

PORTADA



Caracterización del transporte de carga en Bogotá D.C. y los municipios priorizados

Documento Matrices y Modelo 2025
2025-2026

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	CONSTRUCCIÓN DE MATRICES ORIGEN DESTINO	10
2.1.	Sistema de zonificación de encuestas	10
2.2.	Procesamiento y georreferenciación de las encuestas EODI.....	12
2.3.	Expansión de Encuestas	12
2.4.	Ajuste por dobles conteos y sistemático de matrices.....	16
	<i>Paso 1. Identificación de la ruta y estaciones de paso por par O-D.....</i>	<i>20</i>
	<i>Paso 2. Construcción de la matriz de pasos por estación</i>	<i>21</i>
	<i>Paso 3. Estimación inicial del valor sistema por par O-D</i>	<i>21</i>
	<i>Paso 4. Redistribución del flujo O-D en la red de estaciones</i>	<i>21</i>
	<i>Paso 5. Comparación con aforos y cálculo de factores de ajuste por estación/sentido</i>	<i>21</i>
	<i>Paso 6. Proceso iterativo y convergencia.....</i>	<i>22</i>
2.5.	Sistematización del ejercicio de corrección de dobles conteos y ajuste sistemático ..	23
2.6.	Matrices por periodo y tipología vehicular.....	23
2.6.1.	Segmentación por tipología vehicular	24
2.6.2.	Segmentación por periodo de análisis	32
2.7.	Estimación de las longitudes de viaje	38
3.	CALIBRACIÓN DE MATRICES EN EL MODELO DE TRANSPORTE	41
3.1.	Modelo de transporte de referencia	42
3.1.1.	Modelo de Oferta	45
3.1.2.	Modelo de Demanda.....	50
3.1.3.	Arquitectura del modelo	56
3.1.4.	Calibración del modelo	63
3.2.	Actualización de la red.....	77
3.3.	Procesamiento de aforos y definición de volúmenes de control.....	80
3.4.	Calibración de matrices e Indicadores de Bondad	82
3.4.1.	Calibración día hábil HP-AM	84
3.4.2.	Calibración día hábil HP-PM	88
3.5.	Análisis de resultados.....	90
3.5.1.	Análisis de resultados día hábil HP-AM	91
3.5.2.	Análisis de resultados día hábil HP-PM	95
4.	RESUMEN Y COMPARACIÓN DE MATRICES.....	99
4.1.	Matrices modeladas día hábil HPAM	100
4.2.	Matrices horarias día hábil.....	101

4.2.1.	Camiones C2L	101
4.2.2.	Camiones C2P	101
1.1.1.	Camiones C2G	102
4.2.3.	Camiones C3	102
4.2.4.	Camiones C4 y superiores	102
4.3.	Matrices horarias sábado	102
4.3.1.	Camiones C2L	102
4.3.2.	Camiones C2P	103
1.1.2.	Camiones C2G	103
4.3.3.	Camiones C3	103
4.3.4.	Camiones C4 y superiores	104
4.4.	Matrices diarias	104
4.4.1.	Camiones C2L	104
4.4.2.	Camiones C2P	104
1.1.3.	Camiones C2G	104
4.4.3.	Camiones C3	105
4.4.4.	Camiones C4 y superiores	105
5.	CONCLUSIONES	106
6.	BIBLIOGRAFÍA	110

ABREVIATURAS Y SIGLAS

Abreviación	Descripción
AM	Hora Pico de la Mañana
PM	Hora Pico de la Tarde
COV	Costos de Operación Vehicular
CP	Camiones Pequeños
CG	Camiones Grandes
C2L	Camión de 2 ejes liviano
C2P	Camión de 2 ejes pequeño
C2G	Camión de 2 ejes grande
C3	Camión de 3 ejes
C4M	Camiones de 4 o más ejes
EODI	Encuesta Origen–Destino de Interceptación
GEH	Geoffrey E. Havers
HMD	Hora de Máxima Demanda
HPAM	Hora Pico AM
HPPM	Hora Pico PM
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano
KMZ	Formato geoespacial de Google Earth
O-D	Origen–Destino
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad
SDP	Secretaría Distrital de Planeación
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público
TM	TransMilenio
VOT	Valor del Tiempo
ZAT	Zona de Análisis de Transporte
EMME	Software de modelación de transporte utilizado para la simulación y asignación de viajes
HP	Hora Pico
TP	Transporte Público
VP	Vehículo Particular
OD	Origen–Destino
RMS	Root Mean Square (Raíz del Error Cuadrático Medio)
GAP	Indicador de convergencia del modelo de asignación
GIS	Sistema de Información Geográfica
SHP	Formato de archivo geoespacial tipo shapefile

Índice De Figuras

Figura 1 Zonificación utilizada para la codificación de matrices OD	11
Figura 2 Periodos de expansión.....	15
Figura 3 Presentación gráfica de la problemática de dobles conteos	17
Figura 4 Distribución geográfica de estaciones EODI	18
Figura 5 Problemática necesidad de ajuste sistemático y dobles conteos.....	18
Figura 6 Metodología de ajuste sistemático y dobles conteos.....	20
Figura 7 Estructura del modelo de transporte de 4 etapas de Bogotá – Región	43
Figura 8 Municipios vecinos al área de estudio	44
Figura 9 Oferta vial del modelo de referencia.....	46
Figura 11 Modelo de oferta de rutas troncales del modelo de referencia	48
Figura 11 Modelo de oferta de rutas zonales del modelo de referencia	49
Figura 12 Modelo de oferta de rutas intermunicipales del modelo de referencia	50
Figura 13 Zonas de análisis de transporte del modelo de referencia.....	52
Figura 14 Segmentos poblacionales modelos de elección	54
Figura 15 Segmentación del modelo de referencia	56
Figura 16 Estructura del modelo de transporte de 4 etapas de Bogotá – Región	57
Figura 17 Ajuste modelo de producción a nivel de ZAT	58
Figura 18 Ajuste modelo de atracción a nivel de ZAT	58
Figura 19 Distribución viajes segmentos Bogotá estratos 1, 2 y 3.....	59
Figura 20 Distribución viajes segmentos Bogotá estratos 4, 5 y 6.....	60
Figura 21 Distribución viajes segmentos municipios	60
Figura 22 Estructura del modelo de elección	61
Figura 23 Puntos de calibración de transporte privado.....	64
Figura 24 Puntos de calibración de transporte público	65
Figura 25 Calibración de tiempos de ciclo en rutas de transporte público	72
Figura 26 Asignación de volúmenes de transporte privado	73
Figura 27 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente troncal.....	74
Figura 28 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente zonal	75
Figura 29 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente alimentador	76
Figura 30 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente intermunicipal.....	77
Figura 31 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente intermunicipal.....	78
Figura 32 Zonas de restricción tránsito de carga definidas en el artículo 487 del Decreto 652 de 2025.....	79
Figura 33 Distribución geográfica de controles internos y externos por segmento de camiones - HPAM	81
Figura 34 Distribución geográfica de controles internos y externos por segmento de camiones - HPPM	82
Figura 35 Dispersión de flujos observados y simulados – CP y CG (HP-AM)	85
Figura 36 Análisis de Estadísticos GEH – CP y CG (HP-AM)	86
Figura 37 Dispersión de flujos observados y simulados – CP y CG (HP-PM)	89
Figura 38 Análisis de Estadísticos GEH – CP y CG (HP-PM)	90
Figura 39 Matriz calibrada – CP (HP-AM)	92
Figura 40 Asignación de la demanda de CP (HP-AM).....	93
Figura 41 Matriz calibrada – CG (HP-AM).....	94
Figura 42 Asignación de la demanda de CG (HP-AM)	95
Figura 43 Matriz calibrada – CP (HP-PM)	96
Figura 44 Asignación de la demanda de CP (HP-PM).....	97
Figura 45 Matriz calibrada – CG (HP-PM).....	98

Índice De Tablas

Tabla 1 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos horarios de día hábil típico	25
Tabla 2 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos horarios de día sábado típico	25
Tabla 3 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos diarios	25
Tabla 4 Viajes C2L – Periodos horarios de día hábil típico	26
Tabla 5 Viajes C2L – Periodos horarios de día sábado típico	26
Tabla 6 Viajes C2L – Periodos diarios	27
Tabla 7 Viajes C2P – Periodos horarios de día hábil típico	28
Tabla 8 Viajes C2P – Periodos horarios de día sábado típico	28
Tabla 9 Viajes C2P – Periodos diarios	28
Tabla 10 Viajes C2G – Periodos horarios de día hábil típico.....	29
Tabla 11 Viajes C2G – Periodos horarios de día sábado típico.....	29
Tabla 12 Viajes C2G – Periodos diarios.....	29
Tabla 13 Viajes C3 – Periodos horarios de día hábil típico	30
Tabla 14 Viajes C3 – Periodos horarios de día sábado típico	30
Tabla 15 Viajes C3 – Periodos diarios	31
Tabla 16 Viajes C4M – Periodos horarios de día hábil típico.....	31
Tabla 17 Viajes C4M – Periodos horarios de día sábado típico	32
Tabla 18 Viajes C4M – Periodos diarios.....	32
Tabla 19 Viajes periodo horario HMD-AM/Sistema 6:15–7:15, Día Hábil típico.....	33
Tabla 20 Viajes periodo horario HMD-AM/Carga 10:00–11:00, Día Hábil típico	34
Tabla 21 Viajes periodo horario HMD-PM/Carga 16:30–17:30, Día Hábil típico	34
Tabla 22 Viajes periodo horario HMD-Noche/Carga 20:00–21:00, Día Hábil típico	35
Tabla 23 Viajes periodo horario HMD-AM/Sistema 6:15–7:15, Día Sábado	35
Tabla 24 Viajes periodo horario HMD-AM/Carga 10:00–11:00, Día Sábado	36
Tabla 25 Viajes periodo horario HMD-PM/Carga 16:30–17:30, Día Sábado	36
Tabla 26 Viajes periodo horario HMD-Noche/Carga 20:00–21:00, Día Sábado	37
Tabla 27 Matrices diarias - Día Hábil	37
Tabla 28 Matrices diarias - Día Sábado	38
Tabla 29 Longitud promedio por tipo de vehículo.....	39
Tabla 30 Longitud promedio ponderada por demanda por tipo de vehículo	40
Tabla 31 Número de rutas ofertadas de transporte público	47
Tabla 32 Matriz de tarifas de transferencias entre rutas de transporte público	54
Tabla 33 Valores VOT del modelo de referencia.....	55
Tabla 34 Controles por subsistema de transporte público	66
Tabla 35 Validación de GEH por tipología de vehículos particulares.....	67
Tabla 36 Calibración por tipología de vehículos particulares.....	69
Tabla 37 Velocidades máximas, mínimas y promedio (km/h).....	70
Tabla 38 Calibración de volúmenes por subsistema de transporte público	71
Tabla 39 Cantidad de controles por segmento y periodo de modelación	81
Tabla 40 Análisis puntos con GEH > 12.....	87
Tabla 41 Viajes Camiones Modelados para el Periodo de Día Hábil HPAM.....	100
Tabla 42 Comparación de Viajes C2L – Periodos horarios de día hábil típico.....	101
Tabla 43 Comparación de Viajes C2P – Periodos horarios de día hábil típico	101

Tabla 44 Comparación de Viajes C2G – Periodos horarios de día hábil típico	102
Tabla 45 Comparación de Viajes C3 – Periodos horarios de día hábil típico.....	102
Tabla 46 Comparación de Viajes C4M – Periodos horarios de día hábil típico.....	102
Tabla 47 Viajes C2L – Periodos horarios de día sábado típico	102
Tabla 48 Viajes C2P – Periodos horarios de día sábado típico	103
Tabla 49 Viajes C2G – Periodos horarios de día sábado típico.....	103
Tabla 50 Viajes C3 – Periodos horarios de día sábado típico	103
Tabla 51 Viajes C4 – Periodos horarios de día sábado típico	104
Tabla 52 Viajes C2L – Periodos diarios	104
Tabla 53 Viajes C2P – Periodos diarios	104
Tabla 54 Viajes C2G – Periodos diarios.....	104
Tabla 55 Viajes C3 – Periodos diarios	105
Tabla 56 Viajes C4M – Periodos diarios.....	105

1. INTRODUCCIÓN

La Secretaría Distrital de Movilidad como cabeza del sector en la ciudad de Bogotá, realiza un seguimiento periódico a las dinámicas urbanas que influyen en el flujo de personas y mercancías en el territorio. El presente documento tiene como objeto presentar la caracterización del transporte de carga; el cual se desarrolla mediante las siguientes actividades.

- a. Consolidación, depuración y análisis de la información primaria y secundaria asociada al transporte de carga en Bogotá y los municipios priorizados.
- b. Caracterización de los patrones de movilidad de carga, considerando aspectos operacionales, temporales, espaciales y tipológicos de los viajes de carga.
- c. Desarrollo y ajuste del modelo de transporte de carga, incluyendo los procesos de eliminación de dobles conteos, ajuste sistemático y calibración de matrices y flujos.
- d. Análisis de resultados del modelo de transporte de carga, incluyendo la identificación de corredores, patrones de distribución y dinámicas territoriales del transporte de mercancías.
- e. Generación de productos cartográficos, estadísticos y técnicos que permitan soportar la toma de decisiones y la formulación de estrategias asociadas a la gestión de la movilidad y logística de carga.

El presente documento describe los procesos desarrollados para la estimación de las matrices de viajes correspondientes a los diez (10) períodos definidos para día hábil y sábado, así como para los periodos específicos de análisis establecidos dentro del estudio. En este contexto, se presenta un análisis detallado de los procedimientos metodológicos definidos contractualmente, con el propósito de construir matrices origen–destino representativas para los distintos tipos de vehículos de carga considerados en el proyecto, correspondientes a las siguientes categorías:

- Camiones de 2 ejes livianos.
- Camiones de 2 ejes pequeños.
- Camiones de 2 ejes grandes.
- Camiones de 3 ejes.
- Camiones de 4 o más.

El proceso inicia con la expansión directa de la muestra de encuestas origen–destino (OD) en cada una de las estaciones de interceptación, considerando los volúmenes vehiculares por sentido registrados en dichos puntos. Posteriormente, para la totalidad de los períodos definidos en el estudio, se desarrolla el proceso de identificación y eliminación de dobles conteos, así como el ajuste sistemático de las matrices obtenidas, con el fin de garantizar la consistencia estadística y operativa de los viajes estimados y evitar patrones atípicos o sobreestimaciones derivadas de múltiples capturas de un mismo vehículo dentro de la red de estaciones.

Una vez consolidadas las matrices corregidas, se desarrolla el proceso de calibración para los periodos modelados explícitamente dentro de la herramienta de transporte de 4 etapas de la ciudad, correspondientes a la Hora Pico AM (6:15–7:15) y la Hora Pico PM (17:00–18:00). Este proceso se realiza mediante la comparación y ajuste de los flujos asignados frente al modelo de transporte de Bogotá–Región para el escenario base 2025 para carga, buscando garantizar coherencia entre los volúmenes modelados y los observados en campo para los distintos segmentos de vehículos de carga.

Finalmente, se presenta una comparación de los resultados obtenidos frente a ejercicios y estudios desarrollados en períodos anteriores, con el propósito de contextualizar los patrones identificados y evaluar la consistencia de las dinámicas de transporte de carga en el tiempo.

2. CONSTRUCCIÓN DE MATRICES ORIGEN DESTINO

El presente capítulo describe el proceso metodológico desarrollado para la construcción de las matrices origen–destino (O-D) de transporte de carga en el área de estudio, a partir de la integración de información proveniente de encuestas de interceptación (EODI), aforos vehiculares clasificados y el modelo de transporte Bogotá–Región.

El proceso comprende el tratamiento de la información base, incluyendo su depuración, georreferenciación y codificación en el sistema de zonificación adoptado, así como la expansión de la muestra mediante factores derivados de los volúmenes observados en campo. Posteriormente, se aborda la integración de las matrices a nivel de sistema, incorporando un procedimiento de ajuste orientado a corregir posibles dobles conteos y garantizar la consistencia entre los flujos estimados y los observados.

Como resultado de este proceso, se obtienen matrices origen–destino representativas del comportamiento de la demanda de transporte de carga, diferenciadas por tipología vehicular, periodo de análisis y ámbito espacial, las cuales constituyen el insumo base para la calibración del modelo y el análisis de resultados presentados en los capítulos siguientes.

2.1. Sistema de zonificación de encuestas

Para la construcción de las matrices origen–destino (O-D) de carga, se adoptó el sistema de zonificación del modelo de transporte de cuatro etapas de Bogotá–Región (versión 2023), con el propósito de garantizar la consistencia metodológica, la compatibilidad con herramientas existentes de análisis de movilidad y la integración con el modelo de transporte en los periodos que serán objeto de modelación.

La adopción de este sistema de zonificación permite asegurar la coherencia entre los diferentes componentes del estudio, en la medida en que los periodos modelados (hora pico AM y hora pico PM) serán calibrados directamente en dicho modelo, requiriendo una correspondencia espacial entre las matrices de demanda y la red de transporte. Asimismo, el uso de esta zonificación facilita la comparabilidad de resultados con ejercicios previos y el aprovechamiento de insumos existentes, tales como redes, aforos y parámetros de modelación.

El modelo de referencia cuenta con una estructura de 1.215 Zonas de Análisis de Transporte (ZATs), definidas a partir de criterios técnicos que incluyen límites administrativos, barreras físicas, características del territorio y variables socioeconómicas. Esta zonificación fue diseñada para representar de manera adecuada los patrones de generación y atracción de viajes en un contexto urbano-regional, incorporando tanto la dinámica interna de la ciudad como su interacción con los municipios de la región.

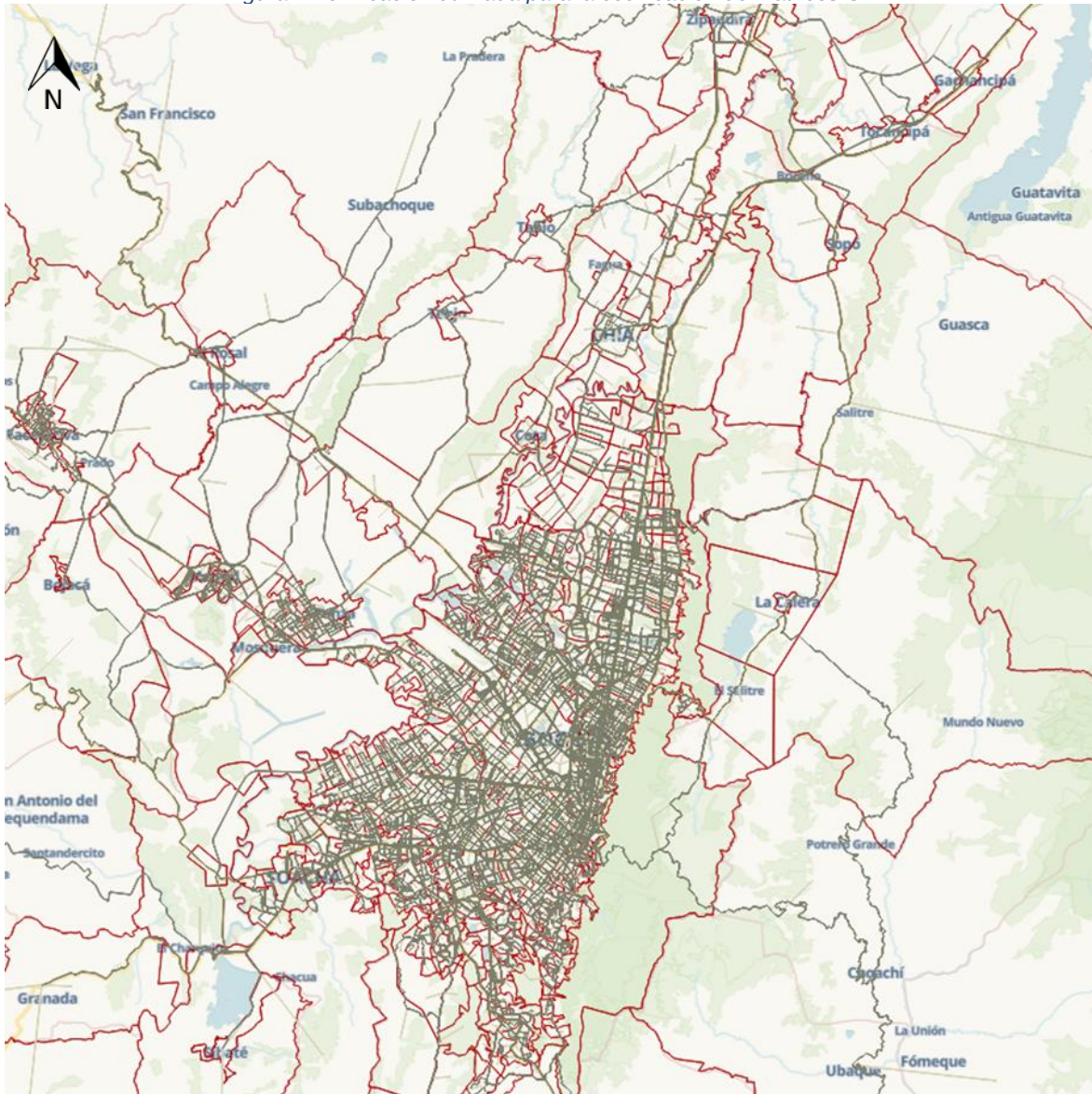
Desde la perspectiva del transporte de carga, esta estructura resulta especialmente adecuada, en la medida en que permite capturar la localización de los principales generadores y atractores de viajes de carga, tales como zonas industriales, plataformas logísticas, centros de distribución y corredores estratégicos de acceso a la ciudad. Adicionalmente, el nivel de desagregación de las ZATs permite realizar análisis detallados de flujos de carga con un nivel adecuado de confianza, tanto a escala urbana como regional.

De igual forma, la zonificación adoptada integra información relevante del territorio, incluyendo instrumentos de planificación como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y la red de

infraestructura de transporte existente y proyectada, lo cual resulta fundamental para el análisis de la demanda de carga y su relación con la estructura logística de la región.

En la siguiente figura se presenta el sistema de zonificación utilizado, el cual constituye la base espacial para el procesamiento de encuestas, la construcción de matrices O-D y su posterior integración con el modelo de transporte.

Figura 1 Zonificación utilizada para la codificación de matrices OD



Fuente: Elaboración propia

2.2. Procesamiento y georreferenciación de las encuestas EODI

Las Encuestas Origen–Destino de Interceptación (EODI) constituyen la principal fuente de información para la caracterización de los patrones de movilidad de carga en el área de estudio. En este sentido, se desarrolló un proceso estructurado de procesamiento, depuración y georreferenciación de la información recolectada, con el fin de garantizar su calidad, consistencia y representatividad para la construcción de las matrices origen–destino (O-D).

En una primera etapa, se realizó la revisión y depuración de la base de datos de encuestas, enfocada en la identificación de registros incompletos, inconsistentes o atípicos. Este proceso incluyó la validación de variables clave tales como origen, destino, tipo de vehículo, tipo de carga, horarios de viaje, entre otras características relacionadas con el generador de la carga y operativas del recorrido. Asimismo, se efectuaron controles de coherencia lógica entre variables, así como la identificación de valores fuera de rango o no representativos del comportamiento típico del transporte de carga.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de georreferenciación o geocodificación de los viajes, mediante la asignación de los orígenes y destinos reportados en las encuestas a las Zonas de Análisis de Transporte (ZATs) definidas en el sistema de zonificación adoptado. Este proceso se realizó a partir de la interpretación de direcciones, puntos de referencia y/o coordenadas geográficas, asegurando la correcta localización espacial de los registros y su consistencia con la estructura territorial del modelo (mismo definido como sistema de zonificación del presente estudio).

Dado que las EODI corresponden a encuestas de interceptación realizadas en puntos específicos de la red vial, se consideró igualmente la localización del punto de captura como un elemento clave para la validación de los trayectos reportados, permitiendo verificar la coherencia entre el recorrido declarado y la ubicación del punto de encuesta.

Finalmente, los registros fueron clasificados por tipología vehicular, diferenciando entre camiones C2L, C2P, C2G, C3 y C4 o superiores, con el fin de capturar las diferencias en patrones de operación, capacidad de carga y comportamiento logístico. Como resultado de este proceso, se obtuvo una base de datos depurada y georreferenciada, consistente con el sistema de zonificación, que constituye el insumo base para la expansión de la información y la posterior construcción de las matrices O-D de carga.

2.3. Expansión de Encuestas

El proceso de expansión de las encuestas se fundamenta en la integración de dos fuentes principales de información: las Encuestas Origen–Destino de Interceptación (EODI) y los aforos vehiculares clasificados. Mientras que las EODI permiten caracterizar los patrones de viaje de los vehículos de carga, los aforos constituyen la referencia cuantitativa del volumen total de tráfico, lo que permite extrapolar la información muestral al universo de vehículos observados en la red.

En este sentido, se realizó la articulación entre las bases de encuestas y los volúmenes de tráfico, asegurando la correspondencia entre los periodos de observación, los puntos de control, el sentido de circulación y la clasificación vehicular. Este ejercicio permitió contar con una base

sólida y coherente para el cálculo de factores de expansión y la posterior estimación de la demanda de transporte de carga.

Con el objetivo de estimar matrices de viajes representativas del tráfico de carga en el área de estudio a nivel de estación, se llevó a cabo el proceso de expansión de las encuestas origen–destino realizadas mediante interceptación. En una primera etapa, la muestra fue segmentada en cinco categorías vehiculares, con el fin de capturar diferencias en los patrones de operación y demanda:

- Camiones de 2 ejes livianos.
- Camiones de 2 ejes pequeños.
- Camiones de 2 ejes grandes.
- Camiones de 3 ejes.
- Camiones de 4 o más de 2 ejes.

Posteriormente, se definieron las encuestas válidas que conforman la base de expansión, considerando únicamente aquellas que cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

- Identificación del momento de aplicación de la encuesta (periodo temporal)
- Clasificación del tipo de vehículo (segmento)
- Registro completo de origen y destino del viaje (Codificada con ZAT).
- Identificación la estación y sentido de aplicación

A partir de esta depuración, se realizó la expansión de la muestra mediante la relación entre:

- Muestra (n): número de encuestas válidas por segmento, estación, sentido y periodo.
- Población (N): volumen total de vehículos observado mediante aforos para el mismo segmento, estación, sentido y periodo.

El factor de expansión fue calculado como la razón entre la población y la muestra para cada una de las combinaciones definidas, permitiendo extrapolar los viajes observados en la muestra al universo de vehículos que transitan en el corredor, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Factor\ de\ Expansión_{(e,s,p)} = \frac{n_{(e,s,p)}}{N_{(e,s,p)}}$$

... que también se puede expresar como

$$Factor\ Expansión_{e,s,p} = \text{Número Vehículos Totales}_{e,s,p} / \text{Número Encuestas Válidas}_{e,s,p}$$

donde e corresponde a la estación, s al segmento vehicular y p al periodo de análisis.

