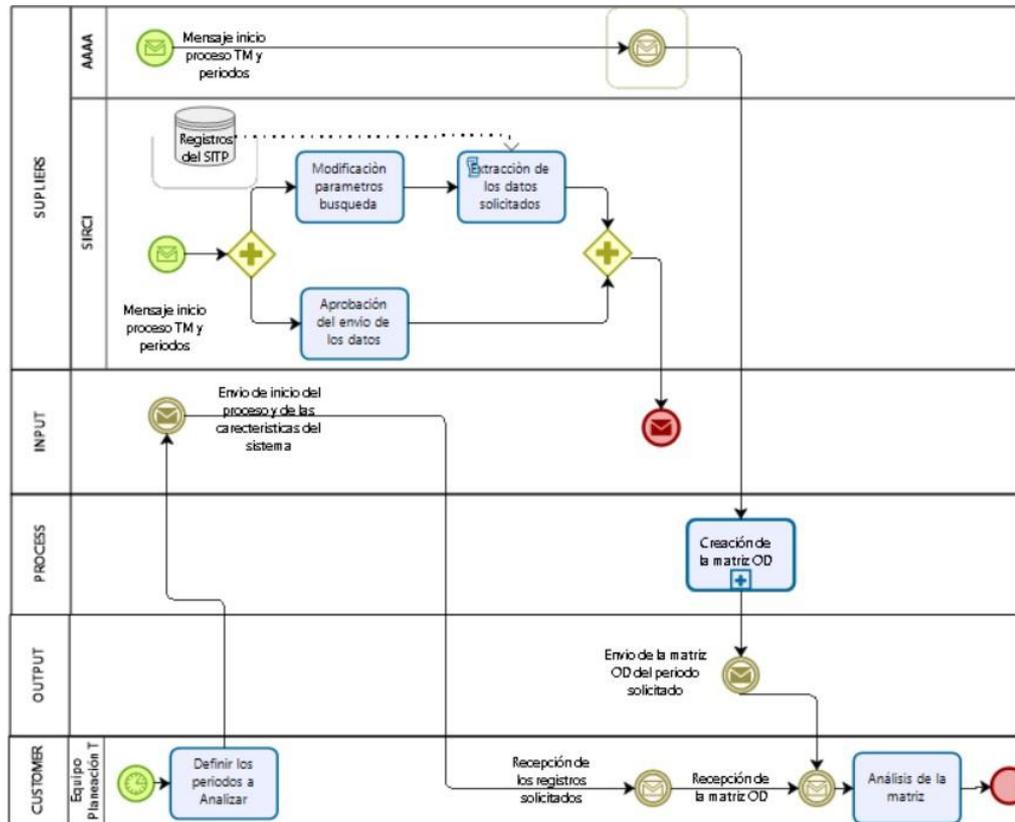


capacidad del sistema, entre otros. La primera fase es la base del entendimiento del flujo de los usuarios en el sistema troncal, sin embargo, no se tiene control completo sobre ella ya que su realización representa gran complejidad y cantidad de recursos. Es por esto que para la fase de estimación de la demanda se desarrolla un mapa de alto nivel del proceso con la identificación de los elementos claves que se representan en el diagrama SIPOC (suppliers, inputs, process, output, customers).

La identificación del cliente del proceso se realiza mediante la ubicación organizacional del proyecto. Este proyecto pertenece a la subgerencia Técnica de TransMilenio S.A. específicamente, al área de planeación. Esta área es la encargada de la programación de las rutas y de las modificaciones al sistema de acuerdo con la caracterización de la demanda y sus necesidades, es decir, son el cliente principal de la fase de estimación de la demanda. El proceso que se realiza actualmente para realizar esta fase hace uso de dos fuentes de información. La primera es la información suministrada por el operador del Sistema de Recaudo y control de Flota (SIRCI), los cuales entregan los registros de entrada al sistema de las tarjetas inteligentes. El segundo proveedor de información es el equipo de planeación de TransMilenio S.A., el cual suministra las características básicas del sistema SITP troncal. Estas dos fuentes de información son usadas por la consultora encargada de la creación de la matriz OD del sistema, este proveedor entrega un consolidado de la creación de la matriz al equipo de planeación, quien realiza los estudios derivados del análisis de la matriz OD.



FIGURA 3 - SIPOC DEL ANÁLISIS DE LA DEMANDA



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Con el SIPOC se identifica la completa dependencia a los operadores externos de Transmilenio S.A. ya que de la consultora no se conocen los procesos internos para la estimación de la demanda y de SIRCI se conocen los procesos, pero son los dueños de la fuente de información más importante. La duración total del proceso es de aproximadamente 15 días hábiles, de los cuales un 60% del tiempo está concentrado en la creación de la matriz OD.

El siguiente paso para la comprensión del proceso es la realización de un despliegue de las necesidades que tiene el equipo de planeación también llamadas voice of customer (VoC) y su traducción en los requisitos críticos de satisfacción o critical to satisfaction (CTS) que son los requerimientos cuantificables que definen los indicadores de desempeño del nuevo proceso. Para realizar esta traducción y priorización de las VoC en CTS se hace uso de quality function development (QFD).

Para las VoC, el equipo de planeación define tres necesidades de alto nivel, que posteriormente se despliegan en necesidades específicas como se observa en la Tabla 2.



Cada uno de los atributos de calidad genera un tipo de comportamiento en la satisfacción del cliente, esta clasificación es conocida como el modelo de Kano el cual tiene tres tipos de necesidades: las requeridas, las atractivas y las de desempeño (K.Yang). La primera necesidad de la tabla es la requerida y es el eje central del proyecto. Las siguientes tres necesidades de la Tabla 2 son necesidades atractivas, es decir, son de complemento y no generan insatisfacción al no cumplirse. El último grupo, son las necesidades de desempeño que son los atributos que se esperan del nuevo proceso, este tipo de necesidades generan insatisfacción si no se cumplen.

TABLA 2- CLASIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES POR VOC Y POR KANO

VoC	Necesidad - Atributo de calidad	Kano
	Generación de la matriz origen destino del sistema	Requeridos
	Análisis de todo el sistema SITP (troncal y zonal)	
Aumentar el análisis de la demanda para mejorar la calidad del servicio	Comportamiento viajes por CUP	Atractivos
	Identificación de fraude en el pago	
	Análisis en el menor tiempo posible	
	Análisis de diferentes periodos	
	Análisis de fragmentos diarios	
	Análisis de días atípicos	
	Estudio de las variaciones entre diferentes periodos	De
Minimizar los recursos utilizados	Implementación de bajo costo	Desempeño
	No inversión en Hardware ni Software	
Procedimiento fácilmente manipulable	Modificación comoda de los parametros de entrada	
	Facilidad de correr en repetidas ocasiones el análisis	
	Output sencillo de interpretar y de analizar	

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Cada una de estas necesidades debe ser atendida con el uso de diferentes requisitos necesarios para su implementación (CTS) como los recursos físicos, el recurso humano, la fuente de información y las características propias del proceso. Para mostrar cómo influyen los requisitos en las necesidades se hace uso de símbolos que indican si el peso es fuerte, moderado o débil (Quadro 1.1).