Este procedimiento se aplicó de manera independiente para un conjunto de periodos de expansión, definidos en función de la disponibilidad de información y la variabilidad temporal del tráfico, incluyendo:

- Periodos horarios día hábil
 - HMD-AM/Sistema día hábil: 6:15-7:15
 - HMD-AM/Carga día hábil de carga: 10:00-11:00
 - HMD-PM/Carga día hábil de carga: 16:30-17:30
 - HMD-Noche/Carga día hábil de carga: 20:00 - 21:00

- Periodos horarios día hábil modelados
 - HMD-AM/Modelada día hábil: 6:15-7:15 (mismo sistema)
 - HMD-PM/Modelada día hábil: 17:00-18:00
- Periodos horarios día sábado
 - HMD-AM/Sistema sábado: 6:15-7:15
 - HMD-AM/Carga sábado de carga: 10:00-11:00
 - HMD-PM/Carga sábado de carga: 16:30-17:30
 - HMD-Noche/Carga sábado de carga: 20:00 - 21:00
- Periodos agregados a nivel de día
 - Día hábil
 - Día sábado

Figura 2 Periodos de expansión

PERIODOS DE EXPANSIÓN

1 PERIODOS HORARIOS DÍA HÁBIL 		HMD-AM/Sistema día hábil	6:15 - 7:15
		HMD-AM/Carga día hábil de carga	10:00 - 11:00
		HMD-PM/Carga día hábil de carga	16:30 - 17:30
		HMD-Noche/Carga día hábil de carga	20:00 - 21:00
2 PERIODOS HORARIOS DÍA HÁBIL MODELADOS 		HMD-AM/Modelada día hábil (mismo sistema)	6:15 - 7:15
		HMD-PM/Modelada día hábil	17:00 - 18:00
3 PERIODOS HORARIOS DÍA SÁBADO 		HMD-AM/Sistema sábado	6:15 - 7:15
		HMD-AM/Carga sábado de carga	10:00 - 11:00
		HMD-PM/Carga sábado de carga	16:30 - 17:30
		HMD-Noche/Carga sábado de carga	20:00 - 21:00
4 PERIODOS AGREGADOS A NIVEL DE DÍA 		Día hábil	
		Día sábado	

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la aplicación de estos factores permitió obtener una estimación expandida de los viajes de carga, diferenciada por segmento vehicular, punto de control, sentido de circulación y periodo de análisis, garantizando consistencia entre la información proveniente de encuestas y los volúmenes observados en campo.

Como resultado de este proceso, se generó una base de datos expandida que constituye el insumo para la construcción de matrices origen–destino, la cual se presenta en el Anexo Matrices.

En este punto, se dispone de matrices origen–destino derivadas de las EODI, expandidas a nivel de estación, sentido de circulación y tipología vehicular. No obstante, dado que estas matrices se construyen de manera independiente por punto de captura, el siguiente reto metodológico consiste en su integración a nivel de sistema, evitando la sobreestimación de flujos derivada de posibles dobles conteos. Para ello, se plantea la consolidación de estas matrices mediante la aplicación de factores de ajuste, definidos a partir de un análisis probabilístico de ocurrencia de dobles conteos, con el fin de obtener matrices representativas del comportamiento global de la demanda de carga.

2.4. Ajuste por dobles conteos y sistemático de matrices

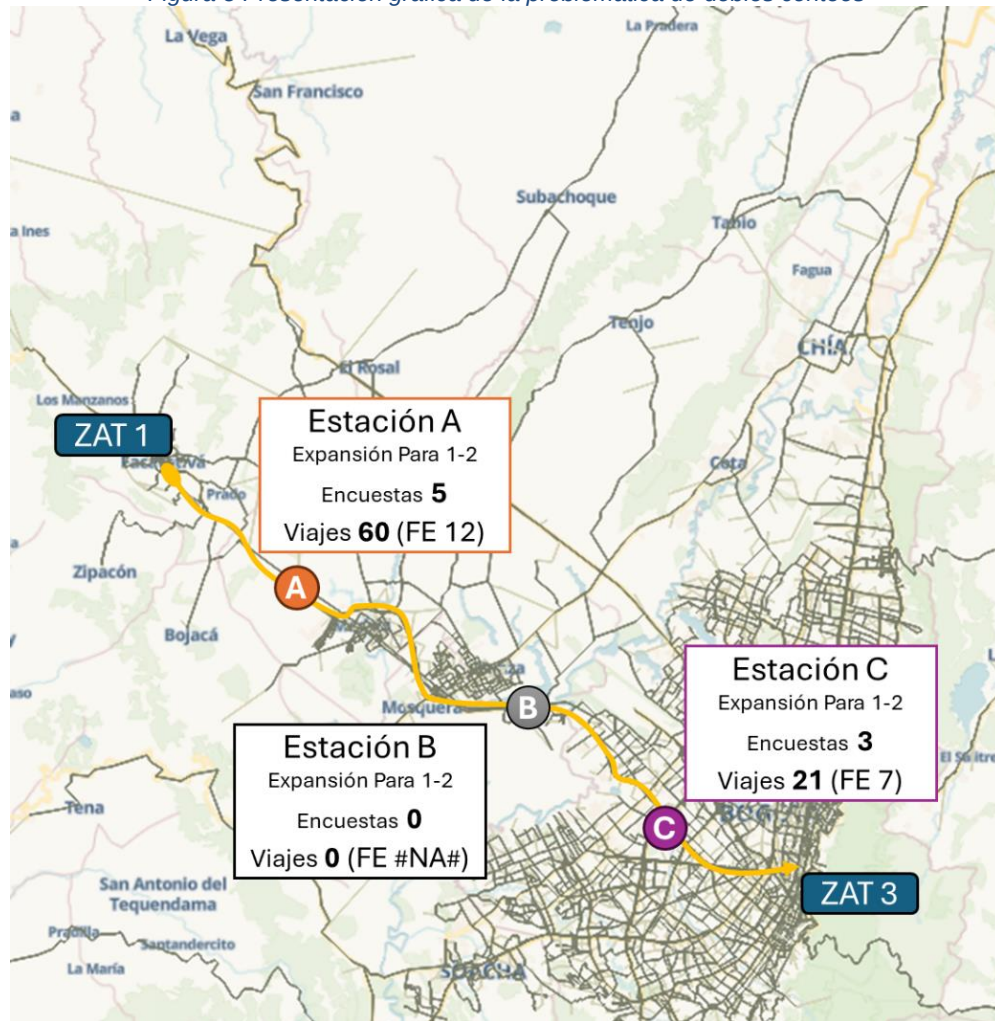
Como se indicó en la sección previa, el proceso de expansión permitió obtener matrices origen–destino a nivel de estación, sentido de circulación y tipología vehicular. Sin embargo, dado que estas matrices se construyen de manera independiente por estación, su integración directa puede generar sobreestimaciones en los flujos debido a la posible ocurrencia de dobles conteos, asociados a la probabilidad de interceptación de un mismo vehículo en más de una estación a lo largo de su recorrido.

Luego de obtener los factores de expansión y realizar la validación estadística de la información, se generan matrices preliminares para cada estación, sentido, periodo y tipología vehicular observada en campo, las cuales representan los viajes registrados en cada estación de manera independiente. Estas matrices, denominadas matrices preliminares o parciales, deben ser posteriormente integradas en una única matriz que represente de manera consistente los viajes realizados en el sistema para una determinada categoría y periodo de análisis.

No obstante, la agregación directa de estas matrices parciales puede generar inconsistencias cuando existen pares origen–destino que presentan valores diferentes o incluso ausencia de registro entre estaciones. Esta situación se origina debido a que el proceso de recolección de información en campo no garantiza una observación completa y homogénea de todos los pares O-D, sino que depende de la ubicación de los puntos de interceptación y de la probabilidad de captura de los vehículos en cada estación.

La siguiente figura ilustra este problema a partir de un ejemplo conceptual para un mismo par origen–destino. En la estación A se registra el par O-D con una estimación de 60 viajes, en la estación B no se registra dicho par (por lo que no existe estimación de viajes), y en la estación C se registra nuevamente el par con una estimación de 21 viajes. Estas diferencias responden tanto a la variabilidad inherente al proceso de muestreo como a las distintas tasas de captura en cada punto de control.

Figura 3 Presentación gráfica de la problemática de dobles conteos



Fuente: Elaboración propia

En este contexto, la agregación directa de las matrices ($60 + 0 + 21$) conduce a una sobreestimación de los flujos, mientras que la adopción de valores mínimos o parciales puede generar subestimaciones significativas. Adicionalmente, el problema se ve acentuado por el hecho de que cada estación presenta una tasa de muestreo distinta, lo que implica que los factores de expansión aplicados no son homogéneos entre puntos de captura.

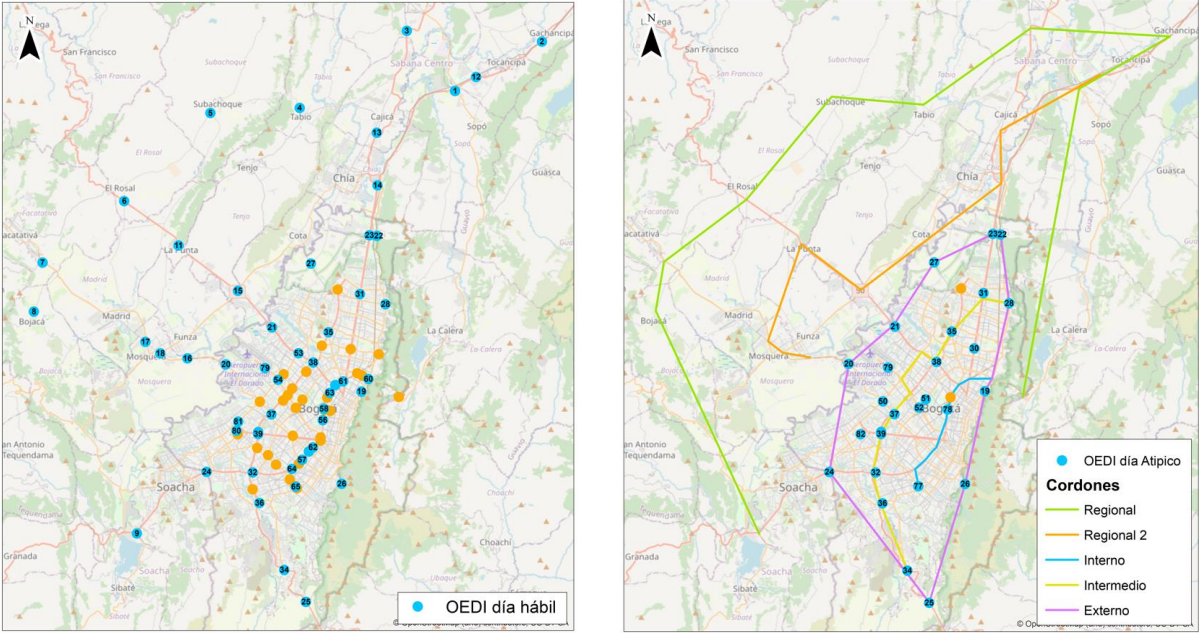
En consecuencia, se hace necesario implementar un procedimiento de ajuste que permita integrar las matrices parciales de manera consistente, corrigiendo los efectos de dobles conteos y garantizando una representación adecuada de los flujos a nivel de sistema.

En este contexto, el objetivo de esta etapa consiste en consolidar las matrices expandidas en una representación coherente a nivel de sistema, garantizando que cada viaje sea contabilizado una única vez y preservando la consistencia entre los volúmenes estimados y los observados en campo.

Para ello, se desarrolló un enfoque basado en el análisis de la probabilidad de ocurrencia de dobles conteos, considerando la configuración de la red de estaciones, los aforos asociados a

volúmenes de expansión y los patrones de recorrido de los vehículos de carga. Este análisis permitió identificar los corredores y trayectorias con mayor probabilidad de intercepción múltiple, incluyendo en accesos a la ciudad y ejes logísticos estructurantes; en la siguiente figura se presenta la distribución espacial de las estaciones en donde se aplicaron EODI y aforos clasificados, las cuales se integraron al proceso para conformar las bases a nivel de sistema.

Figura 4 Distribución geográfica de estaciones EODI



Fuente: Elaboración propia

A partir de este diagnóstico y entendimiento de la problemática, se definió el proceso de ajuste sistemático y por dobles conteos aplicados sobre las matrices expandidas, los cuales permiten corregir la sobre-representación de flujos mediante la redistribución proporcional de los viajes.

Figura 5 Problemática necesidad de ajuste sistemático y dobles conteos



Fuente: Elaboración propia

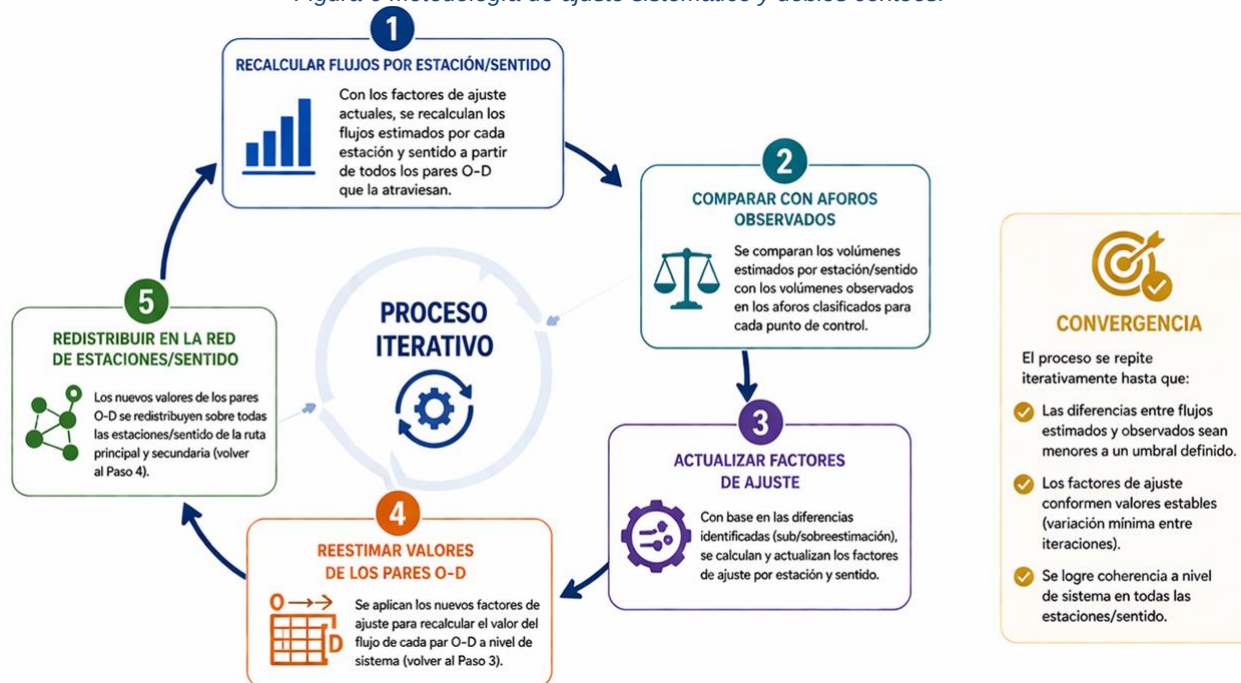
Estos factores fueron estimados considerando los siguientes principios:

- **Probabilidad de intercepción múltiple por corredor.** La corrección de dobles conteos no debe limitarse a las estaciones donde se observó directamente un par origen–destino, sino que debe considerar todas aquellas estaciones en las que existe probabilidad de registro del mismo viaje, en función de su trayectoria dentro de la red. Esto permite capturar de manera más realista la ocurrencia de intercepciones múltiples y evitar sesgos en la estimación de los flujos.
- **Complejidad en la elección de rutas en transporte de carga:** La elección de rutas en el transporte de carga responde a una lógica operativa más compleja que la de otros modos, al estar asociada a cadenas logísticas y secuencias de viajes planificados, más allá de un trayecto origen–destino aislado. Adicionalmente, los vehículos de carga enfrentan restricciones específicas relacionadas con la jerarquía vial, las condiciones geométricas y el estado de la infraestructura, lo cual limita el uso de vías secundarias y condiciona la selección de rutas. En este contexto, la representación de las trayectorias requiere considerar estas particularidades para aproximar de manera adecuada el comportamiento real de los flujos.
- **Recurrencia y estabilidad en la elección de rutas de carga.** En términos generales, los vehículos de carga tienden a utilizar rutas recurrentes y relativamente estables en el tiempo, lo cual se explica por la estructuración de las cadenas de distribución, las restricciones operativas asociadas a la infraestructura vial (particularmente en vías de menor jerarquía) y el conocimiento limitado de rutas alternativas por parte de conductores en trayectos de media y larga distancia. Esta condición favorece la concentración de flujos en corredores específicos y permite aproximar las trayectorias de los pares origen–destino con un grado razonable de certidumbre.
- **Integración de fuentes de información complementarias:** La estimación de la demanda de carga requiere la integración de múltiples fuentes de información, cada una con diferentes niveles de cobertura y precisión (encuestas, aforos, modelo de transporte), por lo que la metodología se fundamenta en su reconciliación para obtener resultados consistentes a nivel de sistema.
- **Consistencia entre flujos observados y estimados.** La relación entre los volúmenes observados mediante aforos y los flujos estimados a partir del procesamiento de encuestas constituye un criterio fundamental de validación a nivel de sistema. En este sentido, la metodología busca garantizar coherencia entre ambas fuentes, ajustando los flujos estimados de manera que representen adecuadamente la magnitud y distribución del tráfico de carga en la red.
- **Necesidad de consistencia espacial y sistémica.** Las matrices origen–destino deben representar de manera coherente los flujos a nivel de sistema, garantizando que los volúmenes estimados sean consistentes tanto a nivel de par O-D como en su agregación sobre la red de transporte.
- **Enfoque iterativo de ajuste.** Dada la naturaleza compleja del problema, la estimación de matrices O-D se aborda mediante un proceso iterativo que permite ajustar progresivamente los flujos hasta lograr coherencia entre las distintas fuentes de información y niveles de agregación.

Metodología de integración y ajuste de matrices O-D

Enseguida se presenta la metodología de integración y ajuste de matrices O-D, que permitió el proceso de eliminación de dobles conteos, ajuste sistemático y la consolidación de matrices a nivel de sistema.

Figura 6 Metodología de ajuste sistemático y dobles conteos.



Fuente: Elaboración propia

El proceso descrito a continuación se desarrolló de manera independiente para cada categoría vehicular, sentido de circulación y periodo de análisis, garantizando la consistencia en la estimación de la demanda en los distintos niveles de desagregación requeridos y se presenta en el Anexo de Matrices.

Paso 1. Identificación de la ruta y estaciones de paso por par O-D

En una primera etapa, se determinó la ruta con mayor probabilidad de uso de cada par origen–destino (O-D) y, las estaciones/sentidos (EODI) por las que transita durante el recorrido de dichas trayectorias.

Para ello, se utilizó el modelo de asignación del modelo de transporte Bogotá–Región 2023, mediante el cual se realizó la asignación de matrices unitarias O-D correspondientes a los pares observados en las encuestas en la totalidad de los registros OD; esta asignación consideró las velocidades a flujo libre considerando la prelación que tienen los corredores de buenas especificaciones en relación con el transporte de carga.

Este proceso permitió identificar la ruta principal de menores impedancias (pues como se presentará más adelante se complementó el modelo de transporte con la caracterización de Costos de Operación de Vehicular).

Paso 2. Construcción de la matriz de pasos por estación

Con base en los resultados de la asignación, se procedió a identificar las estaciones EODI por donde transita cada par O-D. Para ello, se implementó un esquema de marcación de la red de transporte, mediante la asignación de códigos únicos a los enlaces (links) asociados a cada estación y sentido de interceptación.

A partir de esta codificación, se identificaron los enlaces recorridos por cada par O-D durante el proceso de asignación, permitiendo determinar las estaciones por las cuales transita cada viaje. Como resultado, se construyó una matriz de pasos, en la cual cada par O-D cuenta con una marca asociada de tránsito por cada estación y sentido de interceptación.

Paso 3. Estimación inicial del valor sistema por par O-D

De manera complementaria, se contaba con los valores de los pares O-D obtenidos a partir del proceso de expansión de encuestas a nivel de estación y sentido. A partir de estos insumos, se estimó un valor inicial del flujo de cada par O-D a nivel de sistema, así:

- Para las estaciones marcadas por la ruta principal, la estimación del Par OD de ruta principal se cuantificó mediante la media de los valores expandidos en las ODs de las estaciones/sentido de la ruta principal en las cuales se registró el par OD.
- Para las estaciones no marcadas por la ruta principal, la estimación del Par OD de ruta secundaria se cuantificó mediante la media de los valores expandidos en las ODs de las estaciones/sentido que no pertenecen a la ruta principal y por las cuales se registró el par OD.
- La estimación del par OD a nivel de sistema se estimó inicialmente como la suma de las estimaciones previamente descritas (estimación del Par OD de ruta principal + estimación del Par OD de ruta secundaria).

De esta forma, se obtuvo un conjunto de estimaciones del flujo del par O-D a nivel de sistema, a nivel par denominaremos esta estimación como el Valor Medio Inicial del Par O-D.

Paso 4. Redistribución del flujo O-D en la red de estaciones

El valor medio estimado para cada par O-D fue posteriormente redistribuido sobre todas las estaciones/sentido de la ruta principal (considerando la proporción del par relacionado con la ruta principal) y a ruta secundaria (considerando la proporción del par relacionado con las rutas secundarias). Considerando que se contaba con la marca de pasos para el caso de la ruta principal, la distribución del par OD incluyó todas las estaciones/sentido de la ruta principal marcado (incluyendo en las que no contaban con registros iniciales), estos valores como se mencionó antes consideraron la distribución entre las 2 rutas analizadas.

Paso 5. Comparación con aforos y cálculo de factores de ajuste por estación/sentido

A partir de la agregación de los flujos estimados por estación/sentido, se obtuvo un volumen total de tráfico por punto de control estimado, el cual fue comparado con los volúmenes observados mediante aforos clasificados.

Las diferencias identificadas entre los flujos estimados y observados permitieron cuantificar desviaciones asociadas a subestimación o sobreestimación de la demanda en cada estación.

Con base en esta comparación, se calcularon factores de ajuste por estación y sentido, los cuales fueron aplicados a todos los pares O-D que transitan por cada punto de control.

Paso 6. Proceso iterativo y convergencia

Una vez aplicados los factores de ajuste, se recalculó el valor del flujo de cada par O-D a nivel de sistema (paso 3), este nuevo valor del par O-D fue nuevamente redistribuido en la red de estaciones/sentido (paso 4), iniciando un proceso ajuste derivado de la comparación del flujo estimado y observado (paso 5). De esta manera, el proceso descrito en los pasos anteriores se desarrolló de manera iterativa, en el cual:

- En cada iteración se recalculan los flujos por estación
- Se comparan nuevamente con los aforos
- Se actualizan los factores de ajuste
- Se reestiman los valores de los pares O-D

Durante las primeras iteraciones se evidenció una rápida convergencia de los resultados, mientras que en iteraciones posteriores la convergencia se volvió progresivamente más lenta, reflejando la estabilización del sistema. La evaluación de la convergencia se realizó mediante el análisis de la dispersión entre los flujos estimados y observados en cada estación, priorizando la consistencia operativa y la coherencia global del sistema. No se emplearon indicadores estadísticos formales (como GEH o RMSE), dado que el objetivo principal del proceso no era la calibración de un modelo, sino la reconciliación de información proveniente de distintas fuentes, con diferentes niveles de incertidumbre y representatividad. En este contexto, el uso de métricas agregadas podría inducir interpretaciones sesgadas, mientras que el análisis directo de dispersión permite un control más adecuado a nivel de estación y segmento.

De esta manera se construyó una metodología desarrollada que presenta una aproximación robusta e innovadora para la estimación de matrices origen–destino de carga, al integrar de manera consistente múltiples fuentes de información, incluyendo encuestas de interceptación (EODI), aforos clasificados y el modelo de transporte Bogotá–Región. Su enfoque permite capturar de forma realista las trayectorias de los flujos de carga en la red, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en agregaciones directas. Asimismo, la incorporación de un esquema iterativo de ajuste, basado en la reconciliación entre flujos estimados y observados, garantiza la coherencia a nivel de sistema y corrige de manera efectiva los efectos de dobles conteos y sesgos de muestreo. En conjunto, este enfoque permitió obtener matrices representativas, consistentes y técnicamente defendibles, adecuadas para su integración en modelos de transporte y para el análisis de la dinámica logística de la región.

Como se mencionó previamente, el proceso de ajuste se realizó de manera diferenciada por segmento vehicular, estación, sentido y periodo, con el fin de preservar las particularidades operativas del transporte de carga y evitar la introducción de sesgos agregados. Adicionalmente, se aplicaron procedimientos de balanceo de matrices para asegurar la consistencia global de los flujos a nivel de sistema, garantizando que los volúmenes totales resultantes se mantengan alineados con los registros de aforos y que la distribución espacial de la demanda conserve coherencia con la estructura logística observada.

Como resultado de este proceso, se obtuvieron matrices origen–destino ajustadas, representativas del sistema de transporte de carga en el área de estudio, las cuales constituyen la base para los análisis posteriores y su integración en el modelo de transporte.

2.5. Sistematización del ejercicio de corrección de dobles conteos y ajuste sistemático

Con el fin de garantizar la consistencia y trazabilidad del proceso de corrección de dobles conteos y ajuste sistemático de las matrices origen–destino de carga, se desarrolló una metodología completamente sistematizada y parcialmente automatizada, permitiendo integrar la información de encuestas y aforos de manera consistente para cada segmento vehicular y periodo de análisis.

El procedimiento implementado se estructuró a partir de los siguientes pasos metodológicos como se describió previamente:

- Paso 1. Identificación de la ruta y estaciones de paso por par O-D
- Paso 2. Construcción de la matriz de pasos por estación
- Paso 3. Estimación inicial del valor sistema por par O-D
- Paso 4. Redistribución del flujo O-D en la red de estaciones
- Paso 5. Comparación con aforos y cálculo de factores de ajuste por estación/sentido
- Paso 6. Proceso iterativo y convergencia

Como parte del proceso de automatización, el Paso 1 fue desarrollado mediante el script:

asig_priv_Pasos_Carga.py

Este script permite realizar la asignación de los pares origen–destino sobre la red de transporte y construir automáticamente la secuencia de estaciones de interceptación por las cuales pasa cada viaje. El resultado corresponde a una matriz de pasos por estación, utilizada posteriormente como insumo base para el proceso de corrección de dobles conteos.