QUADRO 1.1 – CONVENCIONES DE LAS RELACIONES

RELACIONES
Fuertes =9 ●
Moderadas =3 ○
Débiles =1 ▽

QUADRO 1.2 – CONVENCIONES DE LA
CORRELACIÓN

CORRELACIÓN
Positiva
Negativa
Sin correlación

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

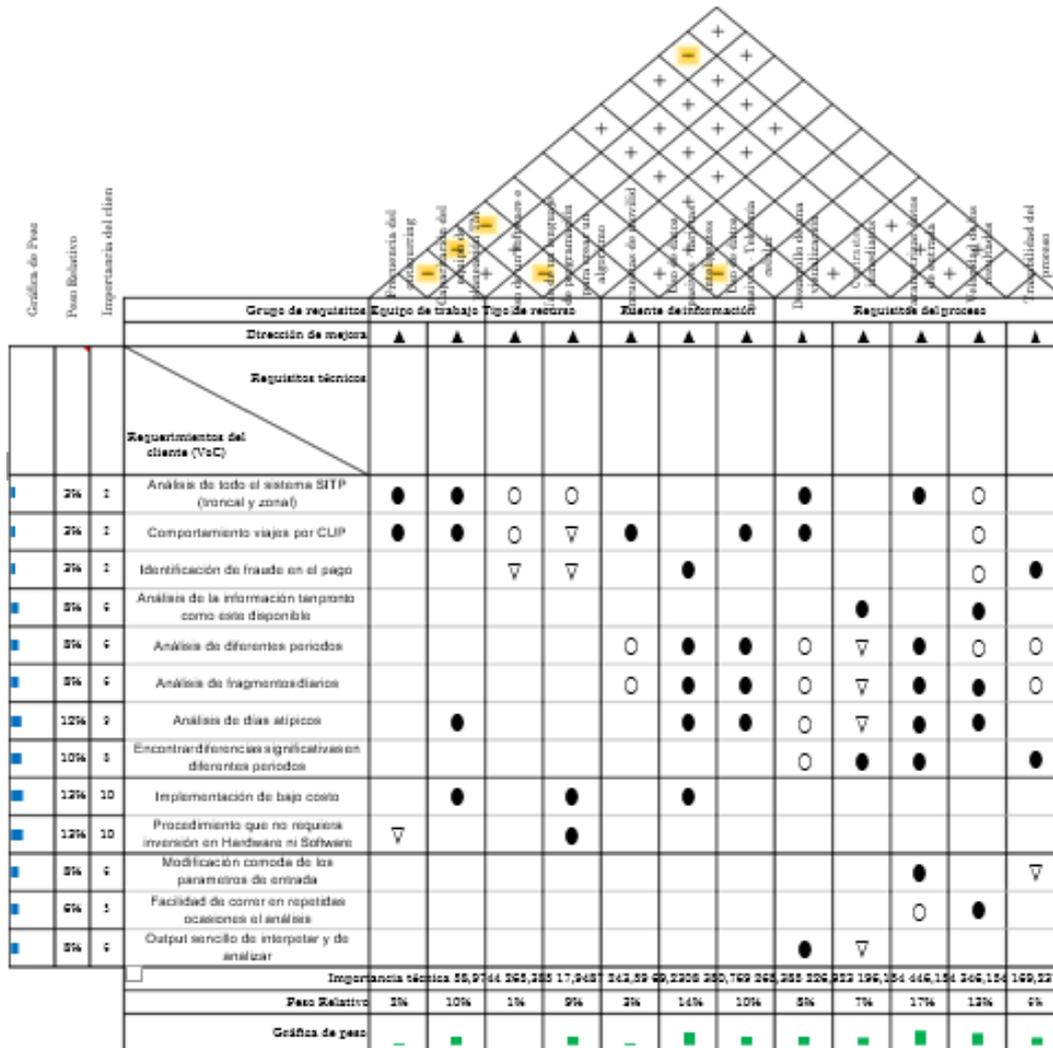
Cada categoría de los CTS posee múltiples formas de implementación, para conocer la correspondencia de cada requisito sobre los otros, se muestra la correlación con los símbolos de la Quadro 1.2

El resultado de QFD (Figura 4.1) es la elección de los requisitos técnicos con mayor calificación de importancia para satisfacer las necesidades del equipo de planeación, para este caso son:

- Tipo de recurso: Código fuente-lenguaje de programación
- Equipo de trabajo: Equipo de planeación de TM
- Fuente de información: Datos pasivos - tarjetas inteligentes
- Requisitos del proceso: Tiempo computacional y visualización de las matrices



FIGURA 4.1 - QFD-CASA DE LA CALIDAD (VOC VS CTS)



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Con la jerarquización de los requisitos se realiza una segunda matriz de QFD para la identificación y priorización de las variables del proceso que permiten el control sobre los requisitos técnicos previamente elegidos (Figura 4.2).



FIGURA 4.2: QFD 2-CASA DE LA CALIDAD CTS VS VARIABLES PROCESO

Gráfica de Peso	Peso Relativo	Importancia del cliente	Variables del proceso					
			Requerimientos Técnicos	Número de filtros para entrega de información Recaudado	Lead Time desde la entrega de la info hasta análisis final	Días de análisis	Tamaño de los archivos a analizar	Granularidad de los periodos de análisis
	10%	5	Desarrollo de una visualización		●			
	20%	10	Calidad de los resultados			●	○	●
	12%	6	Parametrizar datos de entrada		○	○		▽
	12%	6	Velocidad de los resultados	●	●	▽	●	●
	10%	5	Trazabilidad del proceso				○	▽
	8%	4	Capacitación del equipo de planeación TM					
	14%	7	Uso de un lenguaje de programación para crear un algoritmo		●			▽
	14%	7	Uso de datos pasivos - tarjetas inteligentes	●				
Max Relationship				9	9	9	9	9
Importancia técnica				234	360	228	198	324
Peso Relativo				17%	27%	17%	15%	24%
Gráfica de peso								

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Las variables principales para el equipo de planeación son la disminución de la espera para la entrega de resultados, la variación de la granularidad de los periodos y el soporte del proceso para la mayor cantidad de días posible.

Con el anterior análisis, el objetivo central es crear un proceso manejado por el equipo de planeación de Transmilenio S.A. que permita la creación de matrices origen – destino del sistema SITP troncal, a partir de los datos pasivos de las tarjetas inteligentes en menos de un día. Este objetivo se divide en objetivos específicos que se agrupan por etapas: de proceso y de salida.

Objetivos específicos del proceso:

- Reducir en un 90% la media del tiempo de procesamiento para la creación de la matriz OD, inferior a 8 horas.
- Crear un algoritmo interpretable basado en reglas que sea escalable
- Parametrización de los datos y variables de entrada que permitan el ingreso de diferentes días, periodos y estaciones



www.relainep.ufpr.br



Objetivos específicos de salida:

- Los resultados del nuevo algoritmo deben representar con un 95% de confianza los resultados del algoritmo actual que posee TransMilenio S.A.
- Crear un visualizador que permita distinguir los flujos de entrada y salida para cada estación en cada periodo
- Realizar comparaciones entre la demanda de periodos, días y estaciones

3 DISEÑAR

En esta sección se formaliza una metodología que cumpla con los tres objetivos de proceso: reducir la media del tiempo de ejecución en un 90%, crear algoritmo interpretable y la parametrización de las variables de entrada. Para cumplir con los requisitos técnicos preestablecidos a continuación se propone un algoritmo que haga uso de los datos pasivos y que sea fácilmente implementarle por el equipo de planeación. Los datos pasivos son información implícita a un sistema, operación o actividad, que son poco consultados y no requieren de la intervención del usuario, por lo tanto, los costos de incautación de los datos son bajos comparados otras fuentes de información. Para este caso, los datos pasivos corresponden a las validaciones efectuadas con las tarjetas inteligentes en la entrada al sistema. Estos registros generan información menos precisa que la generada en encuestas y censos, pero con menor sesgo gracias a la posibilidad de realizar múltiples replicas.

En el sistema troncal del SITP se efectúan aproximadamente 2,5 millones de transacciones en un día laboral. Una transacción se realiza cada vez que un usuario ingresa al sistema, mediante el intercambio de información al contacto del lector con la tarjeta inteligente. Todas las transacciones son guardadas en una base de datos administrada por el operador del Sistema de Recaudo y control de Flota (SIRCI), esta base que contiene las especificaciones espacio temporales del instante de la transacción, las cuales incluyen el id de la tarjeta, el tipo de tarjeta, la hora y la fecha de la transacción, la estación en la que se ingresó, entre otros. Esta información es el suministro más importante para los algoritmos que se han creado en la industria para la estimación de la demanda.

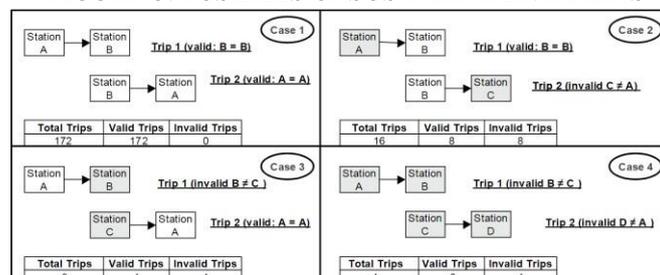


4 REVISIÓN LITERARIA

El problema de la creación de las matrices de demanda origen-destino radica en que las validaciones solo se realizan al ingresar al sistema. Para enfrentar esta problemática se han realizado dos tipos de aproximaciones. La primera está enfocada en la estimación individual de los destinos de cada trayecto (Munizaga y Palma, 2012) y la segunda a la estimación por flujos de perfiles de carga (Zhang y Osorio, 2018). Para este caso, se ahondará en el primer tipo de aproximación.

La estimación individual, para Barry et al (2002), se realiza mediante la identificación del usuario por medio del número serial de cada tarjeta y se asumen dos supuestos básicos. El primero consiste en que los usuarios regresan a la estación de destino del anterior viaje y el segundo radica en que el último viaje del día de la mayoría de los usuarios corresponde a la primera estación en donde ingreso al inicio del día. Para corroborar los supuestos se realizaron encuestas de movilidad en la ciudad de New York y los resultados arrojados fueron que la metodología funciona para un 90% de los casos (Figura 5) (Barry et al, 2002).

FIGURA 5: POSIBLES CASOS PARA 2 ENTRADAS



FUONTE: Barry et al (2002)

La continuación de este trabajo ha incluido viajes multimodales y para sistemas de solo buses, en los que la validación se realiza en la entrada de cada bus. Para el caso de la estimación multimodal se tienen en cuenta los transbordos entre el sistema de buses y el tren, para esto Zhao, Rahbee y Wilson (2007) incluyen información del GPS y las transacciones de los buses. Con esta información, se mantienen los supuestos de Barry et al. (2002) y se adiciona un radio de asignación de las estaciones más cercanas las cuales se cruzan con las distancias entre paradas y las horas de las transacciones.

A este tipo de aproximación se le han incluido nuevos factores y fuentes de información que se adapten a la estructura del sistema de transporte como en Munizaga y



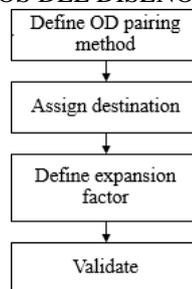
Palma (2012) se incluye la bajada de un viaje en la parada de bus más cercana a la siguiente entrada que vaya por la ruta inicial. Esto se realiza teniendo en cuenta que no hay carriles exclusivos y de doble sentido para el caso que se está tratando.

Cada aproximación tiene una estructura de transporte determinada la cual es fundamental para la creación de algoritmos basados en reglas, ya que la estructura determina los supuestos que permiten crear secuencias de los viajes realizados por los usuarios. La consolidación de los viajes de todos los usuarios determina la estimación de la matriz de demanda del sistema de transporte.

5 MÉTODO

La metodología del nuevo proceso se divide en 4 segmentos. La definición del método para unir las transacciones, el algoritmo para la asignación del destino, la implementación de un factor de expansión para completar la información que no se puede usar en el algoritmo y finalmente la validación. (Figura 6).

FIGURA 6 - PASOS DEL DISEÑO DEL ALGORITMO



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

La definición del método está relacionada con las reglas a priori a la implementación del algoritmo, por lo tanto, se deben establecer el conjunto de supuestos y características propias del sistema que faciliten la implementación del algoritmo. Estas reglas son:

- Cada usuario será identificado con un id de una tarjeta inteligente, este será su identificador único con el cual se verifican sus transacciones durante el día.
- Los usuarios ingresan nuevamente al sistema desde la estación de destino del último viaje
- Para el análisis por día, las personas tienen como destino final la estación de la primera validación que se realizó en el día



www.relainep.ufpr.br



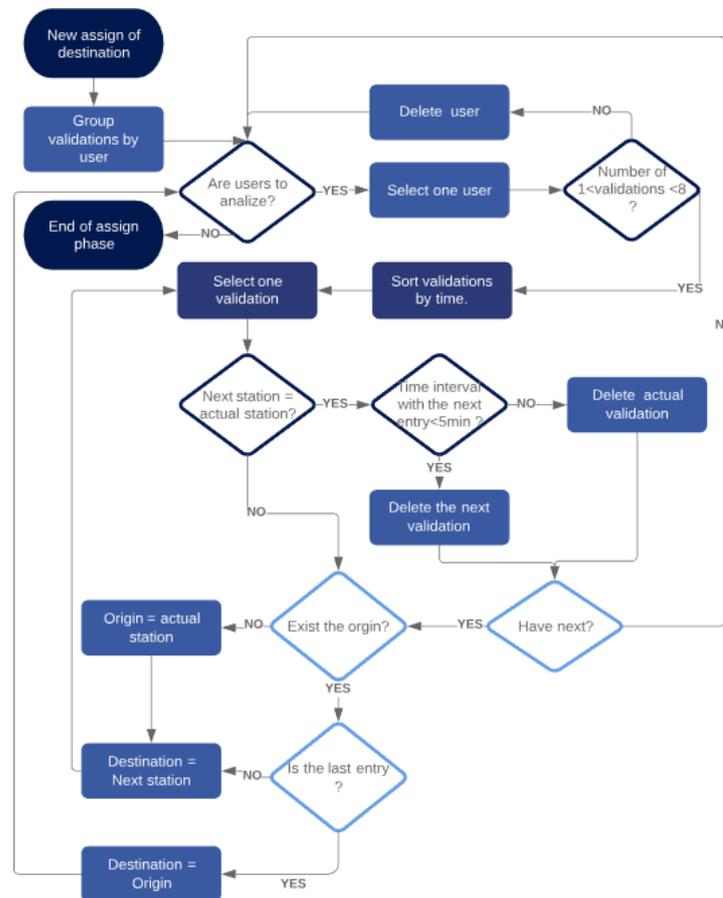
- Dos usuarios pueden ingresar a una estación con una misma tarjeta en una ventana de tiempo inferior a 5 minutos. Para este caso se realiza la trazabilidad de un solo viaje
- Un usuario sale del sistema cuando ha llegado a su destino, es decir puede hacer múltiples transbordos dentro del sistema

Cada una de las reglas, define un aspecto de la metodología para la asignación de los destinos. Para esta fase se necesitan tres fuentes de información diferentes. La primera es la base de datos de las validaciones diarias. Dentro de esta base se identifica el id de cada tarjeta, la estación en la que se realiza la validación y la hora de ingreso de determinado día. La siguiente base contiene la ubicación geográfica de las estaciones y la última, contiene los periodos que dan el grado de granularidad temporal al que se desea analizar la demanda.