Posteriormente, los pasos comprendidos entre el Paso 2 y el Paso 6 fueron desarrollados mediante archivos de procesamiento independientes, incluidos como anexos al presente informe (ver capítulo 7 Anexos). Estos archivos implementan de manera sistemática el proceso de construcción de matrices de pasos, redistribución de flujos, cálculo de factores de ajuste y ejecución iterativa hasta alcanzar convergencia entre los flujos reconstruidos y los aforos observados.

Se cuenta con un archivo específico para cada segmento vehicular y para cada periodo de análisis, permitiendo mantener trazabilidad completa sobre el procedimiento desarrollado y los resultados obtenidos. Como resultado final del proceso, se obtienen matrices origen–destino ajustadas y corregidas por dobles conteos, consistentes con la información observada en campo y coherentes con las dinámicas operativas del sistema de transporte de carga Bogotá–Región.

La sistematización implementada permitió adicionalmente garantizar reproducibilidad, control metodológico y consistencia entre periodos y segmentos, reduciendo significativamente los tiempos de procesamiento y minimizando posibles errores asociados a tratamientos manuales de la información.

2.6. Matrices por periodo y tipología vehicular

En esta sección se presentan las matrices origen–destino (O-D) resultantes del proceso de expansión, ajuste e integración a nivel de sistema, diferenciadas tanto por tipología vehicular

como por periodo de análisis. Esta doble segmentación permite capturar de manera integral las dinámicas del transporte de carga, reconociendo las diferencias operativas entre tipos de vehículos y las variaciones temporales asociadas a las actividades logísticas y de abastecimiento de la ciudad y su región.

Las matrices desarrolladas representan los patrones de movilidad de carga para los distintos periodos definidos dentro del estudio, incluyendo periodos diarios y horarios tanto para día hábil como sábado. A partir de estas matrices es posible identificar los principales corredores de circulación de mercancías, las zonas con mayor generación y atracción de viajes de carga, y las diferencias operativas existentes entre categorías vehiculares.

Con el fin de facilitar el análisis e interpretación de resultados, la presentación de la información se estructura a partir de dos enfoques complementarios: (i) la caracterización de la demanda por tipología vehicular, manteniendo constante el periodo de análisis, y (ii) la caracterización de la demanda por periodo, manteniendo constante la tipología vehicular. Esta aproximación permite analizar tanto las diferencias espaciales entre tipos de camiones como las variaciones temporales en los patrones de operación de la carga.

Para cada caso se presentan representaciones espaciales de generación y atracción de viajes, así como tablas resumen e indicadores agregados asociados al número total de viajes, distribución territorial de la demanda y participación relativa de cada segmento vehicular dentro del sistema. Estos resultados constituyen un insumo fundamental para comprender las dinámicas de carga de Bogotá–Región y para soportar futuros análisis de modelación, calibración y planificación del transporte de carga.

2.6.1. Segmentación por tipología vehicular

En este apartado se presenta la caracterización de las matrices O-D diferenciadas por tipología vehicular, con el propósito de analizar las particularidades de distribución espacial en Bogotá y Región de los viajes de carga para cada tipo de camión considerado dentro del estudio.

La segmentación vehicular permite identificar diferencias relevantes en el comportamiento operativo de los distintos tipos de vehículos de carga, entendiendo que cada categoría presenta dinámicas particulares asociadas a capacidad de carga, tipo de operación logística, alcance territorial y patrones de circulación dentro de la red vial. En este sentido, el análisis individual por tipología constituye un elemento clave para comprender de manera más precisa la interacción entre la movilidad de mercancías y el sistema de transporte de la ciudad.

Para cada categoría vehicular se presentan matrices horarias y diarias, diferenciadas por tipo de día (hábil y sábado), mediante tablas que permiten entender la distribución territorial de la demanda. De manera complementaria, se analizan las principales concentraciones de viajes y los corredores con mayor participación de cada tipología, permitiendo identificar diferencias entre vehículos livianos, medianos y pesados.

Este análisis facilita la identificación de patrones específicos de operación de transporte de carga, así como la comprensión de la forma en que cada segmento vehicular interactúa con la infraestructura vial y con las dinámicas urbanas y regionales de abastecimiento.

Tabla 1 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	C2L	C2P	C2G	C3	C4M	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	5.022	2.332	2.641	369	553	10.917
		%	46,00%	21,36%	24,19%	3,38%	5,06%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	9.983	4.685	5.298	905	1.380	22.252
		%	44,86%	21,05%	23,81%	4,07%	6,20%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	8.105	3.392	3.696	489	1.087	16.769
		%	48,33%	20,23%	22,04%	2,92%	6,48%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	3.511	1.222	2.267	216	766	7.982
		%	43,99%	15,31%	28,40%	2,70%	9,60%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que los vehículos tipo C2L concentran la mayor participación de viajes en todos los periodos analizados, representando cerca del 45% del total de viajes de carga, lo cual evidencia el peso de las operaciones urbanas y de distribución local dentro del sistema. Asimismo, el mayor volumen de viajes se presenta en el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), mientras que en el periodo nocturno disminuye el total de viajes y aumenta la participación relativa de vehículos de mayor capacidad, especialmente C2G y C4M, reflejando una tendencia de la carga pesada a operar en horarios de menor congestión.

Tabla 2 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	C2L	C2P	C2G	C3	C4M	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	6.635	2.496	3.055	507	716	13.410
		%	49,48%	18,61%	22,78%	3,78%	5,34%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	6.233	2.802	3.155	445	858	13.493
		%	46,19%	20,77%	23,38%	3,30%	6,36%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	4.783	1.480	1.753	172	895	9.083
		%	52,65%	16,30%	19,30%	1,90%	9,85%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	2.502	799	1.242	87	348	4.979
		%	50,25%	16,05%	24,95%	1,75%	7,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados para el día sábado muestran nuevamente una predominancia de los vehículos tipo C2L, los cuales representan entre el 46% y el 53% de los viajes de carga en todos los periodos analizados. A diferencia del día hábil, se observa una menor participación general de viajes y una reducción importante en los periodos PM y nocturnos, lo que refleja una disminución de la actividad logística durante el sábado. Sin embargo, los vehículos de mayor capacidad, especialmente C4M, incrementan su participación relativa en algunos periodos, particularmente en la tarde, evidenciando que ciertas operaciones de carga pesada continúan desarrollándose en horarios de menor congestión y menor interacción con la movilidad urbana.

Tabla 3 Viajes por periodo segmentados por tipología vehicular – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	C2L	C2P	C2G	C3	C4M	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	129.728	55.765	69.603	11.440	22.725	289.262
		%	44,85%	19,28%	24,06%	3,96%	7,86%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	89.732	35.307	43.686	5.813	16.963	191.501
		%	46,86%	18,44%	22,81%	3,04%	8,86%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

A nivel diario, los resultados evidencian que el sistema de transporte de carga presenta una actividad significativamente mayor en día hábil, con cerca de 289 mil viajes, frente a aproximadamente 192 mil viajes registrados en sábado. En ambos casos, los vehículos tipo C2L

concentran la mayor participación de viajes, representando cerca del 45% del total, lo que confirma la predominancia de operaciones de distribución urbana y regional de corta distancia. Asimismo, se observa que los vehículos de mayor capacidad, particularmente C4M, incrementan ligeramente su participación relativa en sábado, reflejando una mayor presencia de operaciones de carga pesada durante periodos con menores niveles de congestión y actividad urbana.

2.6.1.1. Camiones C2L

Los vehículos tipo C2L representan el segmento con mayor participación dentro del sistema de transporte de carga analizado, consolidándose como el principal componente de las operaciones logísticas urbanas y regionales de corta distancia en Bogotá–Región. Su alta participación en todos los periodos estudiados evidencia el papel predominante que desempeñan este tipo de vehículos en actividades asociadas a distribución urbana, abastecimiento local, operaciones de última milla y movimientos de mercancías de baja y mediana capacidad.

Los resultados muestran que la mayor proporción de viajes de este segmento corresponde a viajes internos de Bogotá, los cuales representan entre el 53% y el 74% de los desplazamientos dependiendo del periodo analizado. Este comportamiento confirma el carácter principalmente urbano de la operación de los vehículos C2L y su fuerte relación con actividades de distribución dentro de la ciudad. De manera complementaria, los viajes relacionados con Bogotá mantienen una participación cercana al 30%, evidenciando también una interacción importante con municipios de la región y corredores de acceso metropolitanos.

En términos temporales, se observa que los mayores volúmenes de viaje se presentan durante los periodos de operación de carga en horas de la mañana y la tarde, especialmente en el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), lo cual refleja una fuerte actividad logística posterior a la hora pico tradicional de movilidad de pasajeros. Asimismo, durante el sábado se identifica una disminución de los viajes no relacionados con Bogotá, sugiriendo una reducción de operaciones regionales y una predominancia aún mayor de actividades de abastecimiento y distribución urbana.

Tabla 4 Viajes C2L – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	4.226	1.749	661	6.635
		%	63,69%	26,35%	9,96%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	6.273	2.644	1.066	9.983
		%	62,84%	26,49%	10,67%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	4.645	2.403	1.057	8.105
		%	57,31%	29,65%	13,04%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	1.874	1.253	384	3.511
		%	53,36%	35,69%	10,95%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Viajes C2L – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	3.295	1.569	158	5.022
		%	65,61%	31,25%	3,14%	100,00%
	HMD-AM/Carga	Viajes	4.616	1.524	92	6.233

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
	10:00–11:00	%	74,07%	24,46%	1,48%	100,00%
	HMD-PM/Carga	Viajes	3.350	1.306	127	4.783
	16:30–17:30	%	70,05%	27,30%	2,65%	100,00%
	HMD-Noche/Carga	Viajes	1.610	854	39	2.502
	20:00–21:00	%	64,34%	34,12%	1,55%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Viajes C2L – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	78.079	37.671	13.978	129.728
		%	60,19%	29,04%	10,77%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	60.970	26.613	2.150	89.732
		%	67,95%	29,66%	2,40%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.2. Camiones C2P

Los vehículos tipo C2P presentan una dinámica de operación con una participación importante tanto en viajes internos de Bogotá como en viajes relacionados con la región, evidenciando un comportamiento más equilibrado entre operaciones urbanas y metropolitanas en comparación con los vehículos C2L. Este segmento se asocia principalmente a actividades de distribución urbana de mayor capacidad, abastecimiento comercial y operaciones logísticas de conexión entre Bogotá y municipios cercanos.

Los resultados muestran que los viajes internos de Bogotá representan entre el 41% y el 61% de los desplazamientos dependiendo del periodo analizado, mientras que los viajes relacionados con Bogotá mantienen participaciones cercanas al 40% en la mayoría de los casos. Esta condición evidencia una fuerte interacción regional y una mayor dependencia de corredores de acceso y salida de la ciudad frente a otros segmentos de menor capacidad.

En términos temporales, se observa que los mayores volúmenes de viaje se concentran durante el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), tanto en día hábil como en sábado, reflejando una operación logística intensiva posterior a la hora pico tradicional de pasajeros. Asimismo, durante los periodos nocturnos se incrementa la participación relativa de viajes regionales y no relacionados con Bogotá, especialmente en día hábil, lo cual sugiere una mayor utilización de horarios de menor congestión para operaciones de abastecimiento y distribución de alcance metropolitano y regional.

A nivel diario, los resultados evidencian que el segmento C2P mantiene una participación relevante dentro del sistema de transporte de carga, con una importante proporción de viajes asociados a relaciones entre Bogotá y la región, consolidándose como un componente clave en las dinámicas logísticas metropolitanas y de abastecimiento urbano-regional.

Tabla 7 Viajes C2P – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	1.310	922	264	2.496
		%	52,47%	36,96%	10,57%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	2.639	1.520	526	4.685
		%	56,32%	32,45%	11,23%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	1.725	1.282	385	3.392
		%	50,86%	37,80%	11,35%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	503	518	202	1.222
		%	41,15%	42,36%	16,49%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Viajes C2P – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	1.276	1.023	33	2.332
		%	54,73%	43,88%	1,40%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	1.711	1.029	62	2.802
		%	61,07%	36,71%	2,22%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	711	602	167	1.480
		%	48,03%	40,66%	11,31%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	407	335	57	799
		%	50,90%	41,92%	7,17%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 Viajes C2P – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	25.505	22.361	7.899	55.765
		%	45,74%	40,10%	14,16%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	19.171	14.286	1.850	35.307
		%	54,30%	40,46%	5,24%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.3. Camiones C2G

Los vehículos tipo C2G presentan una dinámica operativa con una fuerte relación entre Bogotá y los municipios de la región, evidenciando un comportamiento predominantemente metropolitano y regional. A diferencia de los segmentos de menor capacidad, este tipo de vehículo muestra una menor participación de viajes exclusivamente internos de Bogotá y una mayor presencia de desplazamientos asociados a corredores de acceso y salida de la ciudad, lo cual refleja su papel dentro de operaciones logísticas de mayor escala y distribución regional.

Los resultados muestran que, durante el día hábil, los viajes relacionados con Bogotá representan cerca del 45% al 53% de los desplazamientos dependiendo del periodo analizado, consolidándose como el principal tipo de relación espacial para este segmento. Asimismo, los viajes no relacionados con Bogotá presentan participaciones cercanas al 18%, superiores a las observadas en segmentos más pequeños, lo que evidencia una participación importante de

operaciones regionales e intermunicipales que no necesariamente tienen origen o destino dentro de la ciudad.

En términos temporales, se identifica que los mayores volúmenes de viaje se concentran durante el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), mientras que en los periodos PM y nocturnos aumenta la participación relativa de viajes relacionados con Bogotá y regionales, reflejando una mayor utilización de horarios de menor congestión para operaciones de transporte de mercancías de mayor alcance.

Para el día sábado se observa una reducción importante de los viajes no relacionados con Bogotá durante los periodos de la mañana, aunque en los periodos PM y nocturnos vuelve a incrementarse la participación de viajes regionales. En general, los resultados permiten concluir que los vehículos C2G cumplen un papel estratégico en la articulación logística entre Bogotá y su región, concentrando una parte importante de los movimientos de carga asociados a corredores metropolitanos y regionales de abastecimiento.

Tabla 10 Viajes C2G – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	1.025	1.467	563	3.055
		%	33,54%	48,03%	18,43%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	2.009	2.354	935	5.298
		%	37,92%	44,42%	17,65%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	1.202	1.843	650	3.696
		%	32,53%	49,88%	17,60%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	695	1.210	362	2.267
		%	30,66%	53,38%	15,96%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Viajes C2G – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	1.470	1.066	105	2.641
		%	55,65%	40,37%	3,98%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	1.650	1.182	323	3.155
		%	52,30%	37,47%	10,23%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	548	963	243	1.753
		%	31,26%	54,90%	13,84%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	382	671	189	1.242
		%	30,71%	54,04%	15,25%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Viajes C2G – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	25.505	22.361	7.899	55.765
		%	45,74%	40,10%	14,16%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	19.171	14.286	1.850	35.307
		%	54,30%	40,46%	5,24%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.4. Camiones C3

Los vehículos tipo C3 presentan una operación fuertemente asociada a relaciones regionales y metropolitanas, evidenciando una menor participación de viajes exclusivamente internos de Bogotá en comparación con los segmentos de menor capacidad. Este comportamiento refleja el papel de este tipo de vehículos dentro de cadenas logísticas de abastecimiento y distribución de mayor escala, con una presencia importante en corredores de acceso y salida de la ciudad.

Durante el día hábil, los viajes relacionados con Bogotá representan la principal proporción de desplazamientos, alcanzando participaciones entre el 38% y el 51% dependiendo del periodo analizado. Asimismo, se observa una participación relevante de viajes no relacionados con Bogotá, particularmente durante el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), donde alcanzan cerca del 24% de los viajes, evidenciando una operación regional importante y una interacción significativa con municipios externos al área urbana.

En términos temporales, los mayores volúmenes de viaje se presentan durante el periodo HMD-AM/Carga, mientras que en los periodos nocturnos aumenta la participación relativa de viajes regionales y no relacionados con Bogotá, especialmente en sábado, lo que sugiere una tendencia de este segmento a operar en horarios de menor congestión y con recorridos de mayor longitud.

Tabla 13 Viajes C3 – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	257	195	55	507
		%	50,73%	38,41%	10,86%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	299	390	216	905
		%	33,04%	43,04%	23,91%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	183	248	59	489
		%	37,32%	50,60%	12,08%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	76	104	36	216
		%	35,15%	48,12%	16,73%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Viajes C3 – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	202	154	14	369
		%	54,61%	41,65%	3,74%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	174	230	42	445
		%	39,07%	51,58%	9,35%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	68	63	40	172
		%	39,71%	36,85%	23,44%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	22	41	23	87
		%	25,67%	47,49%	26,84%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15 Viajes C3 – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	3.913	5.207	2.321	11.440
		%	34,20%	45,51%	20,29%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	2.842	2.391	581	5.813
		%	48,89%	41,12%	9,99%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

2.6.1.5. Camiones C4 y superiores

Los vehículos tipo C4 y superiores (C4M) presentan el comportamiento más regional y de larga distancia dentro de los segmentos analizados, evidenciando una baja participación de viajes exclusivamente internos de Bogotá y una alta concentración de desplazamientos relacionados con la región y corredores externos. Este patrón es consistente con la naturaleza operativa de este tipo de vehículos, los cuales se asocian principalmente al transporte de mercancías de gran escala, operaciones interurbanas y conexiones con corredores nacionales de carga.

Durante el día hábil, los viajes relacionados con Bogotá representan cerca del 45% al 53% de los desplazamientos dependiendo del periodo analizado, mientras que los viajes no relacionados con Bogotá alcanzan participaciones cercanas al 45% en algunos periodos, particularmente durante la mañana. Esta condición evidencia una operación fuertemente asociada a movimientos regionales y nacionales que utilizan la infraestructura de Bogotá y su región como corredor de paso o conexión logística.

En términos temporales, los mayores volúmenes de viaje se presentan durante el periodo HMD-AM/Carga (10:00–11:00), mientras que en los periodos PM y nocturnos se mantiene una participación importante de viajes regionales y externos. Para el día sábado se observa una reducción de los viajes no relacionados con Bogotá frente al día hábil, aunque los viajes relacionados con la ciudad continúan representando más del 50% de los desplazamientos en la mayoría de los periodos.

A nivel diario, los resultados evidencian que los vehículos C4M presentan la menor proporción de viajes internos de Bogotá de todos los segmentos analizados, consolidándose como el componente más representativo de las operaciones de carga pesada regional y nacional dentro del sistema logístico Bogotá–Región.

Tabla 16 Viajes C4M – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	83	322	311	716
		%	11,53%	44,96%	43,51%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	192	568	620	1.380
		%	13,89%	41,15%	44,96%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	133	580	375	1.087
		%	12,19%	53,33%	34,48%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	103	386	277	766
		%	13,47%	50,34%	36,19%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Viajes C4M – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes	135	330	87	553
		%	24,46%	59,76%	15,78%	100,00%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes	198	497	163	858
		%	23,09%	57,97%	18,94%	100,00%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes	158	466	270	895
		%	17,65%	52,13%	30,22%	100,00%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes	93	162	93	348
		%	26,84%	46,37%	26,79%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Viajes C4M – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes Internos Bogotá	Viajes Relacionados con Bogotá	Viajes No Relacionados con Bogotá	Total
Diario	Día Hábil	Viajes	2.556	10.810	9.360	22.725
		%	11,25%	47,57%	41,19%	100,00%
	Día Sábado	Viajes	2.897	9.099	4.967	16.963
		%	17,08%	53,64%	29,28%	100,00%

Fuente: Elaboración propia

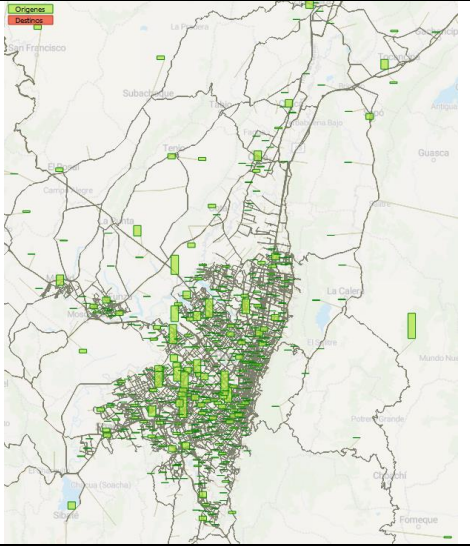
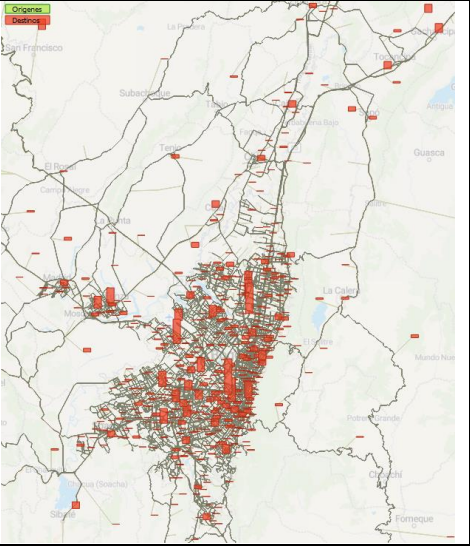
2.6.2. Segmentación por periodo de análisis

En este apartado se presentan las matrices O-D diferenciadas por periodo de análisis, con el objetivo de identificar las variaciones temporales en los patrones de movilidad de carga. Este enfoque permite analizar cómo se distribuyen los flujos a lo largo del día y entre distintos tipos de día, evidenciando las dinámicas asociadas a procesos logísticos como distribución urbana, abastecimiento y operaciones nocturnas.

Para cada periodo se presentan matrices de acuerdo a su temporalidad, junto con mapas temáticos de generación y atracción de viajes y métricas agregadas que permiten comparar la intensidad y localización de la demanda en distintos momentos del día.

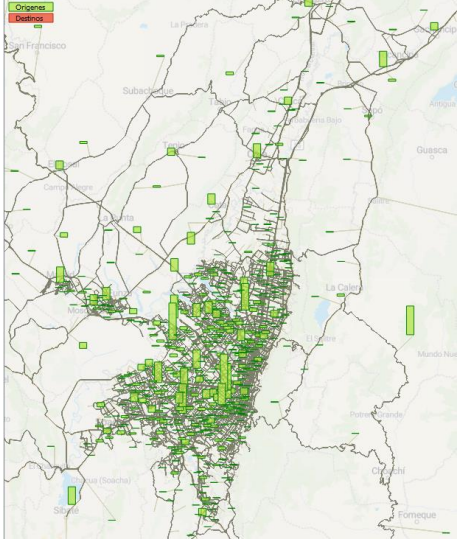
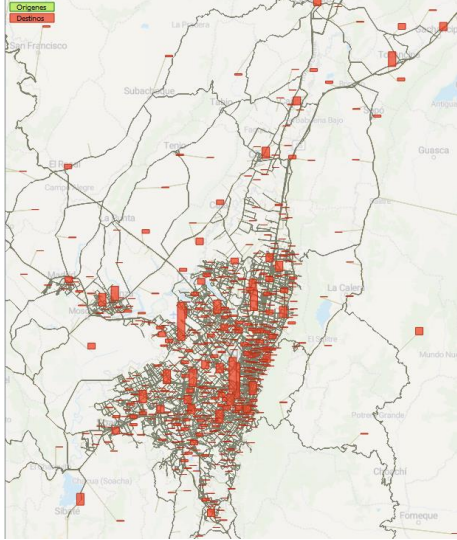
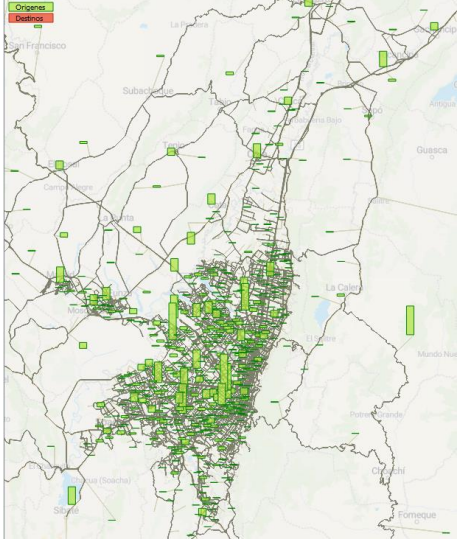
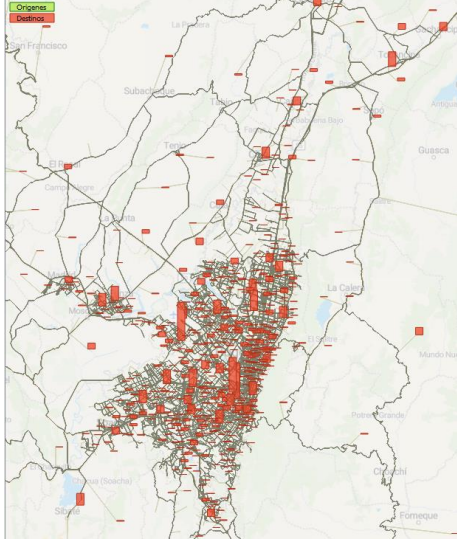
2.6.2.1. Matrices horarias día hábil

Tabla 19 Viajes periodo horario HMD-AM/Sistema 6:15–7:15, Día Hábil típico

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	6.900 Viajes		
	51,46%		
Viajes Relacionados con Bogotá	4.655 Viajes		
	34,72%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	1.854 Viajes		
	13,83%		
Total de Viajes	13.410 Viajes		
	100,00%		