La asignación de los destinos consiste en organizar, clasificar y determinar los viajes de cada usuario. Para esto se identifican las dimensiones requeridas para realizar el algoritmo, estas son: el conjunto de usuarios U , el conjunto de estaciones S , los periodos o franjas horarias P , el conjunto de días D , por último, el subconjunto de transacciones T_{ij} para cada usuario $i \in U$ en determinado día $j \in D$. Cada transacción está representada por $i \in U, s \in S, p \in P$.

Antes de iniciar el algoritmo de asignación del destino, se debe limpiar la información y dejarla en un formato estándar. Para esto los periodos son identificados con un id que representa un único intervalo de tiempo y la hora de ingreso de todas las validaciones es transformada por el id del periodo al que pertenece. Con esta modificación, se inicia el algoritmo de asignación de destinos descrito en el diagrama de flujo de la figura 7.

FIGURA 7 - ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE DESTINOS



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Al finalizar el algoritmo de asignación de los destinos a cada validación, se agrupan los resultados por periodos $k \in P$, estación de origen $o \in S$ y estación de destino $d \in S$. En otras palabras, el resultado corresponde a k matrices de parejas de estaciones. Durante la ejecución del algoritmo se eliminan validaciones y usuarios ya sea porque no cumplen con las reglas planteadas o porque no se pueden realizar inferencias del destino. Estas eliminaciones representan una disminución del 30% de las validaciones totales de un día. Para que la estimación de la demanda no se vea afectada en su tamaño, se debe generar un factor de expansión que permita obtener una matriz representativa del total de los datos iniciales. Debido a que las eliminaciones se generan de forma aleatoria sobre el total de los datos se asume que siguen una selección aleatoria simple (Romero y Nieto, 2017), de modo que, el factor se describe en términos del inverso de la probabilidad (π_{odk}) de incluir una transacción con estación de Origen $o \in S$ a una estación destino $d \in S$, en un periodo determinado $k \in P$, esta probabilidad se calcula como:



$$\pi_{odk} = \frac{trips_{odk}}{\sum_p trips_{opk}} \forall o \in S, d \in S, k \in P$$

$$f_{odk} = \frac{1}{\pi_{odk}}$$

Donde $trips_{odk}$ es el promedio semanal (días laborales) del flujo entre la pareja de estaciones $o, d \in S$ para cada periodo

$k \in P$.

La implementación del algoritmo se realiza en el lenguaje multipropósito orientado a objetos Python. Python realiza un manejo adecuado de grandes volúmenes de información en múltiples plataformas, ideal para el manejo de las transacciones diarias. El uso de este lenguaje permite el cumplimiento del requisito de recursos ya que no se requiere de inversión en un software específico para la implementación del proceso, por el contrario, permite que el equipo de planeación tenga el control de creación de la matriz OD y de las reglas de decisión para su ejecución.

La última fase de la metodología consiste en validar y medir los resultados del nuevo procedimiento. En esta fase se determina la media y los límites del nuevo algoritmo para poder realizar futuros cálculos de la capacidad del proceso y la disminución de varianza. Para esta primera aproximación del algoritmo, se toma la muestra del tiempo de 9 corridas. En la Tabla 3 se observan las principales estadísticas descriptivas de los tiempos de ejecución en segundos.

TABLA 3: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN ALGORITMO INICIAL

Estadísticas descriptivas (segundos)	
Media	23371.8
Desv.est	134.66
Mínimo	23256.3
Máximo	23713.4
Mediana	23366.7

$H_0 =$ Los datos siguen la distribución especificada

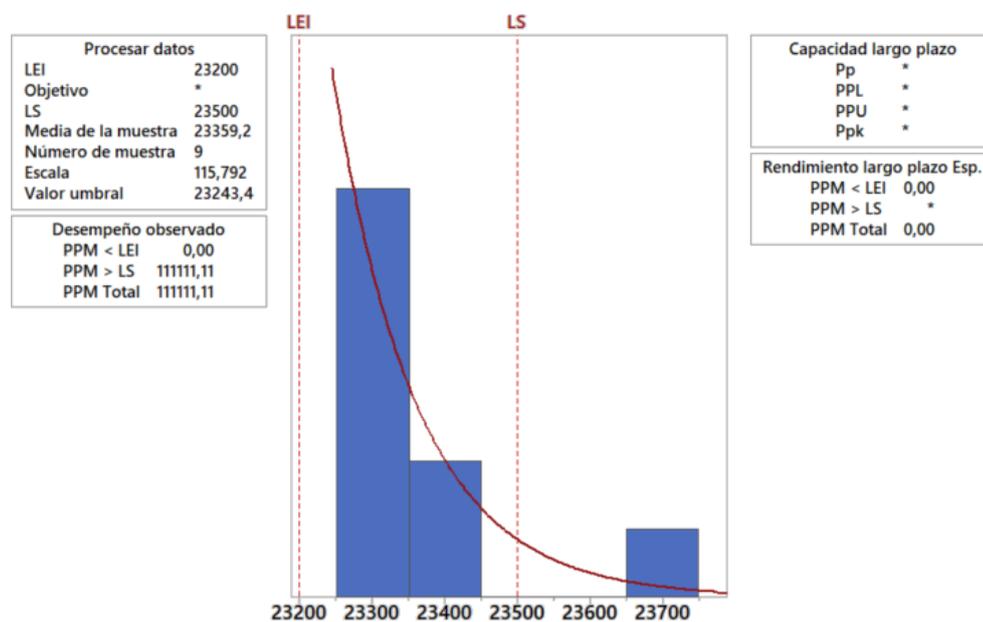
$H_1 =$ Los datos no siguen la distribución especificada

El test se realiza con una confianza del 95%, por lo que se rechazará la hipótesis nula si $pvalue < 5\%$ y se elige el que mayor $pvalue$ tenga. Los resultados de la prueba dan como resultado la distribución exponencial con un $pvalue = 0.25$



El siguiente ítem que se debe definir son los límites de control. Para este caso, como se quiere que el tiempo sea lo más corto posible, el límite inferior es 0. El límite superior es el que determinará el nivel de calidad y se fija una desviación por encima de la media en 23506 segundos que es equivalente a 6.5 horas (Figura 8). Con los límites fijados, la capacidad del proceso es de 111111 PPM de oportunidades.

FIGURA 8 - DISTRIBUCIÓN Y LÍMITES DE CONTROL DEL ALGORITMO INICIAL
Informe de capacidad del proceso de Tiempos
Cálculos basados en el modelo de distribución Exponencial



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Para finalizar esta etapa se verifica si se cumplieron los objetivos específicos del proceso previamente establecidos en la etapa definir. En primer lugar, se logró reducir en más de un 90 % el tiempo de creación de la matriz OD. El tiempo inicial dependía directamente del contratista encargado, el cual se demoraba alrededor de 10 días en la entrega de la matriz OD. El tiempo del nuevo proceso, es el requerido por el algoritmo propuesto, que es de aproximadamente 6.5 horas de ejecución.

El segundo objetivo definido, es el entendimiento del proceso. Este objetivo es el fundamento de la creación de un procedimiento basado en reglas secuenciales. Este tipo de algoritmos permiten incluir o modificar las reglas de acuerdo con el tipo de análisis que se quiere realizar, sin perder la trazabilidad de las transacciones. Finalmente, el último objetivo es la parametrización de los datos para la ejecución del algoritmo con diferentes



combinaciones de entrada. Los datos de entrada de las transacciones deben poseer la fecha y hora de transacción, la estación de entrada y el id de la tarjeta. Para los periodos se puede incluir fragmentos definidos con la hora de inicio y fin o simplemente ingresar el número de intervalos que se quiere tener. Con estos parámetros se pueden generar matrices con la granularidad temporal deseada y con parámetros de entrada modificables.

Optimizar El tiempo computacional es el requisito técnico más importante para cumplir con las necesidades del equipo de planeación de TM, por lo tanto, en esta fase se pretende indagar en un rediseño del algoritmo que permita aumentar la velocidad de ejecución. El algoritmo inicial generaliza el comportamiento típico de un individuo y lo aplica para todos los usuarios. Para realizar esta replicación, el algoritmo debe recorrer completamente los 2,5 millones de transacciones diarias y verificar que cada una de ellas cumpla con las reglas definidas. En consecuencia, esta técnica es favorable en definición, pero exhaustiva en ejecución.

Para buscar una solución más eficiente a la asignación de los destinos se hace uso de la teoría TRIZ (Teoría para resolver problemas de forma inventiva), esta teoría pretende abordar de manera lógica y sistemática el proceso inventivo mediante la abstracción del problema a un conjunto de estrategias delimitadas o a fuente de conocimiento que se abstenga de las características inherentes al problema (The TRIZ Journal, 2018). Esta teoría posee un conjunto de 40 principios inventivos, que permiten guiar las diferentes dificultades del proceso de diseño a sus posibles soluciones, a partir de la caracterización de los patrones del sistema. De estos 40 principios se identifican 3 que pueden ser aplicados en el nuevo algoritmo. Para cada principio se muestra una posible solución en la Tabla 4.

TABLA 4: USO DE PRINCIPIOS DE INVENCION TRIZ

# Principio TRIZ	Descripción	Solución para el algoritmo
1. Segmentación	Incrementar el grado de fragmentación	Agrupar las transacciones por características demográficas
2. Sacar	Seleccionar solo la parte necesaria del objeto	Seleccionar solo el id, la fecha / hora y la estación de ingreso
33. Homogeneidad	Hacer interactuar los obj con uno del mismo material, como uno solo	Analizar el conjunto de transacciones como una sola matriz

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

El principio que plantea una solución más genérica es el principio 33, homogeneidad. Este presenta el conjunto de transacciones como una unidad o matriz lo que facilita la depuración de las reglas con el uso de cálculos matriciales. Esta abstracción aumenta la velocidad de procesamiento, sin perder el grado de granularidad deseado.



Las dimensiones de la matriz están dadas por el número de transacciones y las tres características identificadas en el principio 2, sacar: el id de la tarjeta/usuario $i \in U$, la estación de ingreso $o \in S$ y la hora de entrada o periodo $p \in P$. El algoritmo obedece las reglas y supuestos identificados en el paso de definir el método, de la fase diseñar y procede de la siguiente manera para un día $j \in D$ con la ejecución de los siguientes pasos:

1. Dividir el día en franjas horarias que serán representadas por $k \in P$ periodos.
2. Organizar la base de datos por subconjuntos de transacciones T_i de cada usuario $i \in U$. Cada subconjunto se organiza por la hora de transacción de menor a mayor.
3. Para todas las transacciones, asignar el periodo al que pertenecen dada la hora de ingreso y los periodos previamente establecidos en el paso 1.
4. Filtrar los usuarios de tal forma que su subconjunto de transacciones cumpla que $2 \leq |T_i| \leq 7$ para cada usuario $i \in U$.
5. Si dos transacciones consecutivas se realizan en la misma estación es necesario verificar si la transacción $t_{(l+1)i} \in T_i$ se efectúa en una ventana de tiempo superior a 5 minutos después de la transacción $t_{li} \in T_i$, si es así, eliminar $t_{li} \in T_i$, de lo contrario eliminar $t_{(l+1)i} \in T_i$.
6. La estación de la primera transacción $t_{1i} \in T_i$ se identifica como el origen del subconjunto T_i de cada usuario $i \in U$.
7. Para todas las transacciones t_{li} con $l \leq |T_i| - 1$, asignar como destino, la estación de origen de la transacción $t_{(l+1)i} \in T_i$ para cada subconjunto del usuario $i \in U$.
8. Para la transacción t_{li} con $l = |T_i|$, asignar como destino, la estación del origen del subconjunto T_i identificada en el paso 6.
9. Agrupar las transacciones por cada pareja origen destino por periodo y posteriormente contabilizar el número de transacciones de esta forma se determina el flujo de la demanda por cada periodo.

Esta metodología mantiene los supuestos iniciales, por lo tanto, al igual que el algoritmo inicial, se deben quitar las validaciones que se efectúan solo una vez al día, las que tienen comportamientos atípicos junto con aquellas que tienen la misma estación de origen. Para generar una matriz representativa del total de las validaciones iniciales se realiza el mismo factor de expansión explicado en el algoritmo anterior.



Las estadísticas descriptivas del tiempo de ejecución del algoritmo anteriormente descrito - matricial se toman con una muestra de 50 corridas con lo cual se obtuvo:

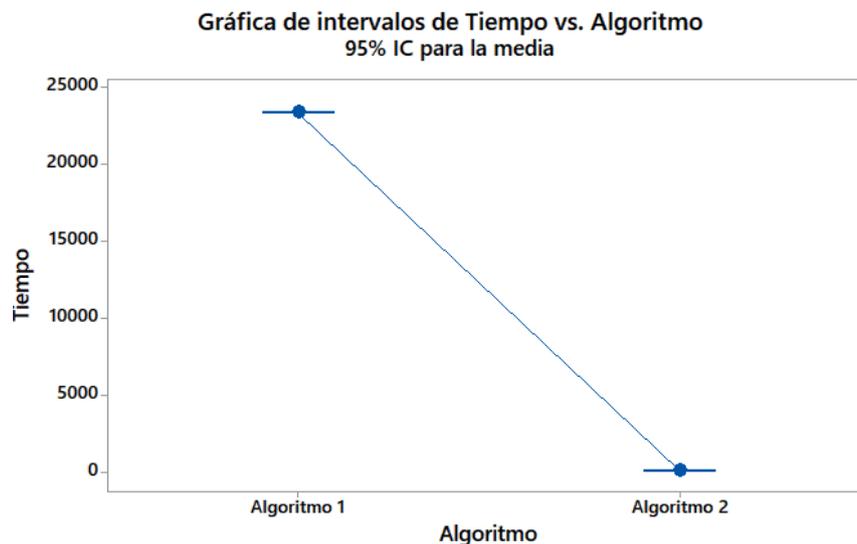
TABLA 5: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO MATRICIAL

Estadísticas descriptivas (segundos)	
Media	112.36
Desv.Est.	14.36
Mínimo	96.6
Máximo	152.97
Mediana	108.35

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

La media del tiempo de cada algoritmo muestra que el algoritmo matricial es 207 veces más corto que el algoritmo inicial. Para verificar la diferencia de los tiempos, se realiza una prueba de diferencia de medias con un nivel de confianza del 95%, que arroja como resultado un $pvalue = 0$, por lo tanto, se concluye que las medias de los algoritmos son significativamente diferentes. Los dos algoritmos se ejecutaron en un computador de procesador Intel Core i7 y una RAM de 8 GB.