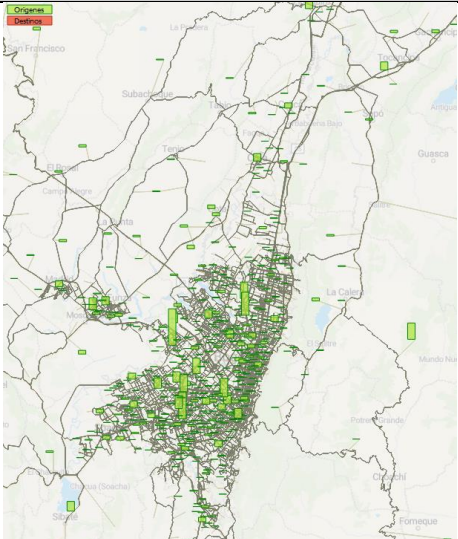
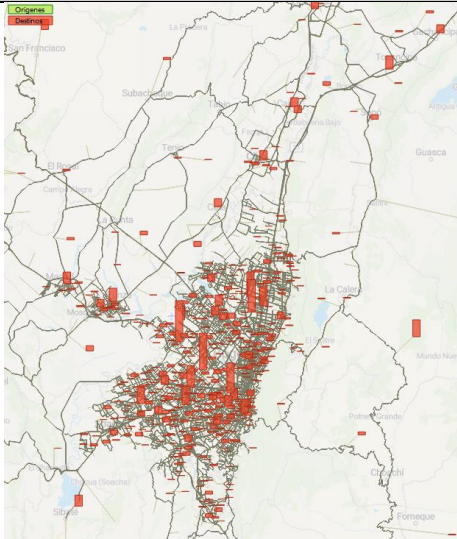
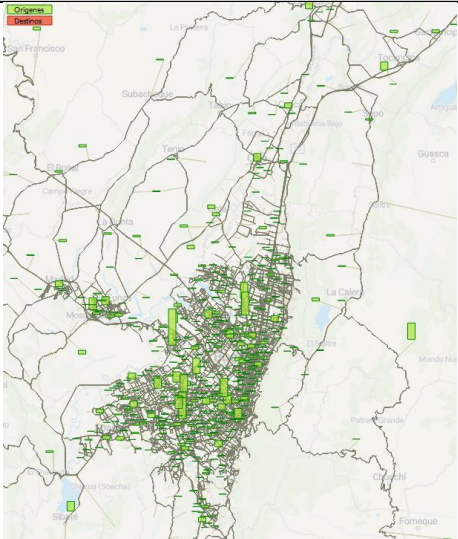
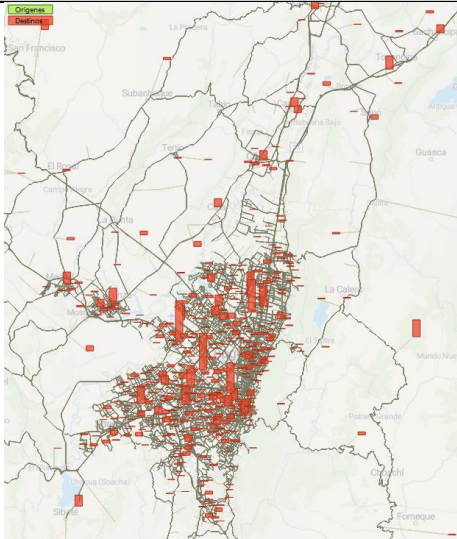
Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Viajes periodo horario HMD-AM/Carga 10:00–11:00, Día Hábil típico

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	11.412 Viajes	Generación de Viajes	Atracción de Viajes
	51,29%		
Viajes Relacionados con Bogotá	7.476 Viajes		
	33,60%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	3.364 Viajes		
	15,12%		
Total de Viajes	22.252 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21 Viajes periodo horario HMD-PM/Carga 16:30–17:30, Día Hábil típico

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	7.887 Viajes	Generación de Viajes	Atracción de Viajes
	47,03%		
Viajes Relacionados con Bogotá	6.356 Viajes		
	37,90%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	2.526 Viajes		
	15,07%		
Total de Viajes	16.769 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22 Viajes periodo horario HMD-Noche/Carga 20:00–21:00, Día Hábil típico

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	3.251 Viajes	Generación de Viajes	Atracción de Viajes
	40,72%		
Viajes Relacionados con Bogotá	3.471 Viajes		
	43,48%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	1.261 Viajes		
	15,80%		
Total de Viajes	7.982 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

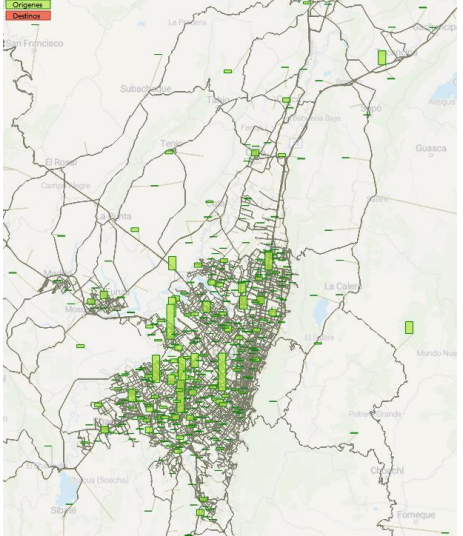
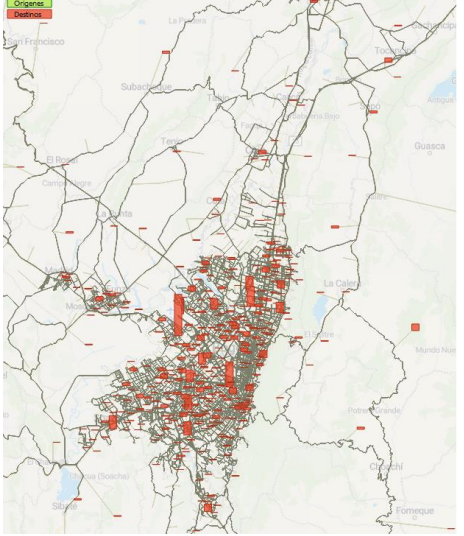
2.6.2.2. Matrices horarias día sábado

Tabla 23 Viajes periodo horario HMD-AM/Sistema 6:15–7:15, Día Sábado

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	6.378 Viajes	Generación de Viajes	Atracción de Viajes
	58,42%		
Viajes Relacionados con Bogotá	4.143 Viajes		
	37,95%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	397 Viajes		
	3,63%		
Total de Viajes	10.917 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

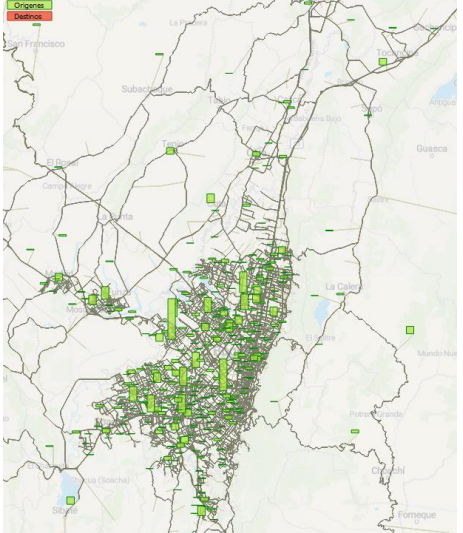
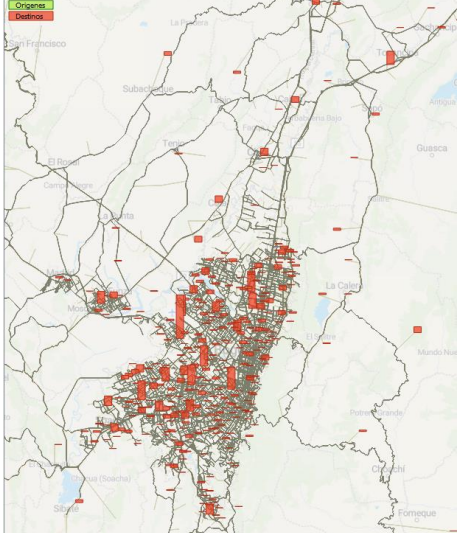
Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Viajes periodo horario HMD-AM/Carga 10:00–11:00, Día Sábado

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	8.350 Viajes	Generación de Viajes 	Atracción de Viajes 
	61,88%		
Viajes Relacionados con Bogotá	4.462 Viajes		
	33,07%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	681 Viajes		
	5,05%		
Total de Viajes	13.493 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

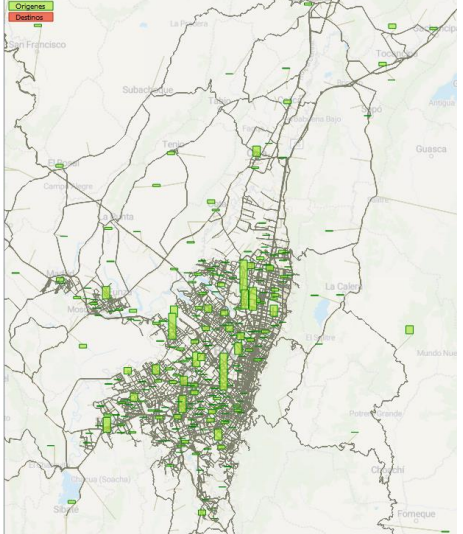
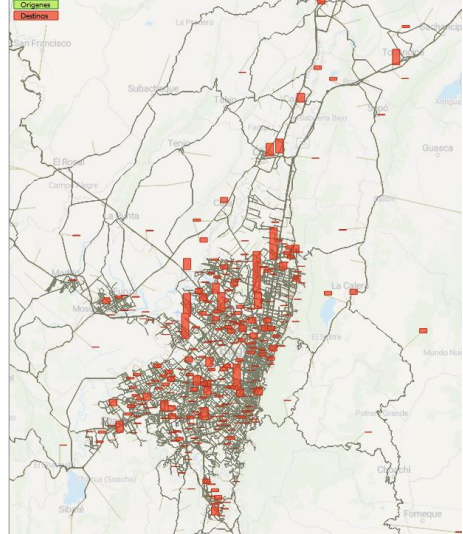
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Viajes periodo horario HMD-PM/Carga 16:30–17:30, Día Sábado

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	4.836 Viajes	Generación de Viajes 	Atracción de Viajes 
	53,24%		
Viajes Relacionados con Bogotá	3.400 Viajes		
	37,43%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	847 Viajes		
	9,33%		
Total de Viajes	9.083 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

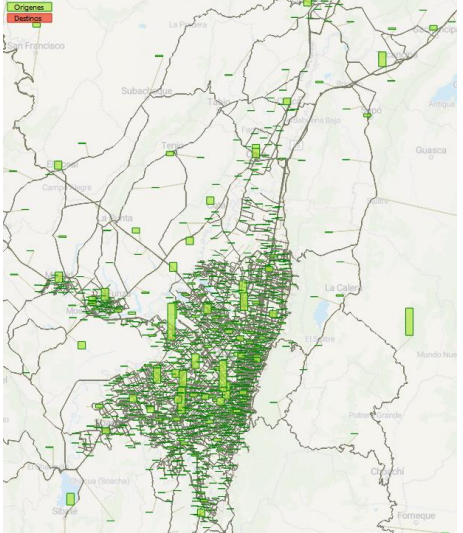
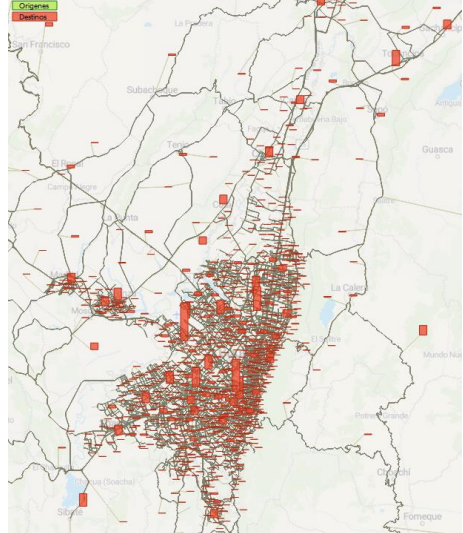
Tabla 26 Viajes periodo horario HMD-Noche/Carga 20:00–21:00, Día Sábado

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	2.514 Viajes		
	50,49%		
Viajes Relacionados con Bogotá	2.063 Viajes		
	41,43%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	402 Viajes		
	8,08%		
Total de Viajes	4.979 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

2.6.2.3. Matrices diarias día hábil

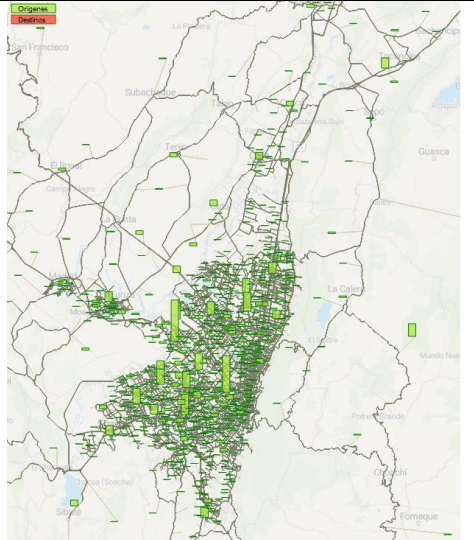
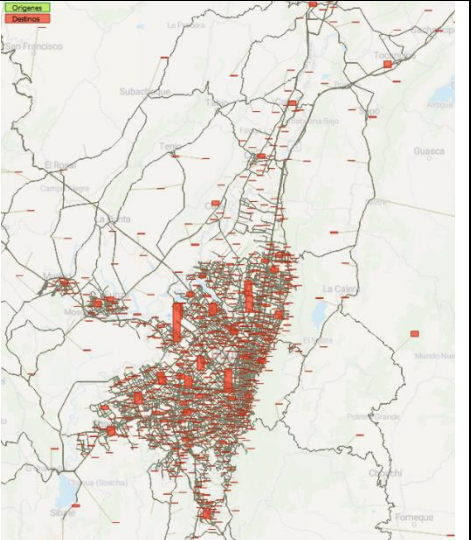
Tabla 27 Matrices diarias - Día Hábil

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	130.359 Viajes		
	45,07%		
Viajes Relacionados con Bogotá	110.892 Viajes		
	38,34%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	48.011 Viajes		
	16,60%		
Total de Viajes	289.262 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

2.6.2.4. Matrices diarias día sábado

Tabla 28 Matrices diarias - Día Sábado

Variable	Valor	Figura	
Viajes Internos Bogotá	102.453 Viajes		
	53,50%		
Viajes Relacionados con Bogotá	75.255 Viajes		
	39,30%		
Viajes No Relacionados con Bogotá	13.793 Viajes		
	7,20%		
Total de Viajes	191.501 Viajes		
	100,00%		
	100,00%		

Fuente: Elaboración propia

2.7. Estimación de las longitudes de viaje

La caracterización del transporte de carga desarrollada en el presente estudio se fundamenta principalmente en la información recolectada mediante Encuestas Origen–Destino de Interceptación (EODI), las cuales permiten describir de manera detallada aspectos relacionados con la movilidad de los vehículos de carga, las características de los viajes, el tipo de mercancía transportada y las condiciones operativas de los actores involucrados.

En este sentido, las encuestas constituyen una fuente robusta para la comprensión de los patrones de movilidad de carga, en la medida en que permiten identificar variables clave como el origen y destino de los viajes, la tipología vehicular, los horarios de operación, así como características asociadas al generador y receptor de la carga. No obstante, a pesar de la riqueza de esta información, existe una variable fundamental para la comprensión integral del sistema que no es capturada de manera directa a partir de este instrumento: la longitud efectiva de los viajes realizados en la red.

La estimación de la longitud de viaje resulta particularmente relevante en el análisis del transporte de carga, dado que permite aproximar aspectos como el alcance espacial de las operaciones logísticas, la interacción entre ámbitos urbano y regional, los niveles de exposición a la red vial y, de manera indirecta, variables asociadas a costos de operación, velocidades de recorrido y eficiencia del sistema.

Dado que las EODI no proporcionan información directa confiable sobre las trayectorias seguidas por los vehículos ni sobre las distancias efectivamente recorridas, se definió una metodología

orientada a la estimación de la longitud de los viajes a partir del uso del modelo de transporte Bogotá–Región.

Para ello, se empleó el modelo de asignación de la red de transporte, mediante el cual se realizó la simulación de los viajes correspondientes a la totalidad de los pares origen–destino registrados en las encuestas, diferenciados por periodo de análisis y tipología vehicular. Este proceso consistió en la asignación de matrices O-D unitarias, construidas a partir de los registros observados en las EODI, sobre la red vial del modelo, considerando las condiciones operativas de la infraestructura y los parámetros de impedancia definidos para el transporte de carga.

A partir de esta simulación, fue posible identificar, para cada par origen–destino, la trayectoria más probable utilizada en la red, así como los enlaces (links) que componen dicho recorrido. Con base en esta información, se procedió al cálculo de la longitud de viaje asociada a cada par O-D, mediante la sumatoria de las longitudes de los enlaces que conforman la ruta asignada.

Este procedimiento permitió construir una base de datos enriquecida, en la cual cada par origen–destino cuenta no solo con su estimación de viajes, sino también con una medida de la distancia recorrida en la red, lo cual constituye un insumo fundamental para el análisis posterior de la demanda de transporte de carga.

Es importante señalar que la estimación de las longitudes de viaje se fundamenta en la representación de la red vial y en los supuestos de asignación del modelo de transporte, por lo que los resultados obtenidos corresponden a una aproximación consistente con las condiciones modeladas del sistema. En este sentido, si bien las longitudes estimadas no representan necesariamente la trayectoria exacta seguida por cada vehículo en la realidad, sí constituyen una representación técnicamente robusta y homogénea para el análisis agregado de los patrones de movilidad de carga.

La incorporación de la variable de longitud de viaje permite complementar la caracterización del sistema, facilitando el desarrollo de análisis adicionales relacionados con la distribución espacial de los viajes, la diferenciación entre viajes de corta, media y larga distancia, y la evaluación de indicadores agregados de desempeño del transporte de carga en el área de estudio.

Tabla 29 Longitud promedio por tipo de vehículo

Vehículo	Longitud promedio (km)
C2L	27,66
C2P	35,36
C2G	46,89
C3	40,11
C4M	76,87
Total	41,44

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en las longitudes promedio de viaje entre las distintas tipologías vehiculares, reflejando comportamientos operativos diferenciados y escalas espaciales distintas dentro del sistema logístico Bogotá–Región.

Tabla 30 Longitud promedio ponderada por demanda por tipo de vehículo

Vehículo	i)	ii)	iii)	iv)	v)	vi)	vii)	viii)	ix)	x)	Promedio
C2L	24,34	22,38	21,96	23,49	21,10	23,13	23,09	23,22	21,73	28,16	23,26
C2P	33,79	31,76	28,73	31,16	26,50	27,61	38,41	33,38	38,84	42,76	33,29
C2G	45,83	43,43	25,53	38,29	35,54	39,26	47,17	47,79	50,16	60,62	43,36
C3	38,60	38,25	24,51	28,45	34,50	38,95	52,75	38,73	70,20	47,75	41,27
C4M	83,52	77,85	61,29	69,69	68,03	80,89	65,79	81,24	79,81	92,21	76,03
Total	36,55	34,30	26,35	30,94	29,03	32,14	35,00	34,90	36,48	46,29	34,20

- i) Total, de viajes día hábil
- ii) Total, de viajes sábado
- iii) HMD-AM/Sistema sábado: 6:15-7:15
- iv) HMD-AM/Sistema día hábil: 6:15-7:15
- v) HMD-AM/Carga sábado de carga: 10:00-11:00
- vi) HMD-AM/Carga día hábil de carga: 10:00-11:00
- vii) HMD-PM/Carga sábado de carga: 16:30-17:30
- viii) HMD-PM/Carga día hábil de carga: 16:30-17:30
- ix) HMD-Noche/Carga sábado de carga: 20:00 - 21:00
- x) HMD-Noche/Carga día hábil de carga: 20:00 - 21:00

Fuente: Elaboración propia

De manera general, se observa una relación creciente entre la capacidad del vehículo y la longitud promedio de viaje realizada. Los vehículos de menor capacidad, como los C2L, presentan las menores distancias promedio recorridas, con valores cercanos a los 23 km ponderados por demanda, mientras que los vehículos articulados y de mayor capacidad (C4M) alcanzan longitudes promedio superiores a los 76 km. Este comportamiento es consistente con la naturaleza operativa de cada segmento, donde los vehículos pequeños tienden a desarrollar operaciones urbanas y de distribución local, mientras que los vehículos de mayor capacidad se asocian principalmente a operaciones regionales, de abastecimiento y transporte de larga distancia.

En particular, los vehículos tipo C2L presentan una longitud promedio ponderada relativamente estable entre periodos, con valores comprendidos entre 21 y 28 km, lo cual sugiere una operación predominantemente urbana y periurbana. Este tipo de vehículo se encuentra asociado principalmente a actividades de distribución de última milla, abastecimiento local y operaciones de menor escala dentro del área urbana.

Por su parte, los segmentos C2P y C2G presentan longitudes promedio intermedias, con valores promedio ponderados de 33 km y 43 km respectivamente. Estos segmentos muestran una mayor variabilidad temporal, especialmente en los periodos PM y nocturnos, lo cual evidencia una participación más importante en corredores regionales y operaciones logísticas de abastecimiento metropolitano. En el caso de los C2G, se identifican distancias promedio superiores a 60 km en algunos periodos nocturnos, reflejando una mayor presencia de viajes regionales y de acceso a la ciudad en horarios de menor congestión.

Los vehículos tipo C3 presentan un comportamiento particularmente variable entre períodos. Aunque el promedio general ponderado se sitúa alrededor de 41 km, en algunos períodos específicos, especialmente durante la noche del sábado, se alcanzan valores superiores a 70 km. Esto evidencia que una parte importante de las operaciones de este segmento corresponde a viajes de carácter regional o interurbano, probablemente asociados a cadenas logísticas de abastecimiento y distribución de mercancías de mayor escala.

Finalmente, los vehículos tipo C4M presentan las mayores longitudes promedio del sistema, con un promedio ponderado cercano a 76 km y máximos superiores a 90 km en periodos nocturnos. Estos resultados reflejan claramente el carácter regional y de larga distancia de este tipo de operación, donde predominan recorridos asociados a corredores nacionales, plataformas logísticas, zonas industriales y movimientos de ingreso o salida de mercancías de la ciudad.

A nivel agregado, el sistema presenta una longitud promedio ponderada cercana a los 34 km, valor que evidencia la coexistencia de dinámicas urbanas y regionales dentro del transporte de carga de Bogotá–Región. Asimismo, se observa que las mayores longitudes promedio tienden a concentrarse en periodos nocturnos y de menor congestión, lo cual sugiere una preferencia operacional de los vehículos pesados por horarios con mejores condiciones de circulación y menores restricciones operativas.

En términos generales, los resultados permiten concluir que existe una diferenciación clara entre las tipologías vehiculares desde el punto de vista espacial y operativo, donde los vehículos livianos se concentran en dinámicas urbanas de corta distancia, mientras que los vehículos pesados presentan patrones de viaje asociados a operaciones regionales y de larga distancia. Esta diferenciación constituye un insumo fundamental para el entendimiento de las dinámicas logísticas de la ciudad y para el desarrollo de futuros análisis asociados a infraestructura, operación y gestión del transporte de carga.

3. CALIBRACIÓN DE MATRICES EN EL MODELO DE TRANSPORTE

En este capítulo se presenta el proceso de calibración de las matrices origen–destino (O-D) de carga en el modelo de transporte Bogotá–Región 2023, con el objetivo de verificar la consistencia entre los flujos estimados a partir de la metodología desarrollada y los volúmenes observados en la red vial.

La calibración constituye una etapa fundamental para validar la representatividad de las matrices construidas, permitiendo evaluar su capacidad para reproducir los patrones reales de circulación de los vehículos de carga. En este sentido, el proceso se enfoca en contrastar los resultados del modelo con información observada en campo, principalmente aforos vehiculares clasificados, y ajustar los insumos cuando sea necesario para mejorar la coherencia entre ambas fuentes.

Dado que la metodología de estimación de matrices incorpora un proceso previo de reconciliación con aforos, la calibración en el modelo no representó un ejercicio de ajuste estructural intensivo, sino como una validación de consistencia en red, que permite verificar la adecuada representación espacial de los flujos y su distribución sobre la infraestructura de transporte.

Este proceso que consideró ajustes de la estructura del modelo de carga permitió ajustar tanto la representación de la oferta como de la demanda, integrando dinámicas locales y especificidades del área de estudio. El objetivo final fue garantizar que las condiciones actuales del transporte de carga sean representadas con precisión en el modelo, asegurando su capacidad predictiva para analizar la movilidad y evaluar alternativas. En este punto es importante recordar que la calibración se realizó para las categorías de camiones pequeños (C2) y camiones grandes (C3M) tanto para el periodo pico am (6:15-7:15) como para el periodo pico pm (17:00 – 18:00).

3.1. Modelo de transporte de referencia

El modelo de transporte de referencia para el desarrollo del proyecto corresponde al Modelo de 4 Etapas de Bogotá – Región, calibrado para las condiciones de la hora pico de la mañana (HPAM) y de la tarde (HPPM), utilizando como base la Encuesta de Movilidad de 2023. Este modelo es el resultado acumulativo de más de 20 años de desarrollo técnico continuo, en los que diversas entidades del Distrito, como la SDM, el IDU, TransMilenio, la Empresa Metro de Bogotá, la SDP y otras, han aportado significativamente a la mejora y evolución de esta herramienta de modelación. Su robustez técnica ha sido clave para la planificación y estructuración de proyectos de transporte e infraestructura en Bogotá y la región.

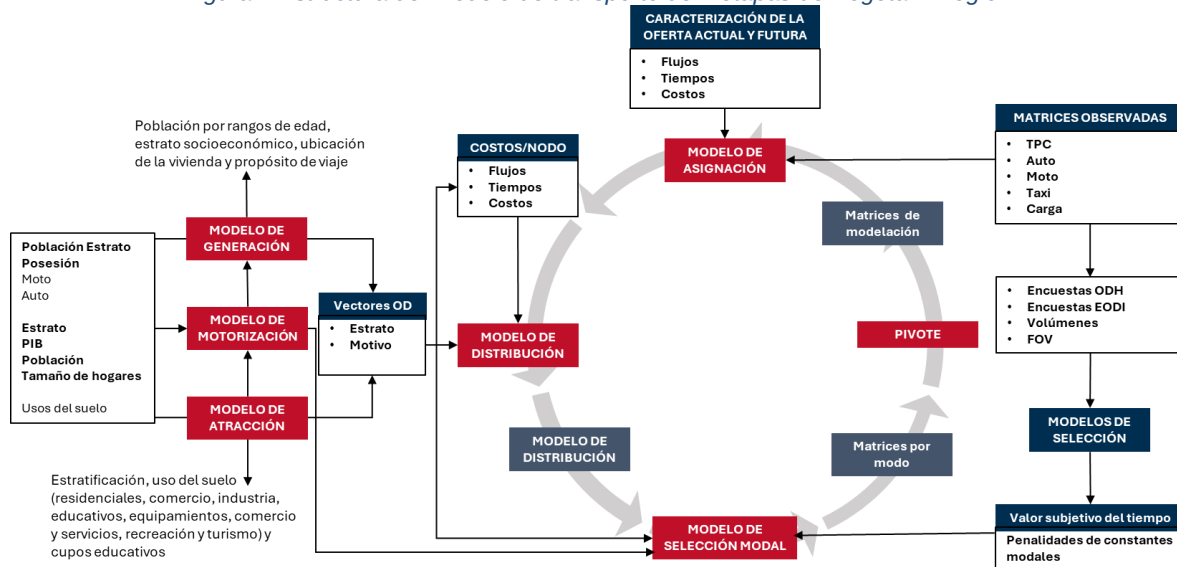
El modelo ha sido actualizado de manera constante con información reciente proveniente de proyectos estratégicos y estructuraciones clave. Entre estas actualizaciones, destacan la EODH de 2019 y 2023, que sirvieron como insumo para mejorar las proyecciones y parámetros del modelo. El modelo fue retroalimentado con datos derivados de proyectos como la Troncal de la Av 68, la implementación de dos tramos de la Avenida Longitudinal de Occidente (ALO), el corredor verde de la carrera Séptima y el Proyecto RegioTram de Occidente.

La estructura del modelo incluye variables explicativas tanto de la oferta como de la demanda. Por el lado de la oferta, se contemplan las características detalladas de las condiciones físicas y operativas de la red de transporte, así como la configuración de las rutas. En cuanto a la demanda, el modelo integra aspectos relacionados con el uso del suelo, la densidad poblacional, la tenencia vehicular y las proyecciones de crecimiento demográfico, asegurando su coherencia con los instrumentos de planeación del territorio, como el Plan de Movilidad Bogotá-Región, los planes de expansión de TransMilenio, el CONPES 4034 y los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) vigentes.

El objetivo de este capítulo es contextualizar y presentar una visión general del modelo de referencia, destacando su aplicabilidad al análisis técnico del sistema de transporte de carga. La estructura de este modelo, como se presenta en la Figura 1, sigue los principios de los modelos clásicos de cuatro etapas, que comprenden:

- Generación y atracción de viajes, basada en proyecciones demográficas y del uso del suelo.
- Distribución de los viajes, que evalúa las relaciones entre zonas de análisis de tránsito (ZAT).
- Selección y uso de los modos de transporte, considerando las características y preferencias de los usuarios.
- Asignación de los viajes a la red, tomando en cuenta los costos y tiempos percibidos por los usuarios.

Figura 7 Estructura del modelo de transporte de 4 etapas de Bogotá – Región

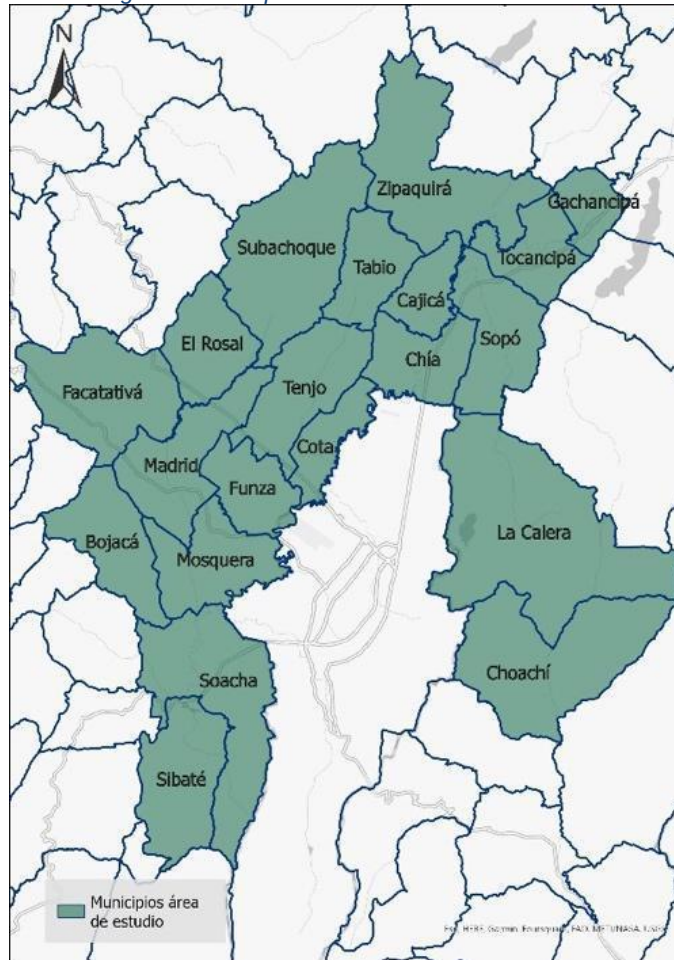


Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

En cuanto al área de influencia del modelo y nivel de representatividad, se definió un modelo que representa la oferta y los patrones de movilidad de los usuarios del sistema de transporte urbano-regional, basado en la Encuesta de Movilidad 2023.

De esta manera, se cuenta con un modelo de transporte que incorpora insumos suficientes para definir como área de influencia y representatividad a la Ciudad de Bogotá y los veinte (20) municipios vecinos considerados dentro de la Ciudad-Región. Estos municipios son: Bojacá, Cajicá, Chía, Choachí, Cota, El Rosal, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Subachoque, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá. Es importante mencionar que, aunque se incluye esta región ampliada, el modelo no cuenta con un nivel de representatividad detallado al interior de cada municipio, enfocándose principalmente en las dinámicas de movilidad entre estos y la ciudad capital.

Figura 8 Municipios vecinos al área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

En cuanto al periodo de modelación, el modelo de transporte representa los viajes para la Hora de Máxima Demanda de la Mañana (HPAM) definida entre las 6:15 – 7:15 a.m. Esta HPAM corresponde al pico en términos de viajes de Transporte Público para la ciudad de Bogotá, que a su vez coincide con la HMD de viajes motorizados y para el periodo HPPM esta definido entre las 17:00 – 18:00 pm.

En el marco del presente proyecto, enfocado en la incorporación de matrices de transporte de carga dentro del modelo de 4 etapas, el modelo de referencia constituye la base estructural sobre la cual se integrarán los nuevos componentes de demanda asociados a la logística urbana y regional.

Si bien el modelo ha sido desarrollado históricamente con un énfasis en la movilidad de pasajeros, su nivel de detalle en la representación de la red vial, así como la consistencia en la modelación de la demanda motorizada, permiten su adaptación para la inclusión de flujos de carga. En este sentido, la integración de la carga no implica la reconstrucción del modelo, sino la extensión de su estructura existente, incorporando nuevos segmentos de vehículos y matrices específicas que representen adecuadamente los patrones de transporte de mercancías.

Es importante destacar que la inclusión de la carga dentro del modelo introduce retos metodológicos particulares, asociados principalmente a la representación de vehículos pesados y livianos de carga, la diferenciación de sus patrones de viaje frente a los vehículos particulares, y la adecuada incorporación de estos flujos en un modelo originalmente calibrado con base en encuestas de movilidad de personas. En este contexto, el modelo de referencia proporciona un marco robusto para evaluar la interacción entre la demanda de pasajeros y de carga, especialmente en términos de competencia por capacidad vial, velocidades operativas y tiempos de viaje.

Adicionalmente, la incorporación de matrices de carga permite fortalecer el alcance del modelo en la evaluación de fenómenos asociados a la logística urbana, tales como la distribución de mercancías, los accesos a nodos logísticos estratégicos, y la operación de vehículos de carga en distintos periodos del día. Esto resulta particularmente relevante en un entorno como Bogotá-Región, donde la interacción entre la movilidad de personas y la de mercancías tiene impactos significativos sobre la eficiencia del sistema de transporte.

En este sentido, el modelo de referencia no solo sirve como una herramienta de simulación de la movilidad de pasajeros, sino que se consolida como una plataforma integral para el análisis multimodal, permitiendo evaluar de manera conjunta los efectos de políticas, proyectos e intervenciones sobre la movilidad urbana y regional, incluyendo el componente de carga.

3.1.1. Modelo de Oferta

El modelo de oferta está compuesto principalmente por la red vial y la red de rutas de transporte público, elementos esenciales que permiten evaluar las interacciones entre la oferta y la demanda en el sistema Bogotá – Región. Este modelo constituye una herramienta clave para analizar las dinámicas de movilidad en condiciones actuales y proyectadas, considerando tanto los atributos físicos como operativos de la red.

En el marco del presente estudio, el modelo de oferta adquiere una relevancia adicional al constituirse como el soporte para la integración y asignación de los flujos de transporte de carga, los cuales hacen uso predominante de la infraestructura vial. En este sentido, la red vial no solo representa las condiciones de circulación para los vehículos particulares y el transporte público, sino que también permite modelar el comportamiento de los distintos tipos de vehículos de carga, considerando sus características operativas diferenciales, tales como velocidades, restricciones de circulación, costos de operación y niveles de servicio.

La incorporación del componente de carga implica, por tanto, una lectura ampliada del modelo de oferta, en la que se analizan aspectos como la capacidad de la infraestructura frente a vehículos pesados, la interacción con otros modos de transporte, y la identificación de corredores logísticos estratégicos dentro de la red. Esto permite evaluar de manera más integral el desempeño del sistema, particularmente en términos de congestión, tiempos de viaje y eficiencia operativa.

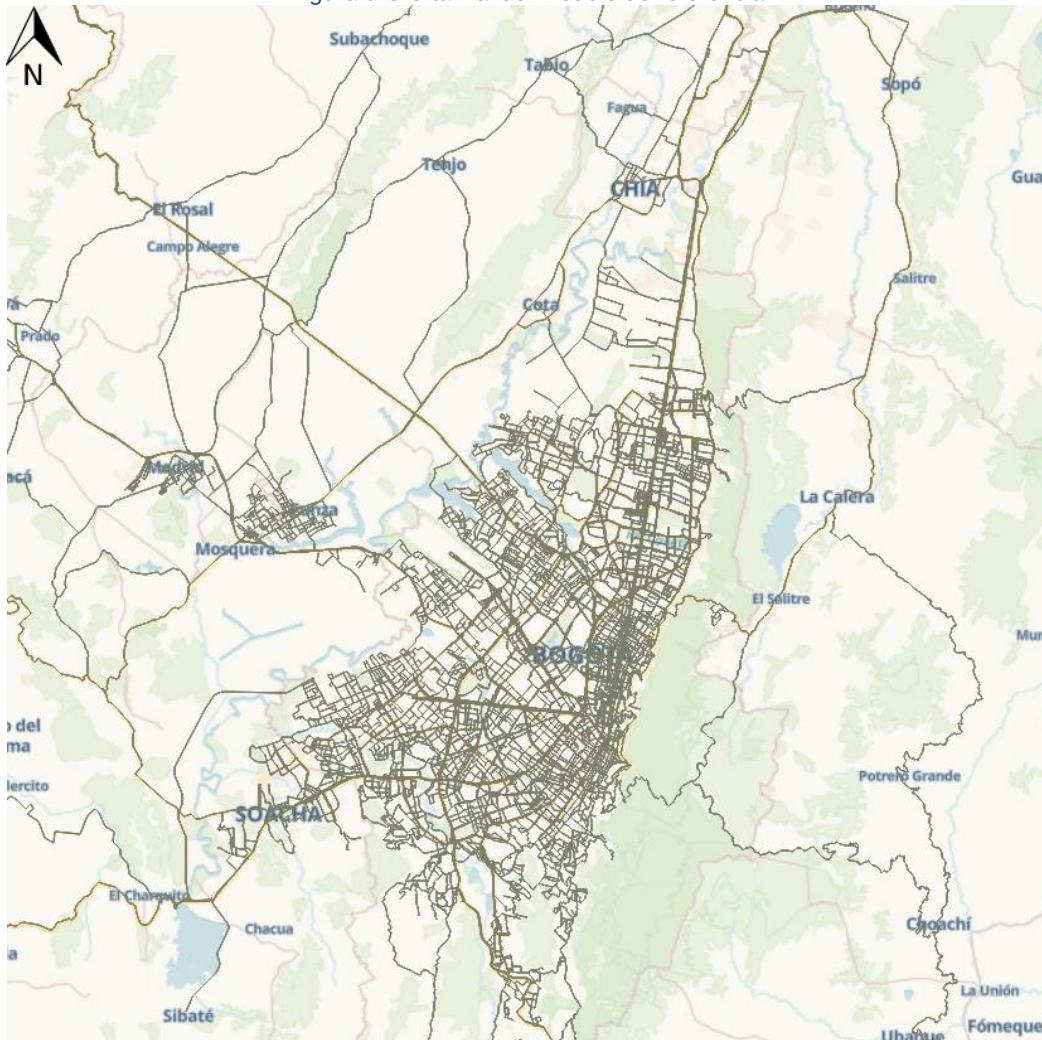
De esta manera, el modelo de oferta no solo permite representar la infraestructura disponible, sino que se consolida como una base fundamental para la simulación conjunta de la movilidad de pasajeros y carga, facilitando el análisis de escenarios y la evaluación de políticas orientadas a mejorar la eficiencia del sistema de transporte en la ciudad y su región.

3.1.1.1. Red vial

La red vial del modelo de referencia se construyó integrando y actualizando diversos datos para representar con precisión las condiciones del sistema Bogotá-Región. Este modelo incluye 52.021 links, 15.721 nodos, 136.013 giros, 1.215 zonas y 12.356 conectores. La formulación de la red vial se fundamentó en datos provenientes de fuentes primarias y secundarias, tales como la red base de 2019, Open Street Maps, y plataformas de datos abiertos. Adicionalmente, se incorporaron especificaciones proporcionadas por entidades locales como TransMilenio, que aportaron información clave sobre las redes del SITP y los corredores críticos.

La red vial fue jerarquizada y clasificada en función de su funcionalidad y características técnicas, considerando aspectos como capacidad, número de carriles, velocidades operativas y restricciones específicas, como semáforos y vías obstruidas. Este nivel de detalle asegura que el modelo represente de forma coherente las condiciones de accesibilidad y congestión observadas en la región. La siguiente figura muestra la red de oferta vial para el modelo de transporte en EMME.

Figura 9 Oferta vial del modelo de referencia



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.1.2. Red de rutas

El modelo de transporte público utilizado en el sistema Bogotá-Región incluye una red de rutas que representa tanto los servicios existentes como los proyectados. En el caso de la oferta actual, se consideran servicios como las rutas troncales de TransMilenio, los buses alimentadores y zonales del SITP, el transporte público colectivo intermunicipal (TPC Sabana), buses intermunicipales y el sistema de cable aéreo operado por TransMilenio.

La oferta de transporte público fue construida considerando información secundaria proporcionada por TMSA, basada en datos correspondientes a una semana hábil de marzo de 2023, que incluyó detalles sobre rutas, frecuencias, red vial y tarifas de operación en el periodo mencionado. Este año se establece como referencia para los elementos de la red vial, los carriles preferenciales de transporte público y las rutas de transporte colectivo. En total, la red final está compuesta por 1.042 rutas, distribuidas de la siguiente manera:

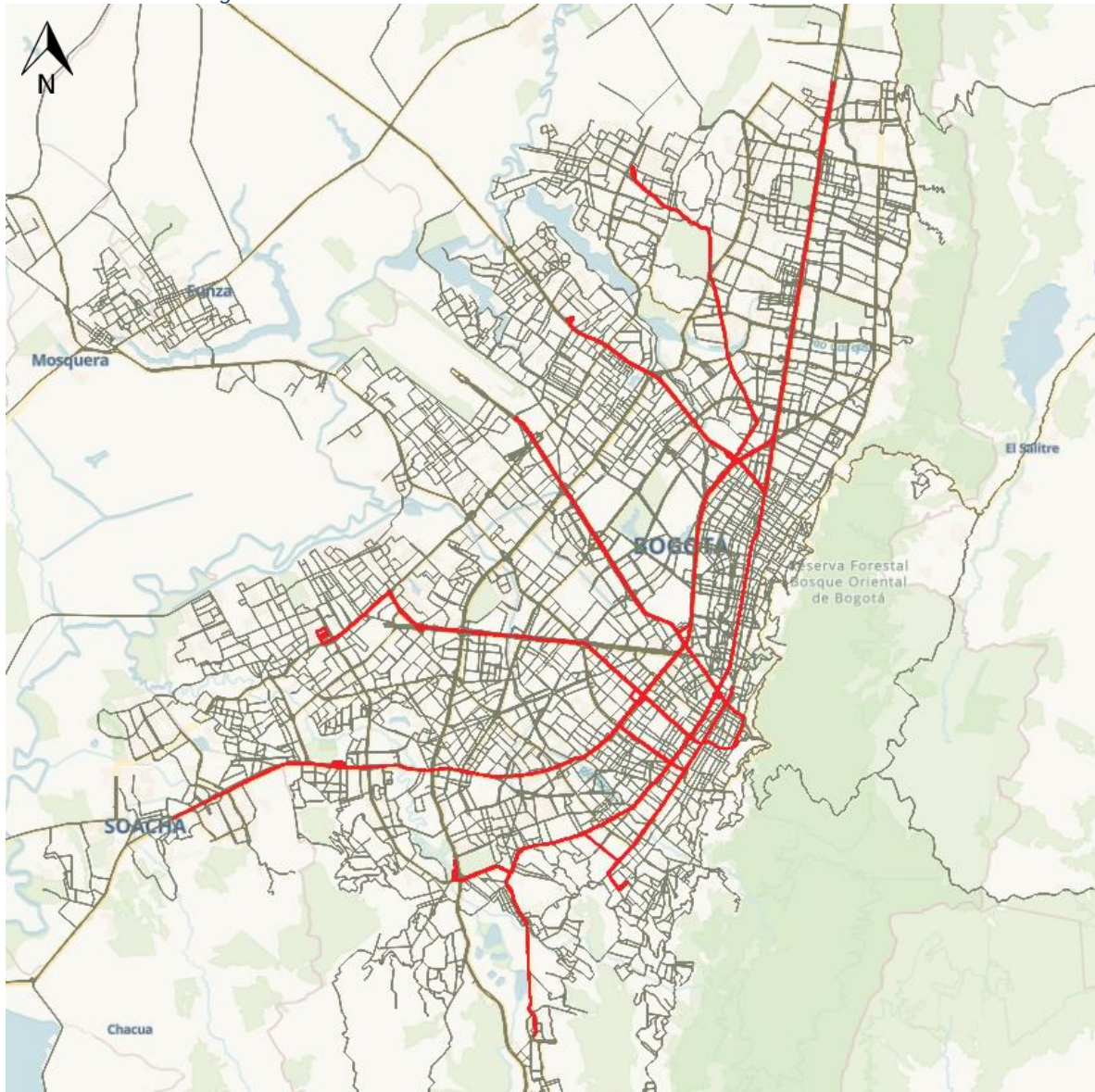
Tabla 31 Número de rutas ofertadas de transporte público

Tipo de Transporte Público	Número de rutas
Troncal Transmilenio	97
Buses Alimentadores	107
SITP componente Zonal	705
Buses Intermunicipales	124
Cable	1
Total	1.034

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

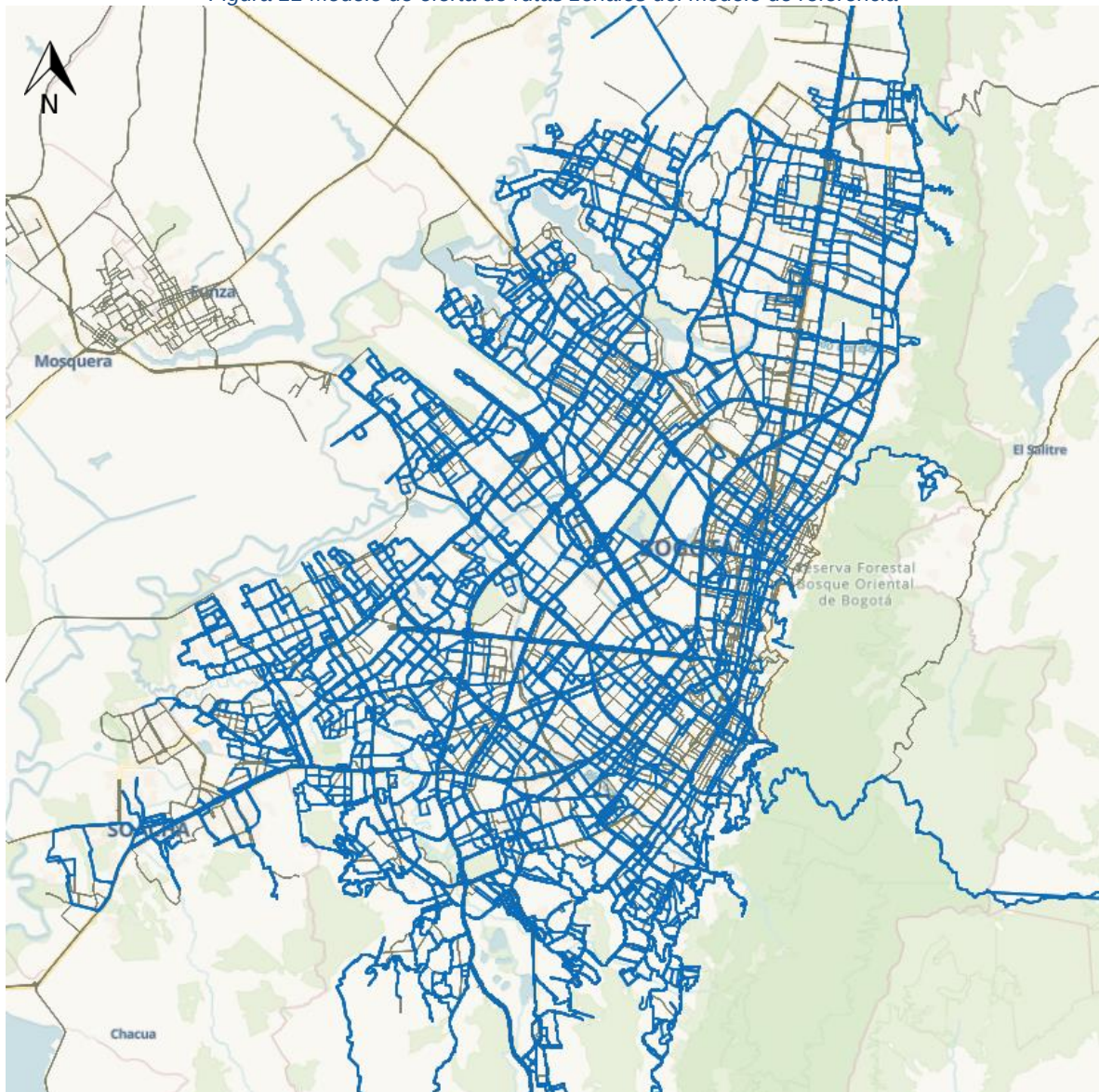
El diseño de esta red permite analizar las interacciones entre la oferta y la demanda de transporte público de manera coherente, considerando elementos operativos clave como trazados, frecuencias, paradas y condiciones tarifarias. Además, las rutas futuras como el Metro de Bogotá y el RegioTram también se encuentran integradas en el modelo, ampliando las proyecciones de oferta para escenarios futuros.

Figura 10 Modelo de oferta de rutas troncales del modelo de referencia



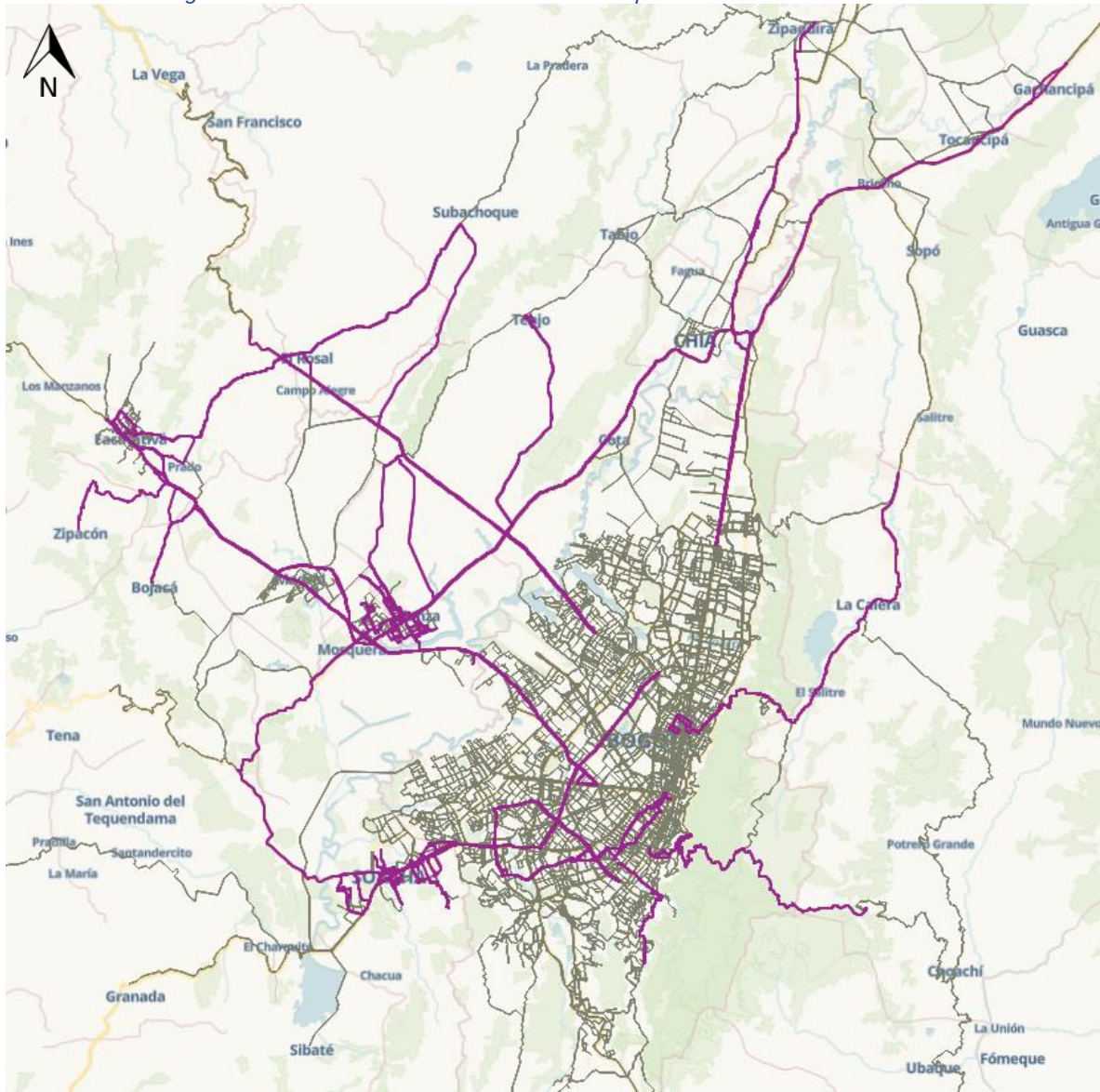
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 11 Modelo de oferta de rutas zonales del modelo de referencia



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 12 Modelo de oferta de rutas intermunicipales del modelo de referencia



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.2. Modelo de Demanda

El modelo de demanda utilizado se basa en la estructura del modelo de 4 etapas de Bogotá-Región, diseñado para representar patrones de movilidad mediante una segmentación detallada y calibración ajustada. Este modelo integra datos socioeconómicos, patrones de viaje y segmentaciones específicas que reflejan la diversidad de modos de transporte y su interacción con las características geográficas y operativas de la región.