FIGURA 9 - GRÁFICA DE DIFERENCIA DE MEDIAS ENTRE ALGORITMOS



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Al igual que el algoritmo anterior, se verifica la distribución que mejor se ajusta a los datos. Para este caso la distribución Weibull es la que mejor se aproxima a los datos, sin embargo, como se quiere comparar con el algoritmo inicial, se elige la distribución exponencial, teniendo en cuenta la prueba de Anderson-Darling con un $pvalue > 0.25$



TABLA 6: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE ANDERSON-DARLING

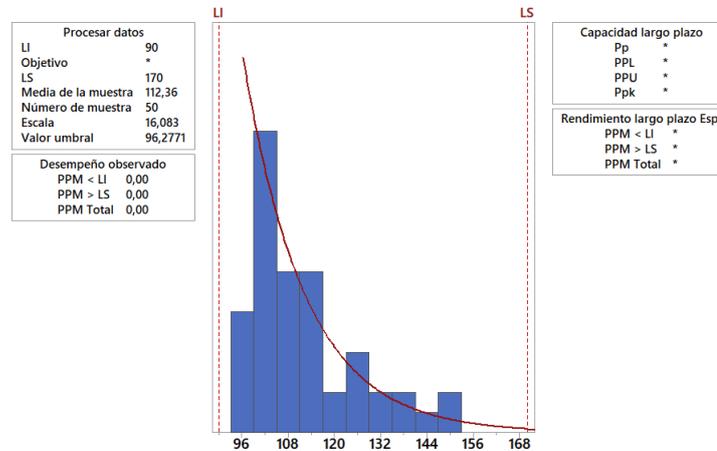
Distribución	p value
Weibull	> 0,500
Exponencial	> 0,250
Loglogística	< 0,005

FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Los límites de control del algoritmo matricial son los limites definidos en el algoritmo inicial, es decir, el límite superior igual a 6,5 horas (23506 segundos) y límite inferior igual a 0. Debido a que las medias difieren en escala, es pertinente disminuir el límite superior para facilitar la visualización del comportamiento del tiempo de ejecución del nuevo algoritmo (Figura 10).

FIGURA 10: DISTRIBUCIÓN Y LÍMITES DE CONTROL DEL ALGORITMO FINAL

Informe de capacidad del proceso de TiemposN
Cálculos basados en el modelo de distribución Exponencial



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

La reducción de la media en la ejecución del algoritmo es el principal logro en la fase de optimización, puesto que se inició con un proceso realizado por una consultora externa el cual tardaba alrededor de 10 días para la obtención de la matriz OD, pasando a un algoritmo con media 6.5 horas y posteriormente a 112 segundos. Gracias a esta colosal reducción, ningún dato se encuentra por fuera de los límites de capacidad definidos previamente, lo que genera una calidad en términos del tiempo del 100%. En la etapa de diseño ya se habían cumplido con los objetivos del proceso, sin embargo, vale la pena recalcar que el tiempo de



ejecución del nuevo algoritmo genera una reducción superior al 50% con respecto al tiempo de ejecución del diseño inicial.

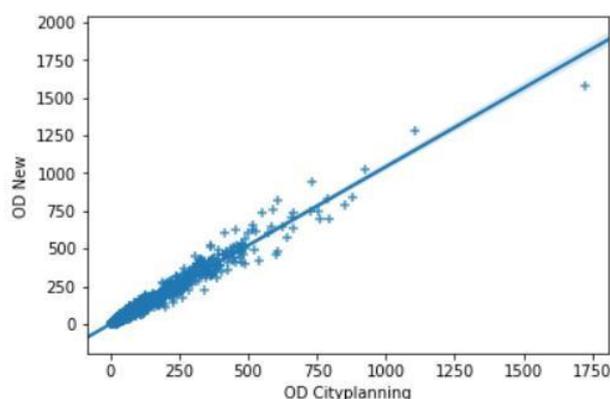
6 RESULTADOS

Los objetivos del proyecto están compuestos por dos grupos de objetivos específicos: de proceso y de resultados. Los objetivos del proceso se cumplieron con la creación del algoritmo matricial, sin embargo, es necesario verificar el cumplimiento de los objetivos de los resultados, que son el segundo grupo de objetivos definidos. Para ello es necesario validar si existe una representatividad superior al 95% de la matriz actual (última actualización de la matriz por parte de la consultora) y crear un visualizador de la información y análisis de resultados mediante comparaciones de diferentes periodos.

En primer lugar, se realiza la comparación de los resultados que tiene actualmente Transmilenio S.A., otorgados por el consultor, con los resultados del algoritmo matricial de forma que el modelo matricial represente el modelo anterior. Para esto, se hace uso de una regresión lineal que compara las dos estimaciones de la demanda con la que se espera obtener un

$R^2 \approx 1$ junto con una pendiente $\beta_1 \approx 1$ y punto de intersección $\beta_0 \approx 0$ (Romero y Nieto, 2017).

FIGURA 11: COMPARACIÓN RESULTADOS PROYECTO CON MATRIZ ACTUAL



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

El nuevo modelo matricial representa los resultados de la matriz OD realizada por el Consultor de Recaudo Bogotá, con un

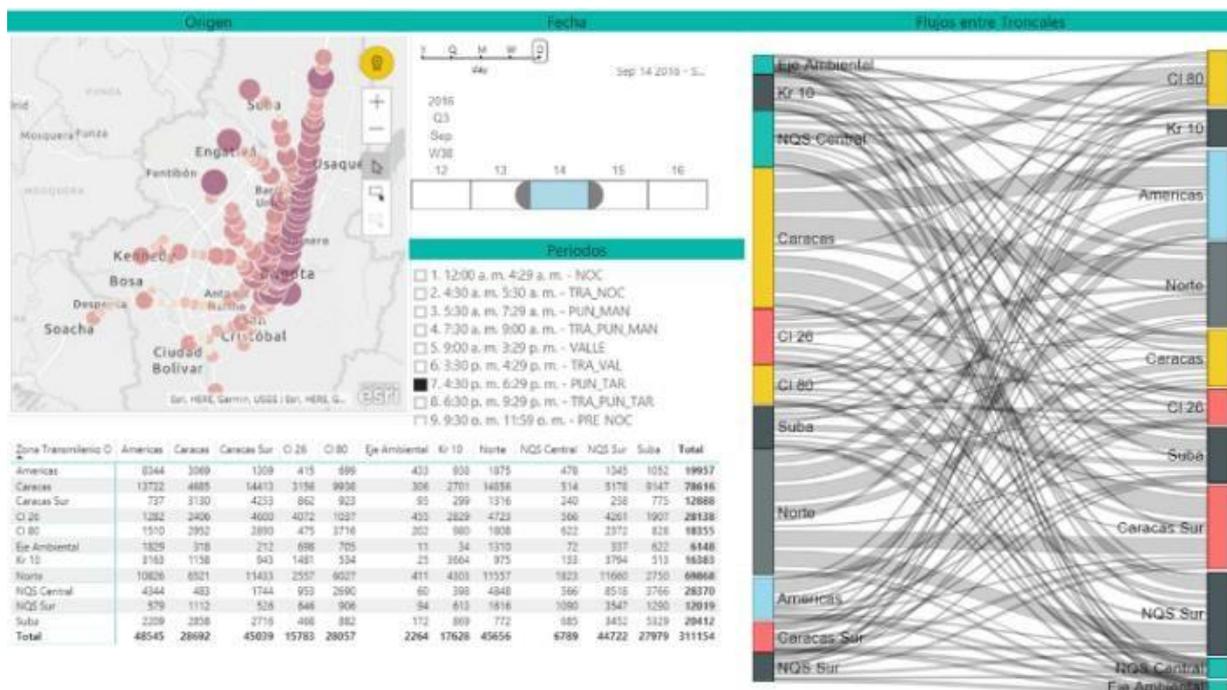


R2 ≈ 0.97 y una pendiente β1 ≈ 0.93, dado un nivel de confiabilidad del 95%. Esto nos indica que las variaciones entre los resultados son mínimas.

Así mismo se requiere que los resultados de la matriz sean visualmente interpretables y permitan su exploración mediante la interacción del equipo de planeación de TransMilenio S.A. con los resultados del algoritmo. Para cumplirlo, se hace uso de Power BI, un software de análisis de datos, de uso comercial que permite una sencilla visualización de la información. El insumo para este programa es la matriz OD obtenida del algoritmo matricial y la ubicación geográfica de las estaciones. Con esta información se crean 4 informes analíticos para la toma de decisiones.