En el contexto del presente estudio, el modelo de demanda se amplía mediante la incorporación explícita de la demanda de transporte de carga, la cual se construye a partir de la información recolectada en campo a través de encuestas origen-destino y aforos vehiculares. Esta inclusión permite representar los patrones de movimiento de mercancías en la ciudad y su región,

diferenciando tipologías vehiculares y periodos de operación, así como sus interacciones con la movilidad de pasajeros.

A diferencia de la demanda de pasajeros, la demanda de carga presenta particularidades relevantes, tales como una mayor dependencia de la localización de actividades económicas, nodos logísticos y corredores de abastecimiento, así como una menor elasticidad frente a variables de costo y tiempo. En este sentido, la modelación de la carga se estructura a partir de la construcción y expansión de matrices origen–destino específicas por tipo de vehículo y periodo, las cuales son posteriormente integradas al modelo general para su asignación en la red.

Es importante señalar que, al revisar el modelo de referencia, se identificó que las matrices de vehículos de carga (CP y CG) existentes presentan comportamientos atípicos, lo cual sugiere que este componente no fue desarrollado con el mismo nivel de profundidad que la demanda de pasajeros dentro del proceso original de construcción del modelo. En este sentido, se entiende que la carga no constituía un componente principal del estudio base, por lo que su representación actual requiere ser revisada, ajustada y fortalecida para garantizar su consistencia y utilidad dentro del análisis.

La incorporación de esta nueva capa de demanda permite enriquecer el modelo al capturar de manera más completa las dinámicas del sistema de transporte, facilitando el análisis conjunto de la movilidad de pasajeros y carga. Esto resulta fundamental para evaluar fenómenos como la competencia por capacidad vial, la congestión en corredores estratégicos y el impacto de los flujos logísticos en el desempeño del sistema, especialmente en una región con alta actividad económica como Bogotá y su entorno.

De esta manera, el modelo de demanda evoluciona hacia una representación más integral del sistema de transporte, en la cual la movilidad de personas y mercancías se analiza de forma conjunta, permitiendo una mejor comprensión de las dinámicas territoriales y operativas del sistema.

3.1.2.1. Zonificación y conectividad

La zonificación en el modelo de referencia se fundamenta en una estructura detallada de Zonas de Actividad de Transporte (ZATs), diseñadas para representar las dinámicas de movilidad y la interacción entre oferta y demanda. Este modelo cuenta con un total de 1.215 ZATs, las cuales han sido delimitadas utilizando criterios técnicos como límites administrativos, barreras urbanas y naturales, y condiciones socioeconómicas. Esta estructura se diseñó para capturar los patrones de generación y atracción de viajes, permitiendo representar de manera precisa los flujos de movilidad en un contexto urbano-regional.

La actualización realizada en 2023 incluyó la revisión y ajustes de 222 ZATs en Bogotá y los municipios vecinos, derivando en la creación de 74 nuevas zonas para reflejar el crecimiento urbano y las nuevas dinámicas de movilidad. Este ajuste también permitió diferenciar de manera más precisa las zonas urbanas, periurbanas y rurales, especialmente en municipios como Soacha, Mosquera y La Calera. Estas nuevas zonas se basaron en datos recientes de crecimiento poblacional, usos del suelo y densificación habitacional, alineados con las proyecciones demográficas del DANE y los planes parciales de desarrollo urbano.

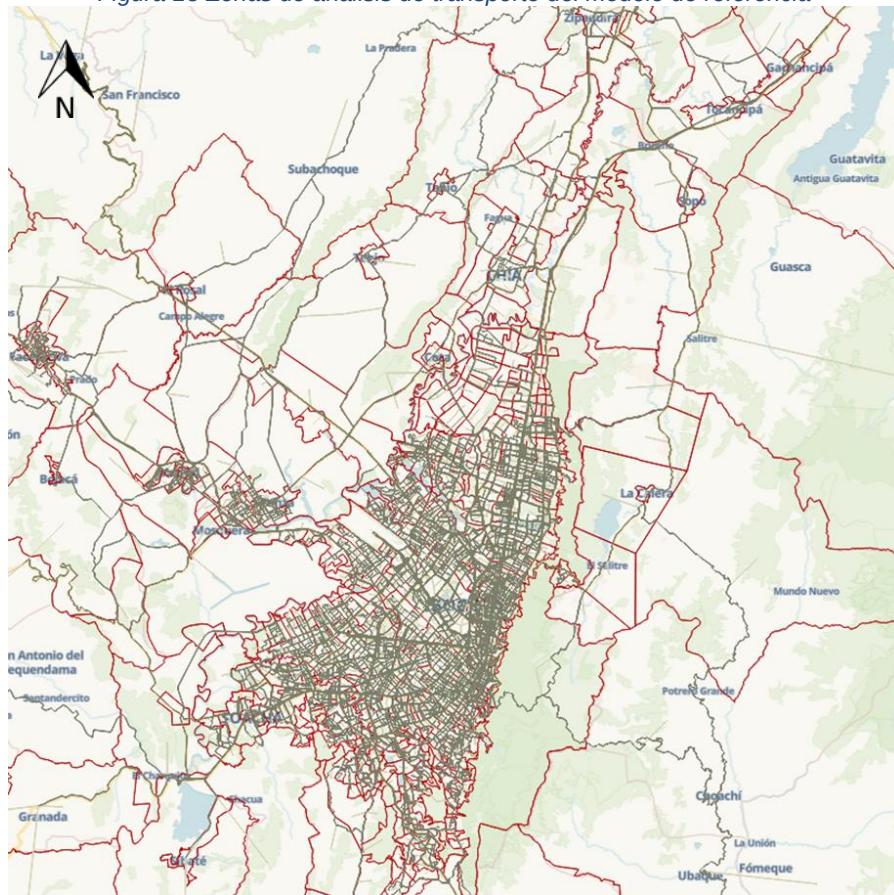
La delimitación de las ZATs también integró información cartográfica del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y redes de transporte actuales y proyectadas, como los corredores de

RegioTram y las futuras expansiones de TransMilenio. Se incluyeron variables como densidad poblacional, niveles de motorización, y los principales polos de generación y atracción de viajes, tales como centros comerciales, zonas industriales y equipamientos educativos.

La conectividad de los centroides de las ZATs a la red vial se desarrolla asegurando consistencia y precisión en la representación de los puntos de interacción entre la oferta y la demanda. Cada ZAT se conecta a la red vial mediante enlaces que reflejan las condiciones reales de accesibilidad, incluyendo factores como distancias, tiempos de recorrido y jerarquía vial. Además, se incorporaron ajustes específicos para mejorar la representación de zonas en crecimiento, como las periferias de Chía, Cajicá y Facatativá, garantizando que los flujos intermunicipales y las conexiones con la red de transporte masivo sean consistentes con las condiciones observadas.

Finalmente, la delimitación también incluye la oferta de transporte público, integrando carriles preferenciales, nodos de intercambio modal y estaciones de transporte masivo, como los portales de TransMilenio y estaciones intermedias clave. Esto permite capturar de manera integral las dinámicas de movilidad tanto a nivel urbano como regional, apoyando la generación de matrices de viaje más precisas y ajustadas a las condiciones actuales y proyectadas de la región.

Figura 13 Zonas de análisis de transporte del modelo de referencia



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.2.2. Demanda base o matriz semilla

Al revisar el modelo de referencia, se identificó que las matrices asociadas a vehículos de carga, particularmente las correspondientes a camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG), presentan comportamientos atípicos y patrones que no reflejan de manera consistente las dinámicas observadas actualmente en la red. En este sentido, se evidencia la necesidad de actualizar y fortalecer este componente del modelo, incorporando información más reciente y metodologías específicas para la representación de la demanda de carga.

El modelo de referencia utiliza una demanda base construida a partir de un proceso acumulativo que integra diversas fuentes de información primaria y secundaria, recolectadas a lo largo de múltiples proyectos de transporte en Bogotá y su región de influencia. Esta matriz semilla es el resultado de la consolidación de datos provenientes de encuestas de movilidad, conteos vehiculares, estudios de ocupación visual y otros insumos relevantes, que permiten reflejar las dinámicas de movilidad en condiciones actuales.

Entre las fuentes de información clave para la construcción de la matriz se incluyen la Encuesta de Movilidad Bogotá–Región (2023), así como estudios relacionados con proyectos estratégicos como la Troncal de la Calle 13, RegioTram de Occidente, el Corredor Verde de la Carrera Séptima y la Troncal de la Avenida 68. Estas fuentes han permitido consolidar matrices específicas por modo de transporte, asegurando una representación robusta de los patrones de generación y atracción de viajes.

La matriz base incluye datos que representan las interacciones entre las ZATs y la red vial y de transporte público. Los datos han sido calibrados y validados con base en conteos vehiculares y de pasajeros observados en puntos estratégicos de control, permitiendo un ajuste preciso entre las condiciones simuladas y observadas.

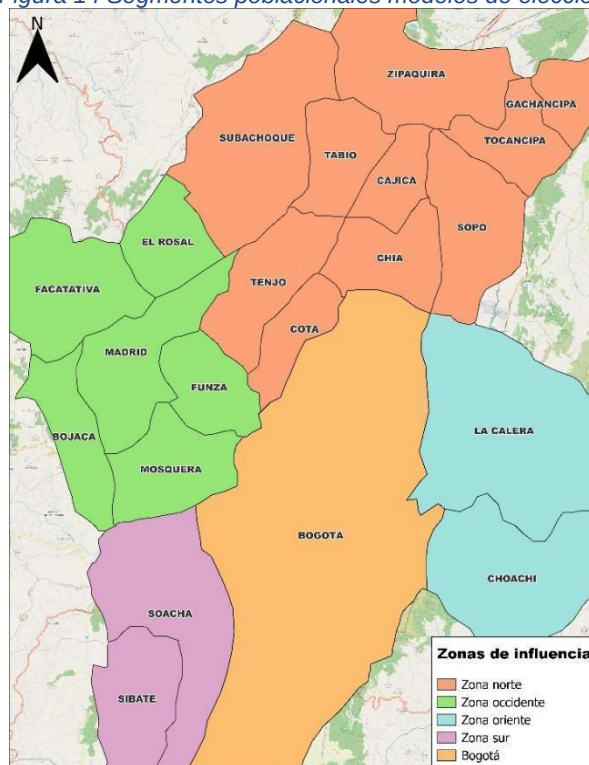
No obstante, dado que el componente de carga no constituyó un elemento principal dentro de los procesos históricos de construcción y calibración del modelo, las matrices existentes de CP y CG presentan limitaciones en términos de representatividad, distribución espacial y consistencia operativa. Por esta razón, el presente proyecto contempla la construcción, ajuste y calibración de nuevas matrices de carga, orientadas a representar de manera más adecuada las dinámicas logísticas y de transporte de mercancías en Bogotá y su región.

3.1.2.3. Segmentación (VOTs y funciones de costo)

El modelo de transporte considera 9 segmentaciones de demanda considerados de manera independiente al modelo de 4 etapas: 1) auto, 2) moto, 3) taxi, y 4) transporte público; siendo los flujos de 5) camiones pequeños, 6) camiones grandes, 7) transporte escolar, 8) transporte especial y 9) taxis vacíos. De manera complementaria, el modelo de 4 etapas considera una estratificación socioeconómica que varía en diferentes segmentos según el submodelo de 4 etapas, así como una segmentación por zona geográfica según la ubicación de la vivienda en el área de estudio distribuida así:

- Zona Norte: Cota, Tenjo, Chía, Cajicá, Tabio, Zipaquirá.
- Zona Occidente: Funza, Mosquera, Bojacá, Madrid, Facatativá, El Rosal.
- Zona Sur: Soacha, Sibaté.
- Zona Oriente: La Calera, Sopó, Tocancipá, Gachancipá.

Figura 14 Segmentos poblacionales modelos de elección



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

En el caso del transporte público, se integra un esquema tarifario que representa las condiciones actuales, con valores diferenciados por subsistema. Las tarifas incluyen \$2.950 para TransMilenio, \$2.750 para los buses zonales, entre \$1.900 y \$3.900 para buses municipales, entre \$2.100 y \$10.900 para buses intermunicipales y \$2.950 para el sistema de cable. Estas tarifas, además de reflejar los costos directos para los usuarios, incorporan los costos asociados a las transferencias entre diferentes subsistemas, lo que permite analizar los efectos de la integración modal sobre la movilidad.

Tabla 32 Matriz de tarifas de transferencias entre rutas de transporte público

	Troncal	Alimentador	Zonal	Buses Municipales	Intermunicipal	Cable
Troncal	\$0	\$0	\$0	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$0
Alimentador	\$0	\$0	\$0	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$0
SITP	\$200	\$0	\$0	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$0
Buses Municipales	\$2.950	\$2.950	\$2.950	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$2.950
Intermunicipal	\$2.950	\$2.950	\$2.950	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$2.950
Cable	\$0	\$0	\$0	\$1.900 - \$3.900	\$2,100 - \$10.900	\$0

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Los submodelos que integran el modelo de cuatro etapas parametrizan el Valor del Tiempo (VOT) según los segmentos de demanda. La tabla presentada a continuación detalla el VOT desagregado por modo de transporte, estratos socioeconómicos y zonas geográficas de Bogotá, además de incluir los valores asociados a vehículos particulares, motos, taxis y servicios de transporte especial. Estos valores son fundamentales para comprender las diferencias en la percepción de costos y priorización de rutas dentro del modelo.

En particular, el modelo de referencia incorpora valores específicos de VOT para el componente de carga, diferenciando entre camiones pequeños y camiones grandes, lo cual permite representar de manera más adecuada las condiciones operativas y los costos generalizados asociados al transporte de mercancías. Para los vehículos tipo camión pequeño (CP), el modelo considera un Valor del Tiempo de 227.53 \$/min, mientras que para los camiones grandes (CG) se utiliza un valor de 280.11 \$/min. Estos parámetros tienen una incidencia directa sobre los procesos de elección de ruta y asignación en red, especialmente en corredores con presencia de peajes, congestión y restricciones operativas.

Tabla 33 Valores VOT del modelo de referencia

Segmento	VOT (\$/min) Transporte público	VOT (\$/min) Autos	VOT (\$/min) Motos	VOT (\$/min) Taxis	VOT (\$/min) Otros
Estrato 12	134,91	163,37	150,40	215,15	
Estrato 3	150,39	194,14	178,73	255,69	
Estrato 4	156,31	242,6	223,36	319,49	
Estrato 56	234,16	294,90	271,52	388,35	
Norte	119,52	218,77	167,70		
Sur	87,65	171,06	131,11		
Oriente	94,31	195,66	149,99		
Occidente	102,22	211,46	162,07		
Camiones pequeños					227,53
Camiones grandes					280,11
Escolar					281,77
Especial					224,16
Taxis vacíos					224,16

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

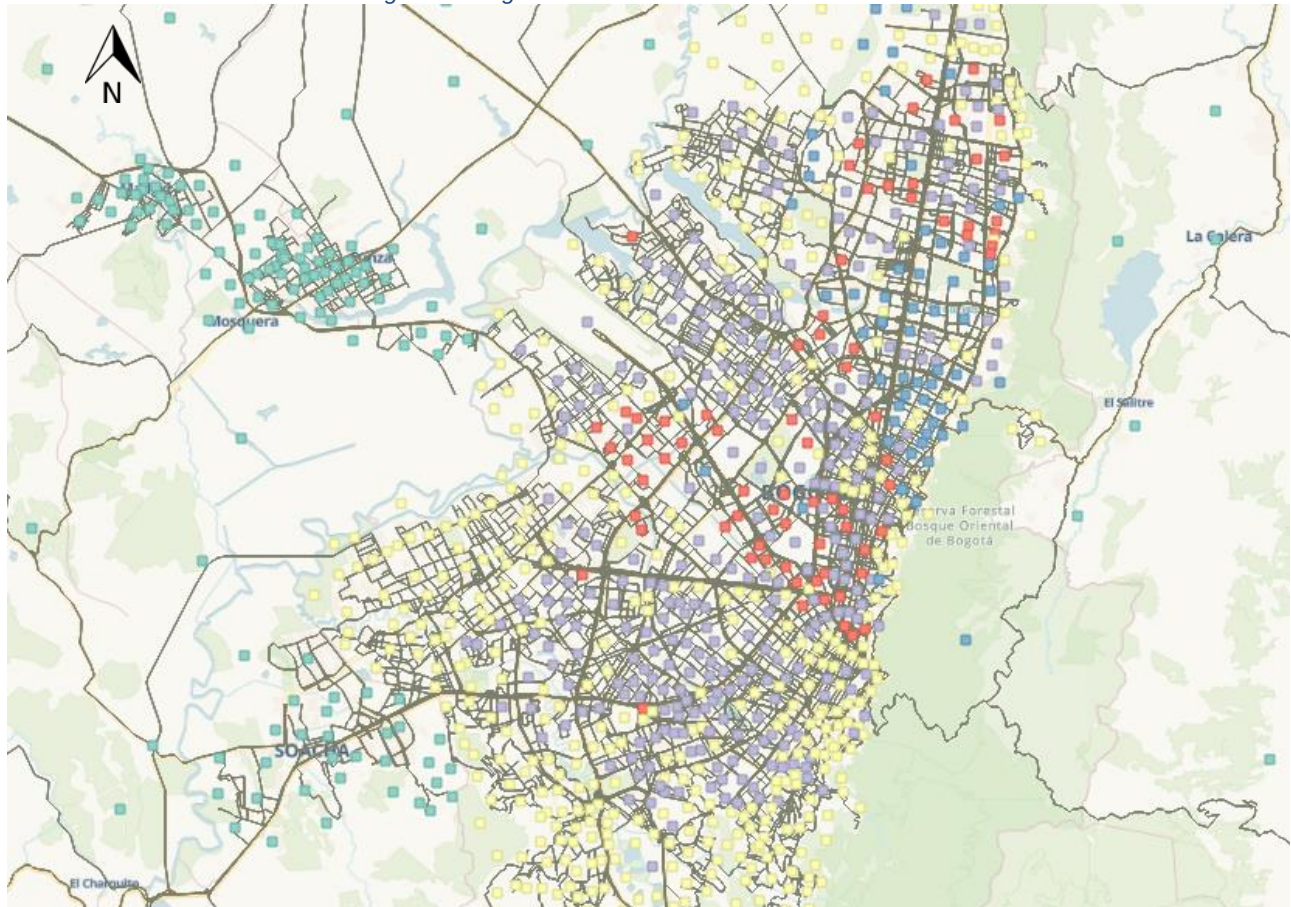
Además, en el transporte público tiene en cuenta una constante modal de 8,65 para el Metro y se incorporan penalizaciones específicas para los transbordos y las diferentes etapas del viaje, en función del modo utilizado y las características de los usuarios. Estas penalizaciones consideran valores como:

- 7,65 para los trasbordos entre servicios de TransMilenio
- 12,09 entre TransMilenio y zonales
- 3,75 para conexiones con alimentadores
- 4,09 con servicios intermunicipales

Asimismo, la percepción de tiempos en las distintas etapas del viaje se parametriza con valores ponderados, asignando un peso de 1,96 al tiempo de espera, 1,00 al tiempo de viaje, 1,36 al tiempo de caminata y 1,07 al tiempo de abordaje.

En cuanto a los costos de operación para transporte privado, el modelo incluye valores asociados a los costos operativos por kilómetro, tales como 578 \$/km para vehículos particulares y 127 \$/km para motocicletas. Estas parametrizaciones son fundamentales para reflejar los costos percibidos por los usuarios y su influencia en la selección modal dentro del modelo de transporte, pero solo se utilizan dentro de las matrices de costos asociadas al modelo de elección, no para el modelo de asignación.

Figura 15 Segmentación del modelo de referencia



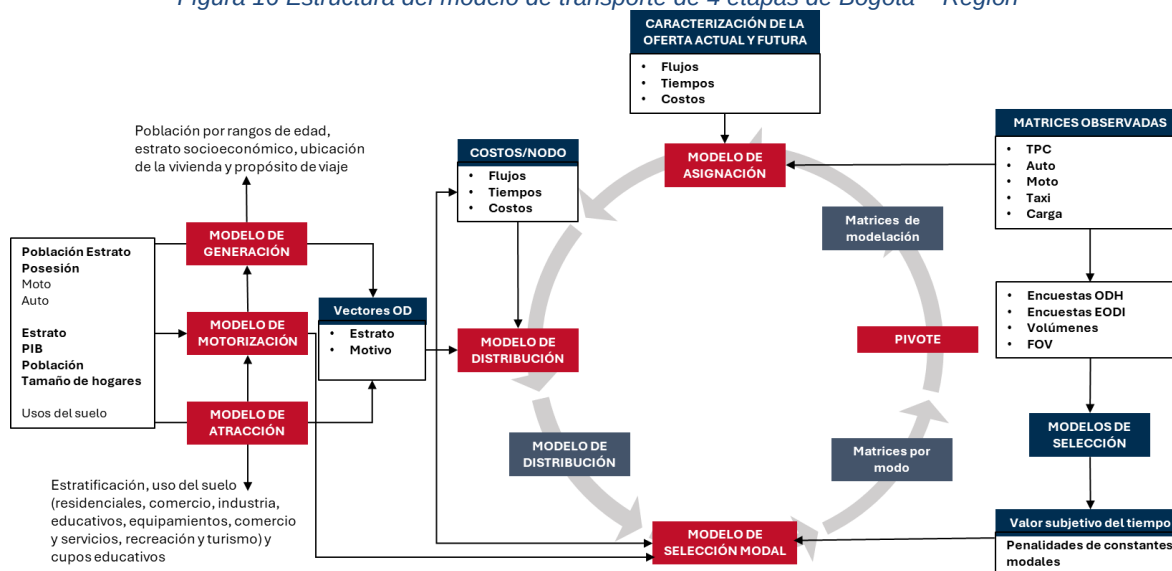
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Otras parametrizaciones como parte del proceso de modelación de 4 etapas son: i) las tasas de generación de viajes definidas a partir del estrato, motivo y grupo etario, ii) las tasas de atracción de viajes por estrato y uso del suelo, iii) la tenencia de vehículo, entre otros.

3.1.3. Arquitectura del modelo

Como se mencionó previamente las 4 etapas consisten en: 1) estimación de la cantidad de viajes generados y atraídos en las diferentes ZATs a partir de las proyecciones de población y usos del suelo para cada zona, 2) distribuir los viajes resultantes de la etapa 1 las relaciones entre ZATs se dan en razón de la oferta/demanda de los motivos de viaje y de las impedancias de transporte entre ZATs, 3) definir los modos de transporte en los que se realizan los viajes de la etapa 2 (considerando la disposición de modos y las impedancias entre ZATs según el modo) y 4) asignar el modelo de transporte para definir las rutas de cada viaje y por consiguiente los costos y tiempos de viaje incurridos en cada recorrido (a partir del costo generalizado de las alternativas). Enseguida se presenta el funcionamiento del modelo de 4 etapas.

Figura 16 Estructura del modelo de transporte de 4 etapas de Bogotá – Región



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Es importante precisar que, en el marco del presente proyecto, la incorporación de la demanda de carga no implica modificaciones en la arquitectura del modelo de 4 etapas, sino su integración dentro de la estructura existente. En particular, las matrices de vehículos de carga tipo CG hacen parte de una precarga sobre la red vial, mientras que las matrices de vehículos tipo CP se integran dentro del esquema de asignación multiclase, junto con otros modos motorizados.

En este sentido, la lógica del modelo se mantiene intacta, y la carga es tratada como un componente adicional dentro de la etapa de asignación, respetando las relaciones funcionales entre oferta y demanda definidas en las etapas previas. Sin embargo, es fundamental comprender la arquitectura del modelo para garantizar que la incorporación de estos flujos se realice de manera consistente, especialmente en términos de la interacción con otros modos, la capacidad de la red y los efectos sobre los tiempos y costos de viaje.

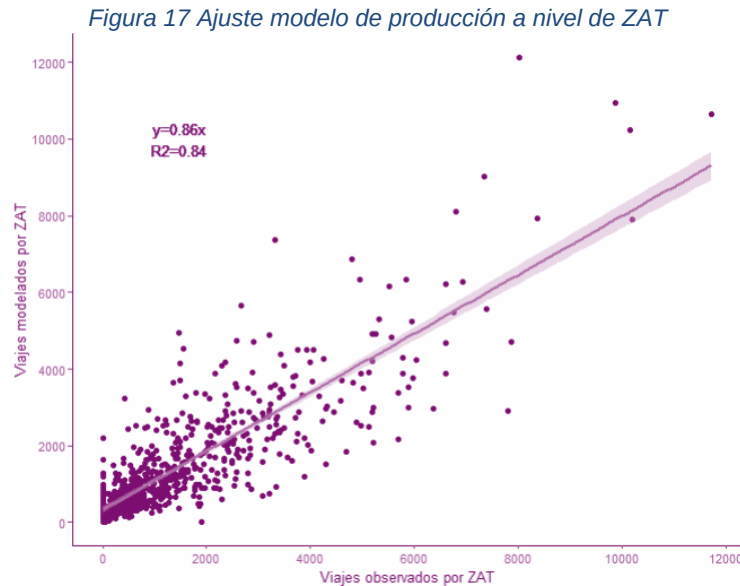
De esta manera, aunque la carga no modifica la estructura conceptual del modelo, su adecuada integración requiere una lectura detallada de la arquitectura existente, con el fin de asegurar que los resultados obtenidos reflejen de manera adecuada las dinámicas conjuntas de la movilidad de pasajeros y mercancías.

3.1.3.1. Modelo de generación y atracción

El modelo de generación/atracción se emplea para estimar los viajes producidos y atraídos en cada ZAT, utilizando relaciones estadísticas basadas en variables demográficas, socioeconómicas y de uso del suelo para analizar las dinámicas de movilidad en el área de estudio.