El primer informe permite una exploración a nivel troncal de la matriz (Figura 12). Este tablero permite elegir el día y el periodo que se desea analizar. En el informe se identifica una capa base de la división política de ArcGis con las cantidades de las entradas a cada una de las estaciones, un mapa de flujo entre las troncales y finalmente la matriz origen destino.

FIGURA 12: TABLERO DE ANÁLISIS DE FLUJO ENTRE TRONCALES



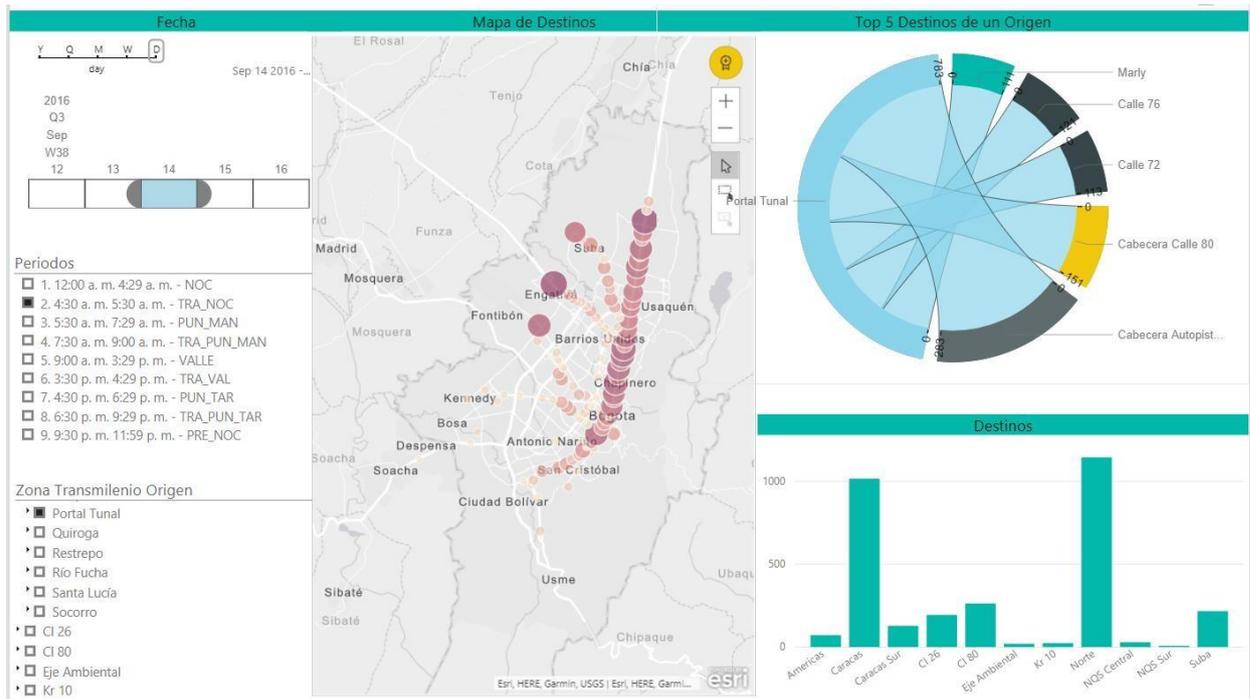
FUONTE: Elaboración Propia (2019)

El segundo informe, realiza un análisis por origen para conocer sus destinos. Este tablero filtra por día, periodo, troncal y estación. A partir de un origen muestra la cantidad de



viajes hacia cada destino ilustrados en el mapa de la ciudad con las ubicaciones de cada estación, en el diagrama de acorde se ilustran las 5 principales estaciones a las que se dirigen los usuarios, finalmente en el diagrama de barras se muestran las troncales con la suma de los viajes que reciben.

FIGURA 13: TABLERO DE ANÁLISIS DE LOS DESTINOS DE UN ORIGEN

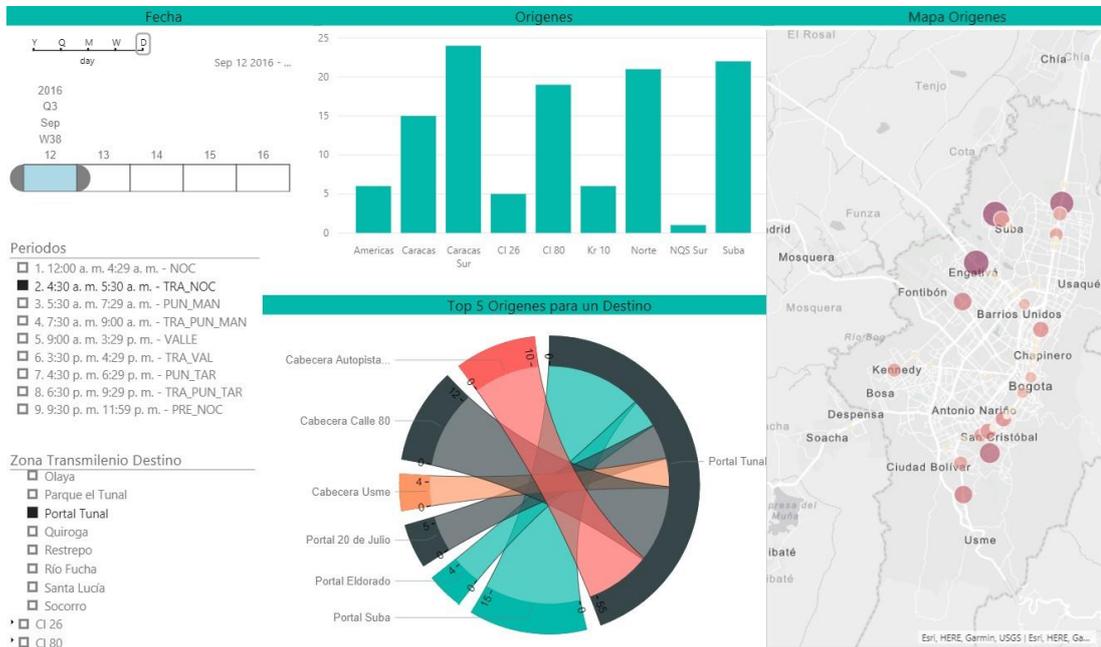


FUONTE: Elaboración Propia (2019)

El tercer informe, permite identificar para cada día, periodo y estación el origen de los usuarios. Es el análisis inverso al anterior, es decir, se analizan los orígenes para una estación destino.