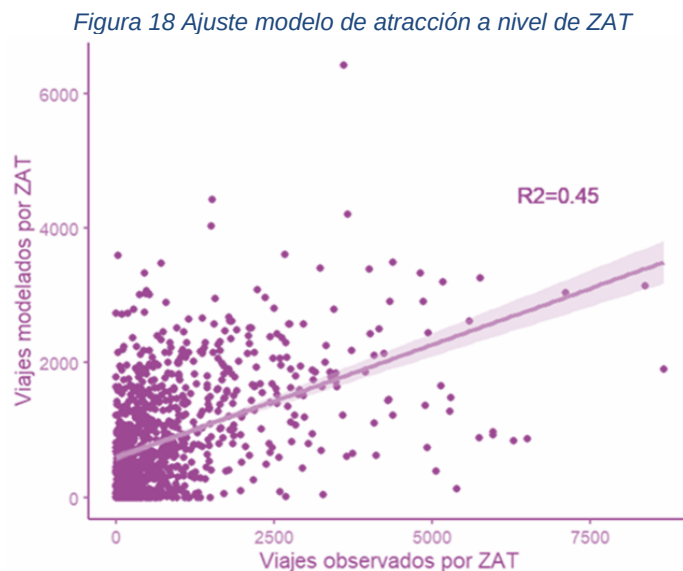
En cuanto al modelo de generación de viajes, se utilizan variables explicativas como la población desagregada por rangos de edad (segmentos de 5-24 años, 25-64 años y mayores de 65 años), el tamaño del hogar, el estrato socioeconómico y el propósito del viaje (trabajo, educación, actividades recreativas, entre otros). Estas variables permiten establecer tasas específicas de generación de viajes para cada ZAT, reflejando las características particulares de la población y

sus patrones de movilidad. Las tasas son calculadas mediante regresiones lineales, ajustando los coeficientes para garantizar precisión y representatividad, logrando coherencia con los datos observados. La siguiente figura muestra el ajuste entre los datos observados y simulados para la producción de viajes, validando la correspondencia del modelo a nivel de ZAT.



Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Por su parte, el modelo de atracción de viajes se modela a partir de factores como el uso del suelo (vivienda, comercio, industria, equipamientos educativos y recreativos), los cupos escolares, la accesibilidad y la conectividad de las ZATs. Estos factores permiten definir tasas diferenciadas por tipo de actividad y estrato socioeconómico, asegurando una representación adecuada de las interacciones entre las zonas de origen y destino.



Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

El modelo se apoya en diversas fuentes de información primaria y secundaria, como encuestas de movilidad, conteos vehiculares y estudios de uso del suelo. Estas fuentes son esenciales para calibrar y validar los coeficientes utilizados, asegurando que los resultados reflejen las condiciones reales de movilidad en el área de estudio. La formulación matemática del modelo incorpora ecuaciones de regresión lineal, donde los coeficientes y variables explicativas permiten integrar factores como la densidad poblacional, las tasas de motorización y las características de la infraestructura disponible.

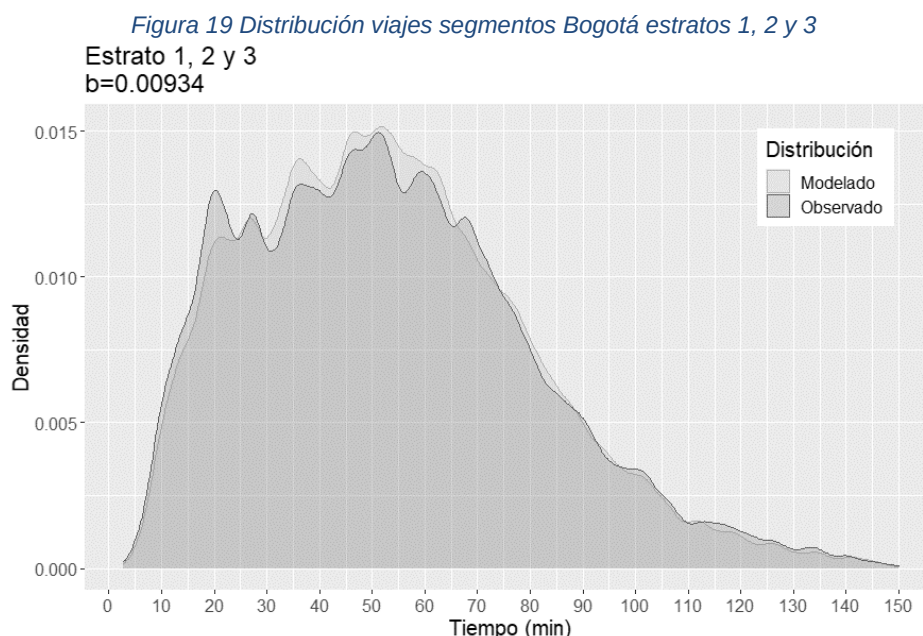
3.1.3.2. Modelo de distribución

Cuantificados los viajes producidos y atraídos, el modelo de distribución establece las relaciones de viaje entre las ZATs utilizando un enfoque gravitacional que evalúa las alternativas de relación entre zonas según los motivos de viaje. Este proceso se basa en una medida de “fricción” o impedancias, representadas por los tiempos promedio de viaje entre pares origen-destino, ponderados según la demanda modal para transporte público y privado.

El resultado del modelo de distribución es una matriz de viajes amodal por motivo en donde las sumatorias que convergen en términos de generación y atracción.

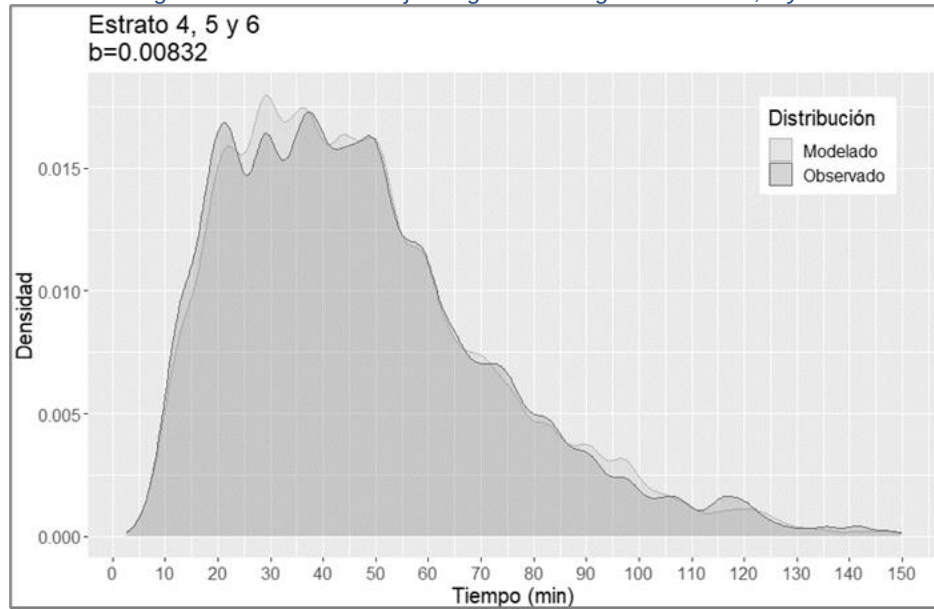
Considerando la necesidad de estimar impedancias, el modelo de distribución hace uso del modelo de asignación para evaluar las impedancias modales, de tal manera que los parámetros alfa y beta estimados, permiten generar resultados lógicos en términos de frecuencias de viaje y costos de estos.

Las figuras que se presentan a continuación muestran los resultados obtenidos en el modelo de distribución teniendo en cuenta la segmentación socioeconómica y por municipios.



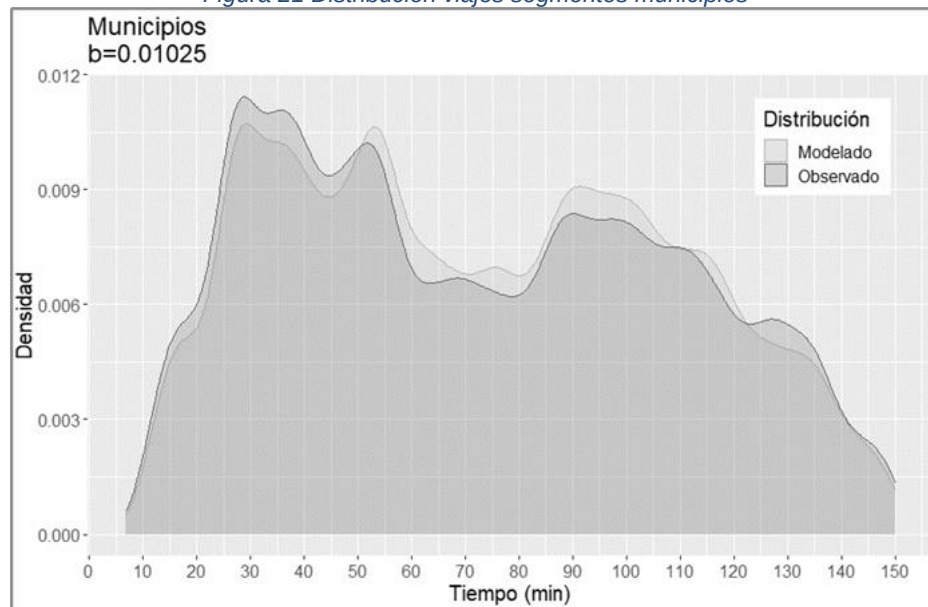
Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 20 Distribución viajes segmentos Bogotá estratos 4, 5 y 6



Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 21 Distribución viajes segmentos municipios



Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.3.3. Modelo de reparto modal

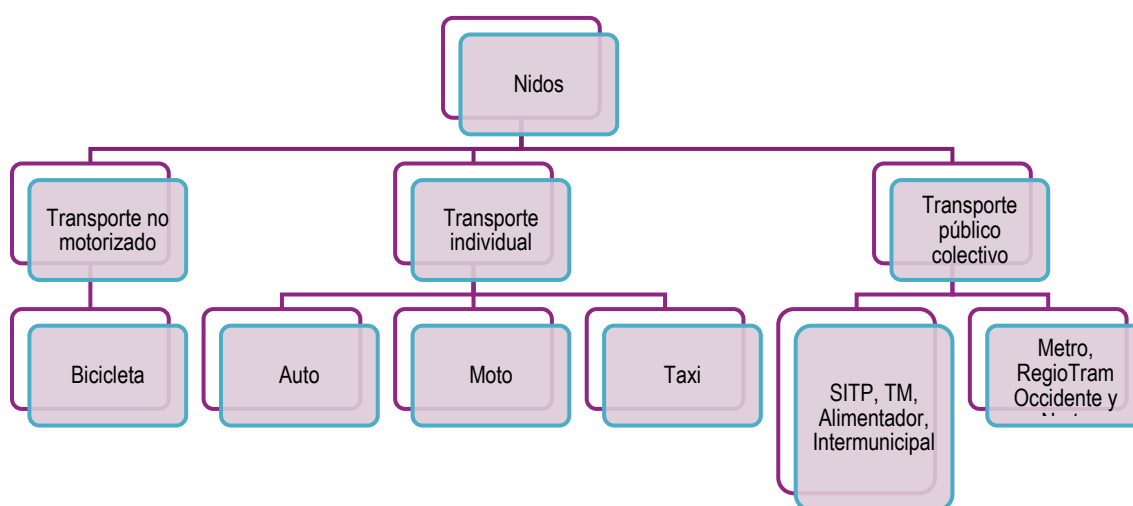
El modelo de reparto modal permite desagregar los viajes distribuidos entre las ZATs según los diferentes modos de transporte disponibles. El modelo de motorización, como insumo del modelo de elección modal, tiene el propósito de prever la tenencia de vehículos privados (autos y motos) a lo largo del tiempo. Para ello, considera variables explicativas como las proyecciones de PIB per cápita (indicador del nivel de ingreso) y el comportamiento histórico de la motorización. Estas

variables permiten proyectar la evolución de la tenencia de vehículos a nivel de estrato mediante análisis estadísticos.

A partir de la distribución de viajes y la disponibilidad modal, el modelo de elección cuantifica la proporción de viajes realizados en los diferentes modos de transporte para cada par origen-destino. Este proceso incorpora las características de los usuarios y un análisis detallado de los costos de viaje asociados a cada modo de transporte, los cuales son calculados mediante el modelo de asignación para determinar las impedancias

La siguiente figura ilustra la estructura del modelo de elección modal actualizado, que incluye transporte no motorizado (bicicleta), transporte individual (auto, moto y taxi) y transporte público colectivo. Adicionalmente, se agregaron las alternativas de Metro y Regiotram.

Figura 22 Estructura del modelo de elección



Fuente: a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

La probabilidad de escogencia de las alternativas se define a partir de un modelo de elección discreta que incorpora árboles de elección definidos a partir de las características de las alternativas y de los individuos que toman la decisión (incluyendo la disponibilidad de modos, el valor del tiempo y otras variables de interés). Como resultados del modelo de elección modal se tienen las matrices de viaje por modo, motivo y estrato.

3.1.3.4. Modelo de control de matrices o pivote

El modelo de control de matrices, previamente conocido como modelo pivote, tiene como propósito garantizar que las matrices de transporte en el horizonte de análisis reflejen las dinámicas reales de movilidad en Bogotá y la región. Este proceso se desarrolla a partir de las matrices modales generadas en etapas previas, aplicando un ajuste incremental en relación con la matriz observada del año base. Este enfoque incremental aditivo permite incorporar elasticidad en pares origen-destino sin viajes registrados en la matriz base y realizar ajustes para viajes negativos, asegurando una representación lógica y coherente de los flujos de movilidad.

El modelo mantiene la proporción relativa de los flujos observados, mientras ajusta las diferencias proyectadas para reflejar los cambios esperados en la demanda de transporte. Este

procedimiento permite consolidar matrices que sirvan como insumos en los análisis y proyecciones futuras.

3.1.3.5. Modelo de asignación

Dentro del proceso de revisión del modelo de referencia, se realiza un énfasis particular en la representación y asignación de los vehículos de carga, especialmente para los segmentos de camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG). En este sentido, se identifica que, aunque el modelo incorpora explícitamente estos segmentos dentro de la asignación vehicular, el costo generalizado utilizado en los procesos de elección de ruta no considera de manera explícita los Costos de Operación Vehicular (COV) asociados al transporte de carga.

Esta condición resulta particularmente relevante para el análisis de vehículos pesados, dado que variables como pendientes, estado de la infraestructura, distancias recorridas, consumo de combustible y desgaste operativo tienen una incidencia significativa sobre las decisiones reales de ruteo de este tipo de vehículos. En consecuencia, la ausencia de estos componentes dentro de la impedancia generalizada puede inducir comportamientos de asignación que no necesariamente representan las condiciones operativas reales del transporte de mercancías, especialmente en corredores regionales y rutas alternativas de larga distancia.

Los modelos de asignación (de transporte público y vehículo particular) permiten analizar y definir las estrategias que cada uno de los viajes toma entre cada par origen-destino de acuerdo con la oferta modal.

Las matrices estimadas para cada modo son asignadas en la red de oferta para determinar volúmenes de vehículos y de pasajeros en los diferentes arcos/rutas de la red de oferta y sus costos y tiempos asociados. Una vez asignados los viajes, se pueden consultar los resultados de ocupación tanto de la red vial como de las rutas; así mismo, el modelo permite analizar costos e impedancias de los viajes en la red de transporte. El modelo de asignación de viajes transcurre en 3 fases:

- La primera es la asignación todo o nada para aquellos modos tipo transporte privado que tienen pocas opciones de tránsito por la red o funcionan como tráfico de fondo (precarga definida para camiones grandes y la equivalencia de la operación del transporte público).
- La segunda es la asignación por equilibrio del usuario multiclase para los modos tipo camiones pequeños y transporte privado (autos, motos, taxis y especiales), que toman la decisión de ruta de viaje considerando de las condiciones de congestión en la red
- Finalmente, como parte de la tercera asignación, se representan los flujos de transporte público para todos los modos que movilizan sus usuarios en servicios de este tipo (TransMilenio, SITP, metros, RegioTram, entre otras) que en el caso de tráfico mixto parten de las estimaciones de velocidades en condiciones de congestión.

Considerando la diferencia entre viajes de personas y desplazamientos de vehículos, algunos de los segmentos parten de demandas de viajes que posteriormente son afectadas por factores de ocupación para llegar a demandas vehiculares, lo anterior facilita la representatividad del tráfico y de las condiciones de congestión mediante la inclusión de factores de equivalencia vehicular que se aplica tomando como referencia unitaria los autos en las funciones de demora. Si bien el

modelo de asignación considera la tarifa de los peajes del área de influencia, no considera impedancias relacionadas a los Costos de Operación Vehicular (COV).

Finalmente, es importante resaltar el proceso iterativo del modelo de 4 etapas, lo anterior considera la definición de gaps definidos para los procesos de convergencia de los modelos.

3.1.4. Calibración del modelo

La calibración del modelo garantiza que las dinámicas de movilidad representadas sean consistentes con las condiciones reales observadas en el sistema de transporte. A través de controles estratégicamente ubicados para validar flujos de transporte privado y público, indicadores de validación como el GEH, y ajustes detallados en las matrices de viaje por modo, se logra una correspondencia entre los datos simulados y los observados.

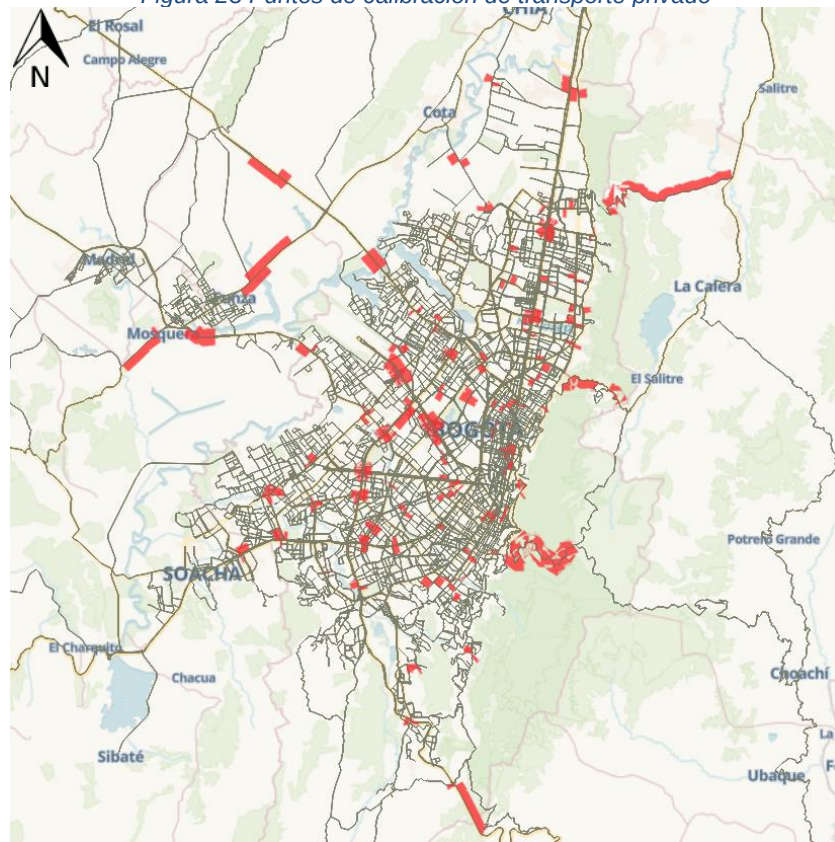
En el marco de la revisión del modelo de referencia, se evidencia que el proceso de calibración incorpora de manera implícita la presencia de vehículos de carga, particularmente en la representación de camiones grandes y pequeños dentro de los flujos vehiculares observados en la red. En este sentido, se identifica una adecuada correspondencia entre los volúmenes modelados y observados para estos tipos de vehículos, lo cual sugiere que, aunque la carga no fue el foco principal del modelo, su efecto sobre la red se encuentra razonablemente capturado dentro de los procesos de calibración.

No obstante, es importante precisar que esta calibración refuerza la necesidad de complementar el modelo mediante la incorporación de matrices nuevas de vehículos de carga. Esto permitirá mejorar la representatividad de estos flujos y su interacción con el resto del sistema, especialmente en términos de asignación y desempeño operativo en la red.

De esta manera, el modelo de referencia proporciona una base calibrada robusta sobre la cual se pueden integrar los nuevos componentes de demanda de carga, asegurando coherencia con las condiciones observadas y permitiendo fortalecer el análisis del sistema de transporte de manera integral.

Además, en el proceso de calibración, se identificaron puntos de calibración o de referencia distribuidos estratégicamente en corredores de alta demanda y en zonas de integración modal para evaluar el desempeño del modelo y ajustar parámetros relevantes.

Figura 23 Puntos de calibración de transporte privado



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

A detailed map of Bogotá, Colombia, illustrating the spatial distribution of 100 sampling points. The points are marked as blue squares and are densely clustered in the central urban core, particularly in the areas around the city center, and more sparsely distributed in the peripheral zones. The map includes a north arrow in the top left corner. Key geographical features and labels include 'Cota' to the north, 'Mejía' to the west, 'La Calera' to the east, and 'Sibaté' to the south. The 'Reserva Forestal Parque Oriental de Bogotá' is labeled on the eastern edge. The city's street grid is clearly visible, and the surrounding green areas represent parks and forested land.

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.4.1. Controles por modo

El modelo de transporte de referencia incluye controles estratégicamente asignados en la red para validar los flujos de viajes y las características operativas del sistema. Estos controles se establecieron para cada uno de los modos principales de transporte, tanto privado como público, y se localizaron en puntos clave de la red vial y del sistema de transporte público con el propósito de monitorear y analizar las dinámicas de movilidad.

En el transporte privado, los controles se definieron en puntos de aforo vehicular estratégicos, ubicados en corredores principales, intersecciones relevantes y accesos significativos de la red vial regional. Estos 230 puntos permitieron registrar los volúmenes vehiculares por categoría, tales como automóviles, motocicletas, camiones y taxis, lo que contribuyó a obtener una representación precisa de los flujos vehiculares y las características operativas de la red.

En cuanto al transporte público, los controles se ubicaron en puntos estratégicos del sistema, incluyendo portales de TransMilenio, estaciones zonales, rutas alimentadoras y servicios intermunicipales clave. Estos controles permitieron monitorear los volúmenes de pasajeros, las frecuencias de operación y la ocupación visual (FOV) en los principales subsistemas. Además, se analizaron aspectos como las frecuencias de servicio y las penalidades asociadas al trasbordo y costos operativos en los diferentes componentes del sistema de transporte público (troncal, zonal, alimentador e intermunicipal).

Tabla 34 Controles por subsistema de transporte público

Subsistema	Controles
Componente troncal	20
Accesos TM	140
Componente Zonal	115
Componente Alimentador	23
Buses Intermunicipales	20
TOTAL CONTROLES	328

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

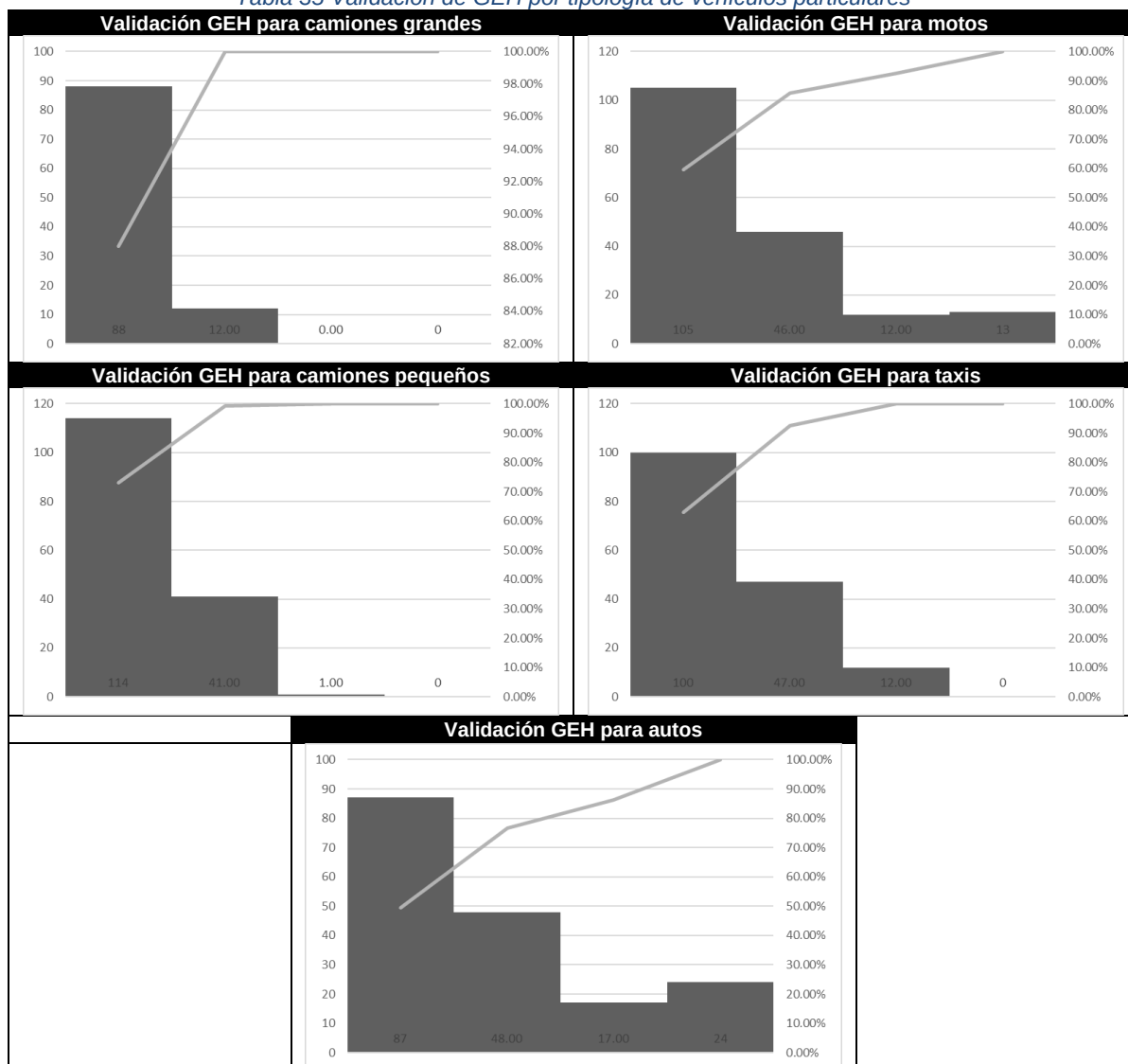
3.1.4.2. Indicadores de bondad

La evaluación de la calibración del modelo de referencia se llevó a cabo mediante el indicador GEH (Geoffrey E. Havers), el cual permite medir la correspondencia entre los volúmenes simulados y observados en los puntos de control. Este indicador es ampliamente utilizado en la validación de modelos de transporte debido a su capacidad para identificar discrepancias significativas en los volúmenes asignados por el modelo en comparación con los datos reales.

Los criterios establecidos para validar la calidad de la calibración son: (i) al menos el 60% de los puntos de control deben presentar valores de GEH inferiores a 5, (ii) el 85% debe tener valores menores a 10, y (iii) los valores superiores a 12 deben ser revisados y, de ser necesario, justificados con base en las características particulares de los flujos o los puntos de control.