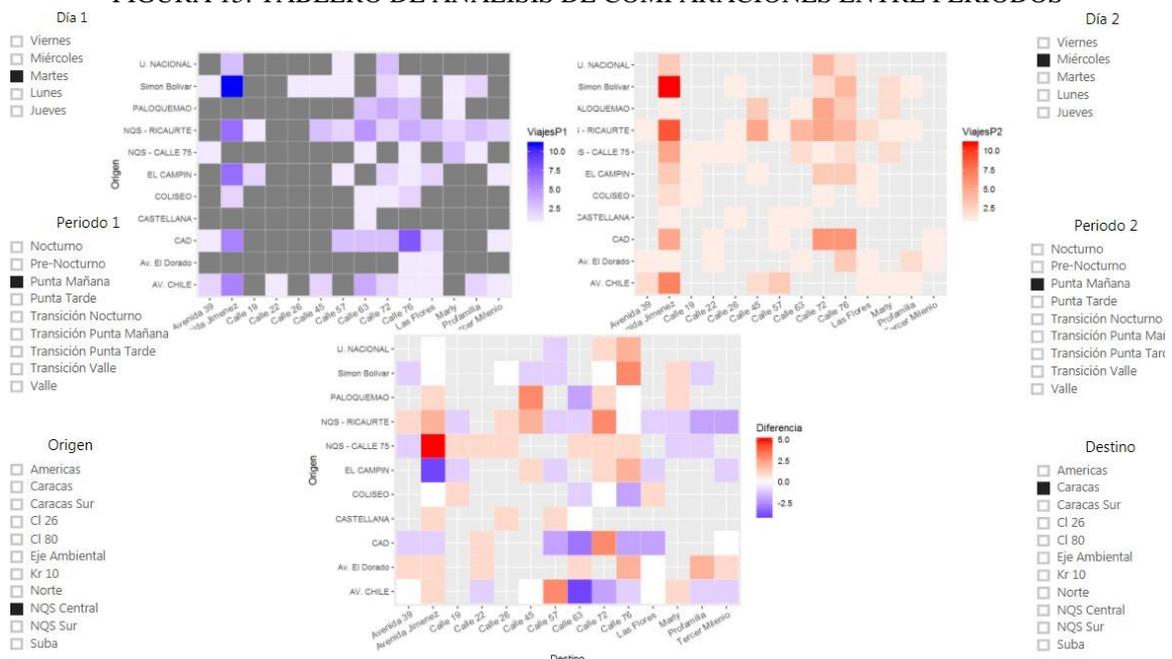
FIGURA 14 - TABLERO DE ANÁLISIS DE LOS ORÍGENES DE UN DESTINO



FUONTE: Elaboración Propia (2019)

Por último, el cuarto informe atiende el objetivo de análisis mediante comparaciones de diferentes periodos. Este tablero permite realizar comparaciones entre diferentes días y periodos, con el fin de analizar y cuantificar los incrementos o las disminuciones en la demanda en dichos fragmentos de la matriz.

FIGURA 15: TABLERO DE ANÁLISIS DE COMPARACIONES ENTRE PERIODOS



FUONTE: Elaboración Propia (2019)



El uso de estos tableros permite una exploración mas cercana de la matriz OD, de manera que se pueden identificar comportamientos tipicos y atipicos de acuerdo a las comparaciones entre estaciones, periodos y dias.

Para finalizar el proyecto es fundamental que el equipo de planeación tenga total control del las herramientas desarrolladas y de esta forma cumplir el requisito crítico de satisfacción relacionada con el recurso humano dueño del proceso. Para esto se realizan secciones de capacitacion del equipo en la que se instalan los requerimientos de software y se ejecuta el proceso acabalidad. Con esto, se cumple con la entrega de un proceso eficiente en terminos de tiempo computacional y de bajo costo, que facilita la exploración del comportamiento de la demanda del sistema TransMilenio de forma que se tenga un mayor conocimiento de las conductas tipicas y atipicas, lo que facilita la planeación y mejora del sistema.

7 CONCLUSIÓN

El proyecto propone la implementación de un algoritmo para obtener la matriz origen-destino a partir de la información de las tarjetas inteligentes para el sistema BRT TransMilenio, de forma eficiente. La principal contribución está relacionada con el tiempo de ejecución del algoritmo ya que se pasó de tener análisis semestrales de la demanda a tener análisis de cualquier periodo deseado en cuestión de segundos, lo que permite tener análisis más flexibles y oportunos de los cambios de la demanda del sistema.

La eficiencia del algoritmo también es medible en términos de los recursos usados para realizar los análisis. El algoritmo generado, no requiere de las tradicionales encuestas a los usuarios ni de un software especializado para este procedimiento, sin embargo, logra dar resultados que permiten dar un diseño muy aproximado de la situación real de la demanda.

Finalmente, de este proyecto se despliegan retos futuros que pueden ser agrupados en dos fragmentos. El primero es realizar una calibración de los resultados obtenidos por medio del uso de información endógena y exógena al sistema y el segundo reto es la creacion de matrices multimodales que incluyan el SITP zonal, los buses duales y las rutas alimentadoras del SITP troncal.



REFERENCIAS

- BOGOTA, A. M. de. 2016. **En una hora, Transmilenio atendió a los asistentes al concierto de los Rolling Stones.** [Online] Available : <http://www.bogota.gov.co/article/temas-de-ciudad/movilidad/transmilenio-atendio-asistentes-al-concierto-de-rolling-stones>
- BARRY, J.J., Newhouser, R., RAHBEE, A., SAYEDA, S., 2002. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. **Transportation Research Record** 1817, 183-187.
- BOGOTA COMO VAMOS, 2017. **Encuesta de percepción ciudadana 2017.** [Online]. Available: <http://www.bogotacomovamos.org/documentos/encuesta-de-percepcion-ciudadana-2017/>
- CARRASCO, J. A., & MUNIZAGA, M. (2013). **Transport Survey Methods: Best Practice for Decision Making** - Google Books, 307.
- COUNCIL FOR SIX SIGMA CERTIFICATION. **Six Sigma Green Belt Certification**, 2018, [Online]. Available: <https://www.sixsigmacouncil.org/wp-content/uploads/2018/09/Six-Sigma-Green-Belt-Certification-Training-Manual-CSSC-2018-06b.pdf>
- HIRSTE. 2007. **Introduction to TRIZ , theory of inventive problem solving.**[Online]. Available: https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/ftmsc/modules/modulelist/peuss/slides/section_4b_triz_by_eh_31_dec_2008_ver_0.4_student.pdf
- INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT Policy (ITDP). **The online BRT planning guide**, 2017, (4th ed.) [Online]. Available: <https://brtguide.itdp.org/branch/master/guide/demand-analysis/>
- LEE, D. a., MILLER, D. L., & SKINNER, R. E. (2007). Bus Rapid Transit Practitioner's Guide. **Transportation Research Board of the National Academies**, Washington, DC Available: https://www.acea.be/uploads/publications/20th_SAG_HR.pdf
- LEVINSON, H. S., ZIMMERMAN, S., CLINGER, J., & GAST, J. (2003). Bus Rapid Transit: Synthesis of Case Studies. **Transportation Research Board 2003 Annual Meeting**, 31. <https://doi.org/10.3141/1841-01>
- MUNIZAGA, M. y PALMA, C., 2012. Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin – destination matrix for passive smart card data from Santiago, Chile. **Transportation Research Part C : Emerging Technologies**, 24, pp. 9-18. DOI: 10.1016-j.trc.2012.01.007
- PELLETIER, M.-P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 19(4), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.003>
- ROMERO y NIETO, 2017. **Estimación de la matriz Origen-Destino uso de las Tarjetas Inteligentes : Componente Troncal del SITP**
- SEMANA, 2014 **Polémica por la cifra de la ciclovía nocturna.** [Online]. Available : <https://www.semana.com/nacion/articulo/bogota-critican-cifras-de-ciclovía-nocturna/411924-3>



www.relainep.ufpr.br



SITP, 2017. Glosario. [Online]. Available : <http://www.sitp.gov.co/Glosario/B>

THE TRIZ JOURNAL, 2018 **What is TRIZ ?** [Online]. Available :<https://triz-journal.com/what-is-triz/>

WANG, W., ATTANUCCI, J., & WILSON, N. (2011). Bus Passenger Origin-Destination Estimation and Related Analyses Using Automated Data Collection Systems. **Journal of Public Transportation**, 14(4), 131–150.

YANG, K.(2005), “**Design for Six Sigma Service**”, McGraw-Hill Education, [Online]. Available: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uniandes.edu.co:8443/browse/design-for-six-sigma-for-service>

ZHAO, J., RAHBEE, A., WILSON, N., 2007. Estimating a rail passenger trip origin-destination matrix using automatic data collection systems. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering** 22, 376-387. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00494.x

ZHANG, C. y OSORIO, C., 2018. **Efficient offline calibration of origin-destination demand for large-scale stochastic traffic models.** [Online]. Available : <http://web.mit.edu/osorioc/www/papers/zhaOsoODcalib.pdf>