En el modelo de referencia, la mayoría de los puntos cumplieron con estos criterios, indicando un alto grado de consistencia entre los datos simulados y observados. Los casos en los que el GEH superó los valores aceptables se analizaron a profundidad, considerando factores como irregularidades en los flujos vehiculares, características de los pares origen-destino, y tamaño o distribución de las zonas adyacentes.

Tabla 35 Validación de GEH por tipología de vehículos particulares



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Además, se empleó el indicador de R^2 para evaluar el grado de correlación entre los volúmenes simulados y observados, estableciendo un valor mínimo de 0,7. Esto asegura que el modelo explica al menos el 70 % de la variabilidad observada en los datos.

Para complementar el análisis, se aplicaron indicadores auxiliares que ofrecen una evaluación más detallada del ajuste del modelo:

- **Dispersión:** Refleja la variabilidad entre los datos modelados y los observados. Valores bajos indican una correspondencia más estrecha, lo que refuerza la confianza en las predicciones del modelo.
- **Diferencia Absoluta:** Representa la suma de las discrepancias en términos absolutos, proporcionando una medida clara de la precisión general sin considerar la dirección de las diferencias.

- Diferencia Porcentual: Calcula la magnitud de las desviaciones como porcentaje de los datos observados, permitiendo analizar el impacto relativo en diferentes rangos de flujos.
- SQV (Suma de los Cuadrados de las Diferencias): Pondera las desviaciones significativas mediante su elevación al cuadrado, aportando una perspectiva integral de la precisión.

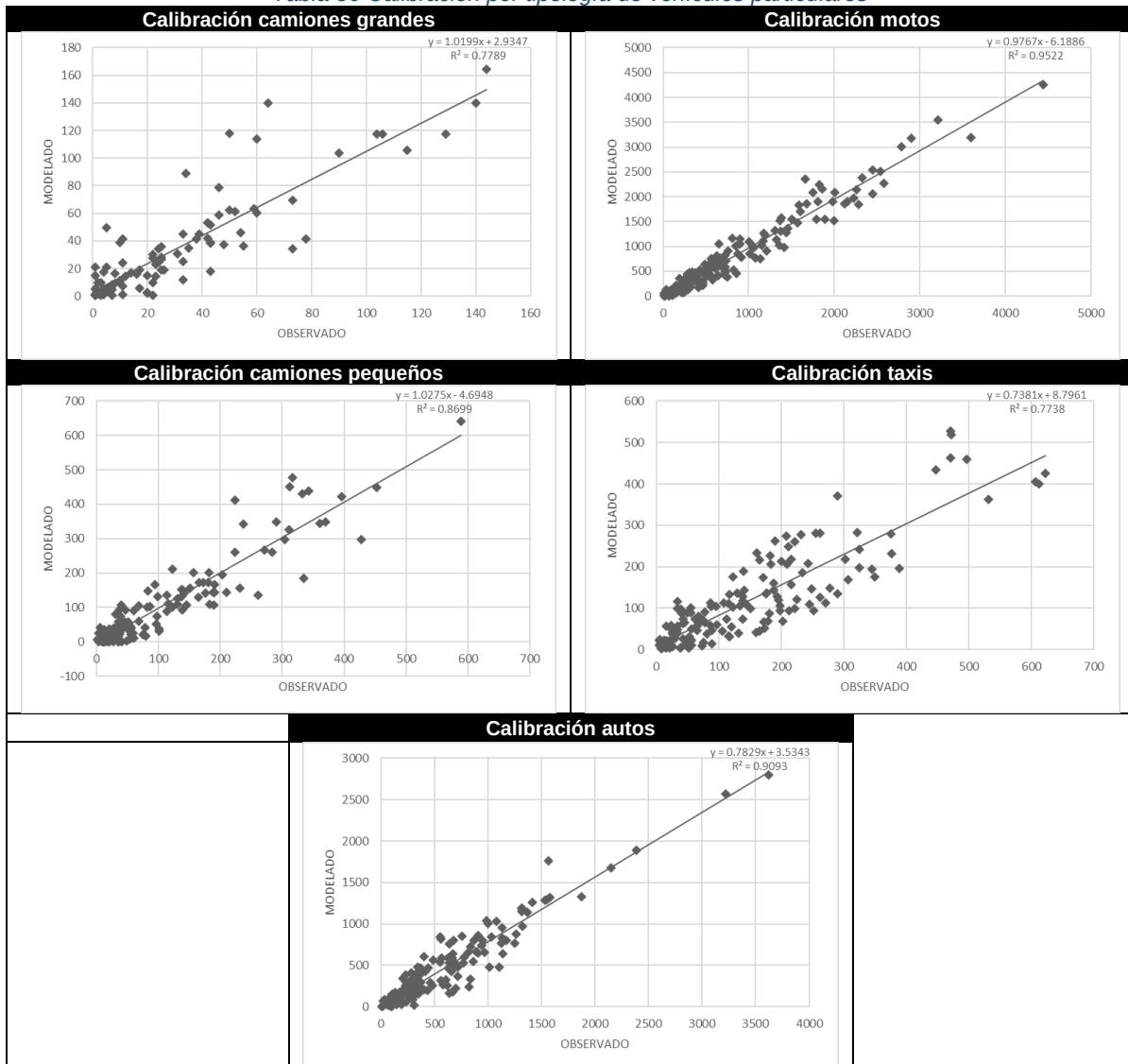
Estos indicadores deben ser analizados de manera conjunta para obtener una visión completa de la validez del modelo. Su sensibilidad a la magnitud de los flujos subraya la importancia de considerar el contexto específico de cada caso, contribuyendo a una evaluación precisa de la eficacia del modelo calibrado.

3.1.4.3. Matrices calibradas por modo

La calibración de las matrices por modo en el modelo de referencia Bogotá – Región fue un proceso iterativo que aseguró la consistencia entre los datos observados y simulados en la red de transporte. Estas matrices, que representan la distribución de los viajes entre las zonas de análisis, fueron ajustadas para reflejar las condiciones reales de generación, atracción y patrones de viaje observados en el área de estudio. El proceso incluyó ajustes por tipología de transporte, asegurando una representación adecuada para los modos de transporte privado y público.

En el transporte privado, las matrices calibradas abarcaron los flujos vehiculares correspondientes a automóviles, motocicletas, taxis y vehículos de carga. Para validar estos flujos, se emplearon datos de conteos vehiculares realizados en puntos estratégicos de la red, tales como corredores principales y accesos críticos. La calibración consideró las características de las vías según su tipología, incluyendo la jerarquía vial, afectaciones, número de carriles y la ubicación de los puntos de aforo.

Tabla 36 Calibración por tipología de vehículos particulares



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Adicionalmente, el proceso de calibración incorporó un análisis detallado de velocidades en los principales corredores de la red vial. A través de diagramas espacio-tiempo, se validaron las velocidades modeladas frente a las observadas en tramos específicos como la Autopista Norte, la Avenida Caracas y la NQS, entre otros.

Tabla 37 Velocidades máximas, mínimas y promedio (km/h)

	Corredor	Emme	Medida
Velocidad promedio	Avenida Ciudad de Cali SN	18,42	18,46
	Avenida Carrera 9	26,40	23,10
	Autopista Sur SN	17,27	24,40
	Avenida 68 NS	22,64	20,85
	Avenida Boyacá NS	19,84	21,94
Velocidad máxima	Avenida Boyacá	36,06	59,5
	Calle 26 WE	27,04	29,6
	Autopista Sur NS	20,57	23,1
	Calle 13 WE	32,50	27,2
	NQS SN	43,16	29,8
Velocidad mínima	Calle 19 EW	12,37	8,58
	Carrera 10 SN	5,15	5,1
	Autopista Sur NS	8,76	5
	Avenida Ciudad de Cali NS	3,7	6
	Av. Primera de Mayo WE	8,3	7

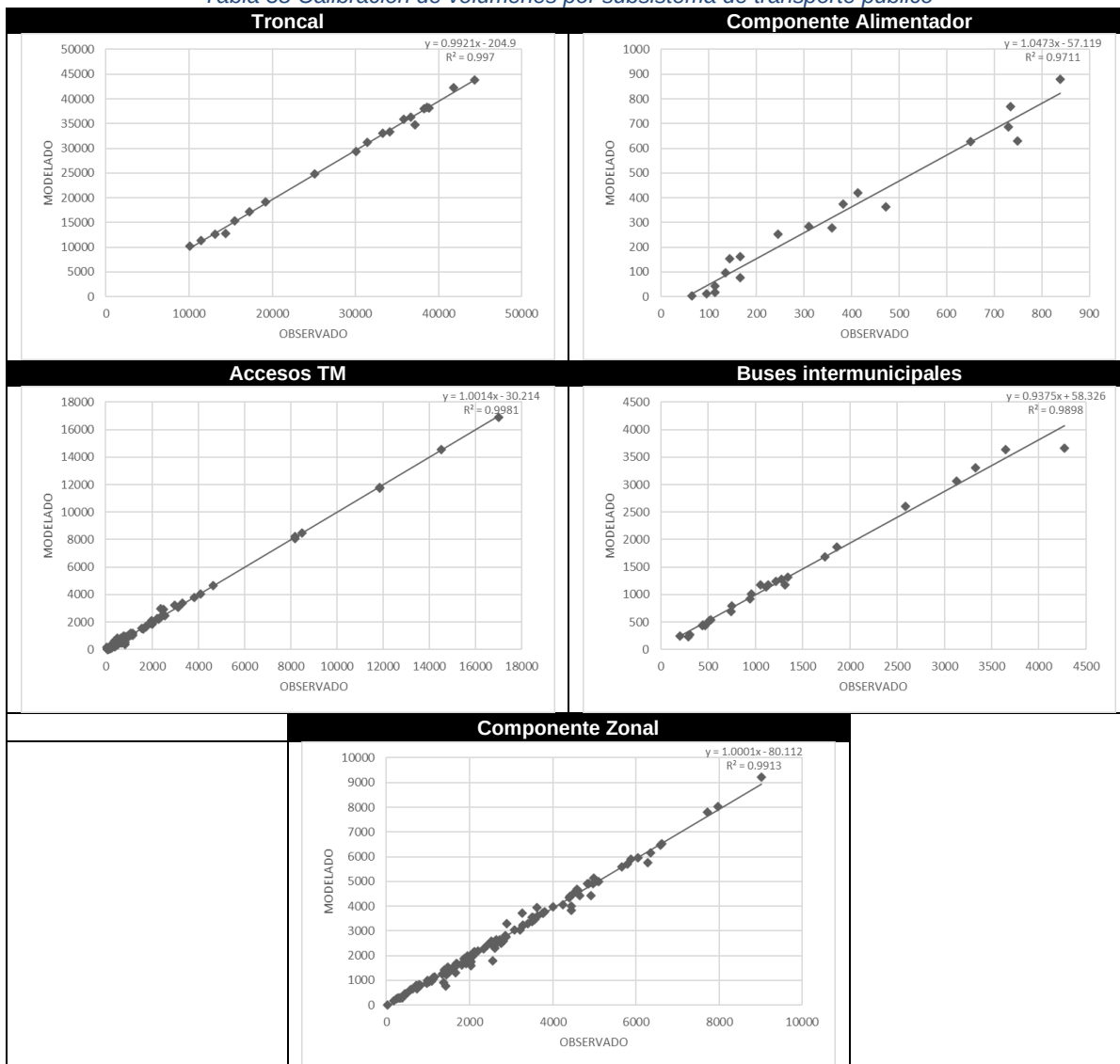
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

En el transporte público, las matrices calibradas capturaron los flujos de pasajeros en subsistemas clave, como los servicios troncales, zonales, alimentadores e intermunicipales, utilizando datos de conteos de pasajeros, frecuencias operativas y encuestas modales. Un aspecto crucial fue la calibración de los tiempos de ciclo en nodos estratégicos, como portales de TransMilenio, estaciones zonales y puntos de transferencia. Este análisis garantizó que los tiempos de espera y trasbordo fueran consistentes con las condiciones reales, mejorando la representación de los patrones modales y la operación de los servicios.

El proceso de calibración de transporte público incluyó (i) una revisión general de rutas, tiempos de ciclo y trazados, (ii) un ajuste de las verificaciones de ingreso en estaciones de TransMilenio, mediante la corrección de paradas y la creación de conexiones adicionales y (iii) la validación de la afluencia de pasajeros en los arcos, excluyendo aquellos que forman parte del componente troncal y habilitando la caminata en las estaciones y puntos esenciales para las transferencias.

A continuación, se presentan los resultados de las dispersiones de los volúmenes modelados y medidos para el transporte público y sus subsistemas:

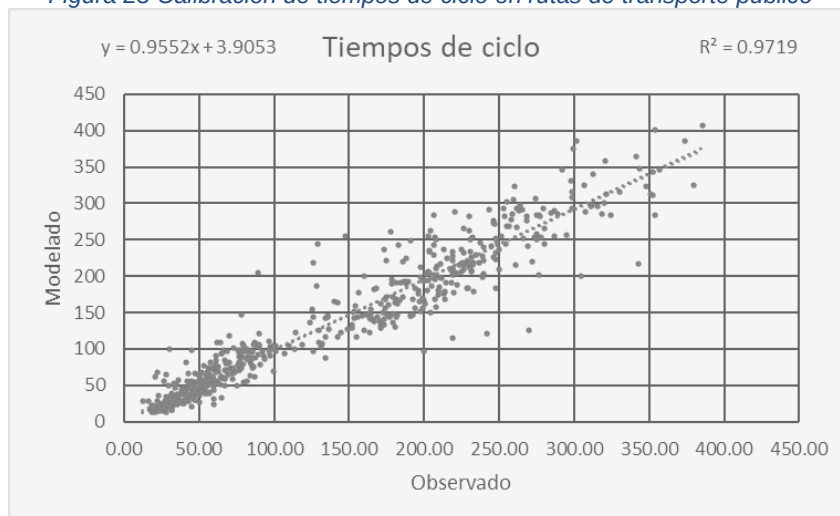
Tabla 38 Calibración de volúmenes por subsistema de transporte público



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Adicionalmente, en el proceso de calibración, se tuvo como base la adecuación de los tiempos de ciclo de las rutas en comparación con los registrados en el terreno. Estos tuvieron un ajuste del 0,96 en relación con los valores observados.

Figura 25 Calibración de tiempos de ciclo en rutas de transporte público



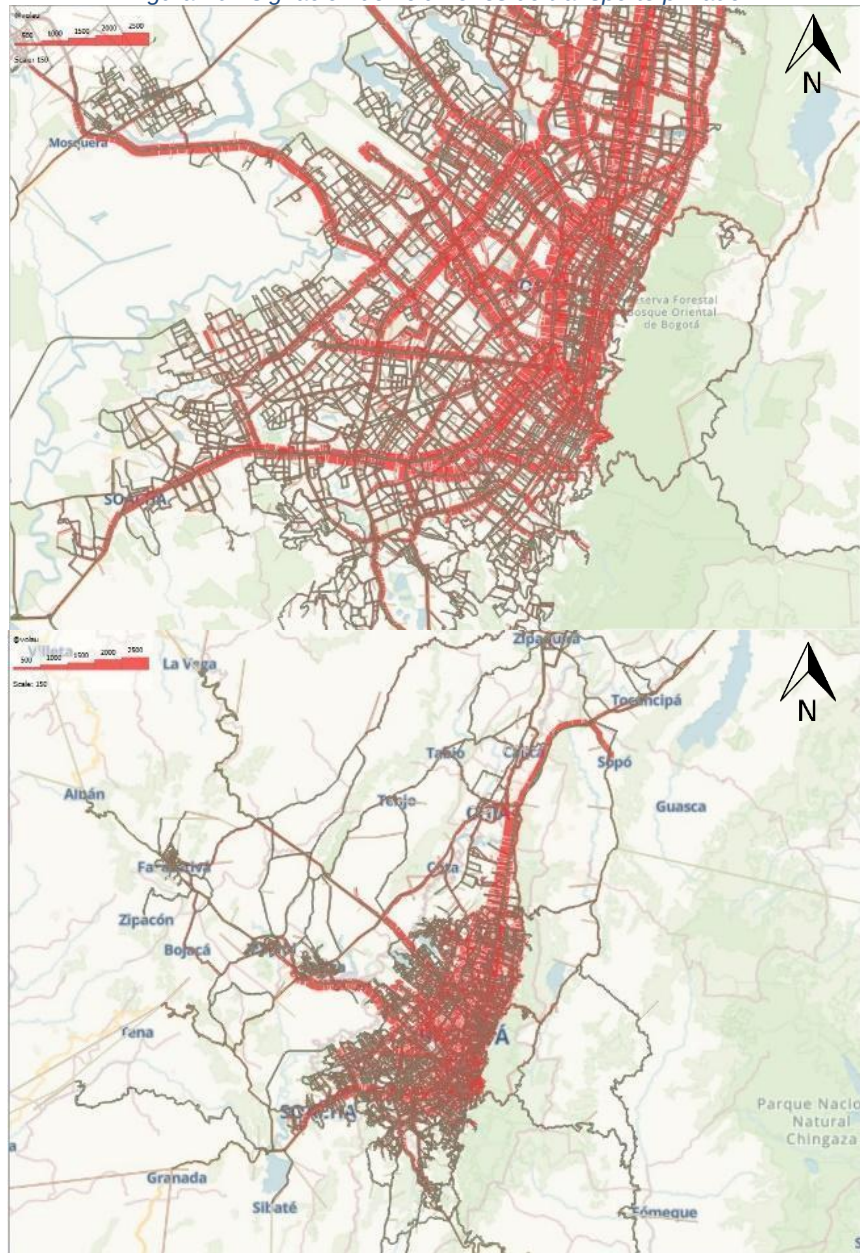
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.1.4.4. Asignaciones por modo de transporte

El proceso de asignación por modo en el modelo de referencia Bogotá – Región se realizó para representar la interacción entre la oferta y la demanda en la red de transporte. La asignación permite distribuir los flujos de viajes de las matrices calibradas sobre la red, evaluando el comportamiento modal y las condiciones operativas bajo las configuraciones base del modelo. Este análisis se llevó a cabo de forma diferenciada para transporte privado y público, con parámetros específicos que garantizan la consistencia y precisión de los resultados.

En el transporte privado, las asignaciones incluyeron flujos de vehículos particulares, motocicletas, taxis y vehículos de carga, los cuales fueron modelados en los principales corredores viales. Un componente crítico en este proceso fue la precarga basada en frecuencias y el equilibrio del usuario, donde los volúmenes de camiones pequeños (14.192,5) y grandes (4.031,78) se asignaron de manera secuencial para reflejar las dinámicas de congestión en la red vial. Además, se aplicaron funciones de flujo-demora para capturar la relación entre los volúmenes de tráfico y las velocidades operativas, garantizando una representación fiel de los puntos críticos de la red. El resultado de esta asignación permitió identificar corredores con alta carga vehicular, validando la coherencia entre los volúmenes simulados y los observados en los puntos de control.

Figura 26 Asignación de volúmenes de transporte privado



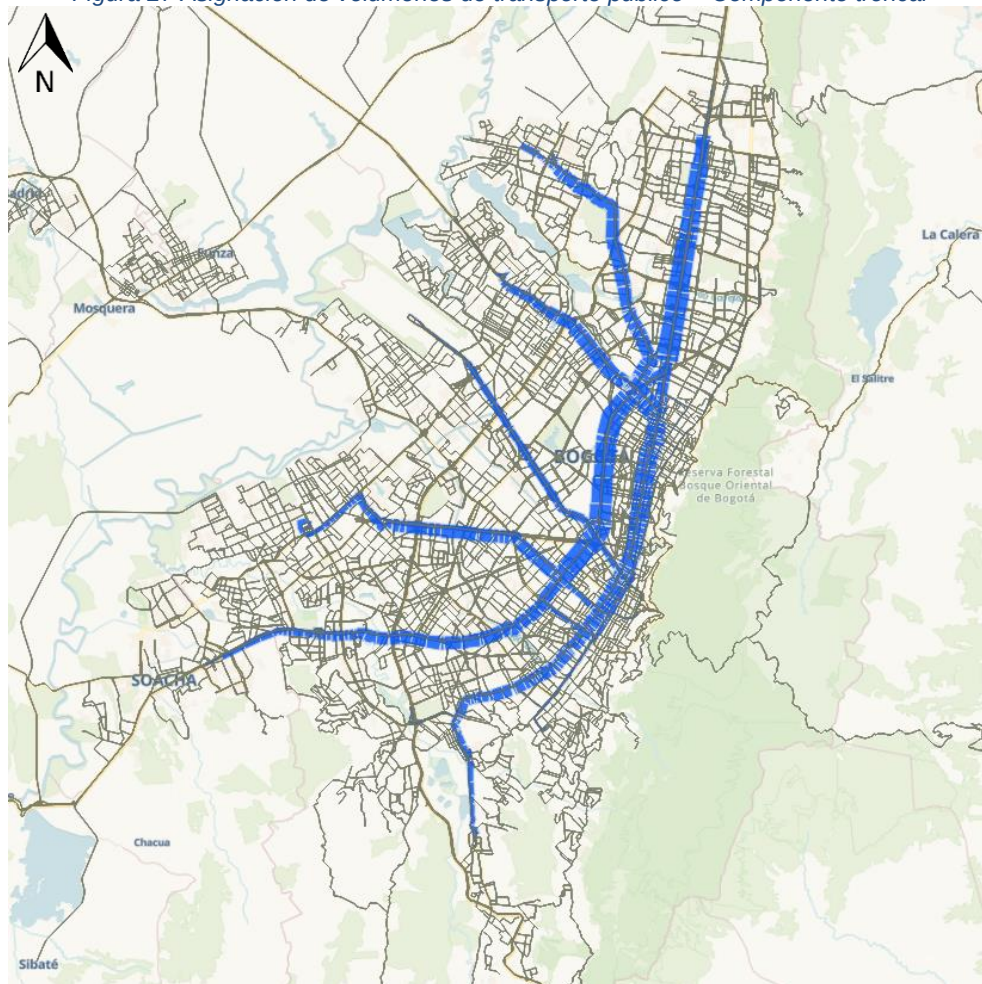
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Para el transporte público, la asignación se llevó a cabo de manera diferenciada por subsistema, integrando servicios troncales, zonales, alimentadores e intermunicipales. Este procedimiento consideró factores clave como frecuencias de operación, capacidad vehicular, tiempos de espera y trasbordos. Adicionalmente, los portales de TransMilenio y las estaciones intermedias desempeñaron un papel fundamental en la operación del sistema, actuando como nodos estratégicos que facilitan los abordajes, transferencias y descensos. Estos puntos, ubicados estratégicamente, permiten optimizar los desplazamientos al conectar áreas periféricas con el centro ampliado de la ciudad, donde se concentra gran parte de las actividades económicas y sociales. Las estaciones intermedias, además, promueven la flexibilidad en los trayectos, fomentando una red intermodal eficiente.

Un aspecto importante de este proceso fue el uso de un enfoque determinístico que asigna los viajes a las rutas con menor costo generalizado. Este enfoque incorpora factores como:

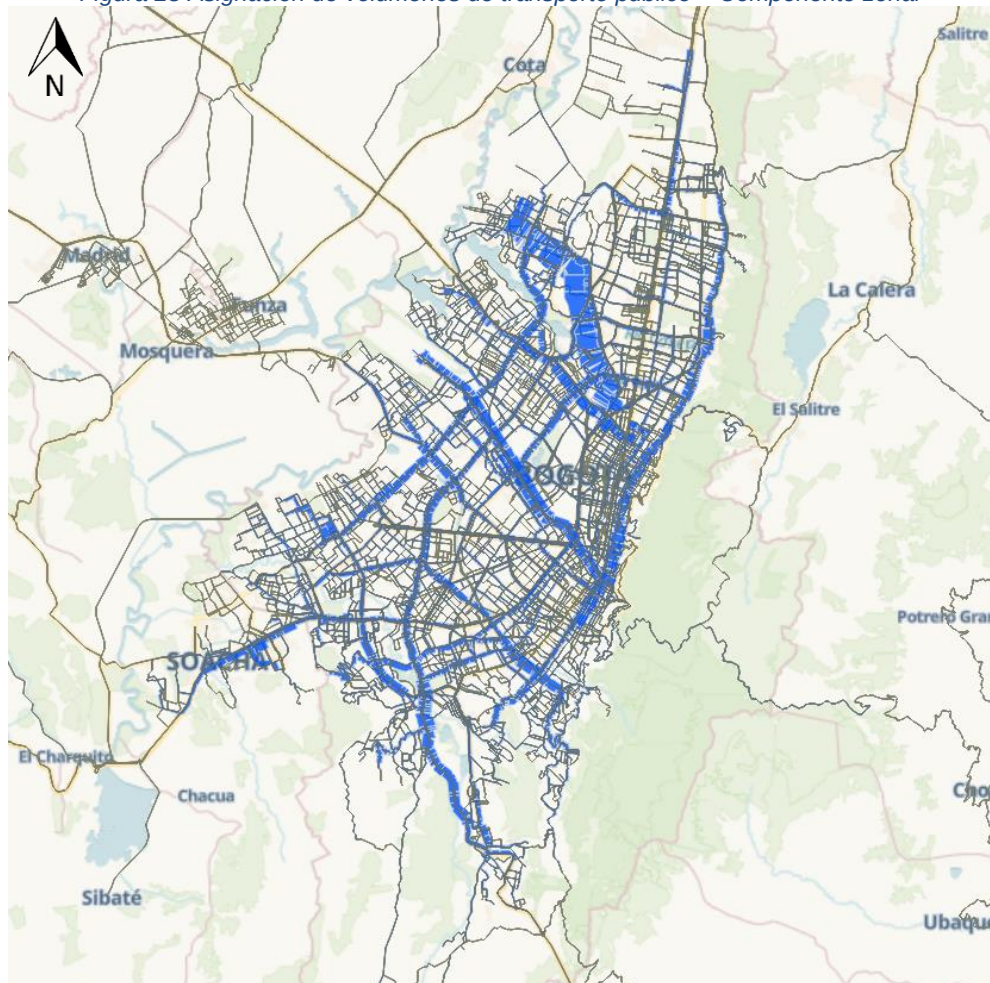
- Tiempos de espera y de trasbordo, que se modelaron utilizando penalidades específicas para cada tipo de interacción modal.
- Costos tarifarios, representados en matrices de transferencia que reflejan los valores diferenciales entre servicios troncales, zonales, alimentadores e intermunicipales.
- Metodología determinística, que integra funciones de utilidad basadas en tiempos, costos y percepciones del usuario. Este esquema permite seleccionar las rutas más eficientes para cada par origen-destino, optimizando la asignación de viajes en modos como TransMilenio, SITP, transporte intermunicipal, cable aéreo y TPC municipal.

Figura 27 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente troncal



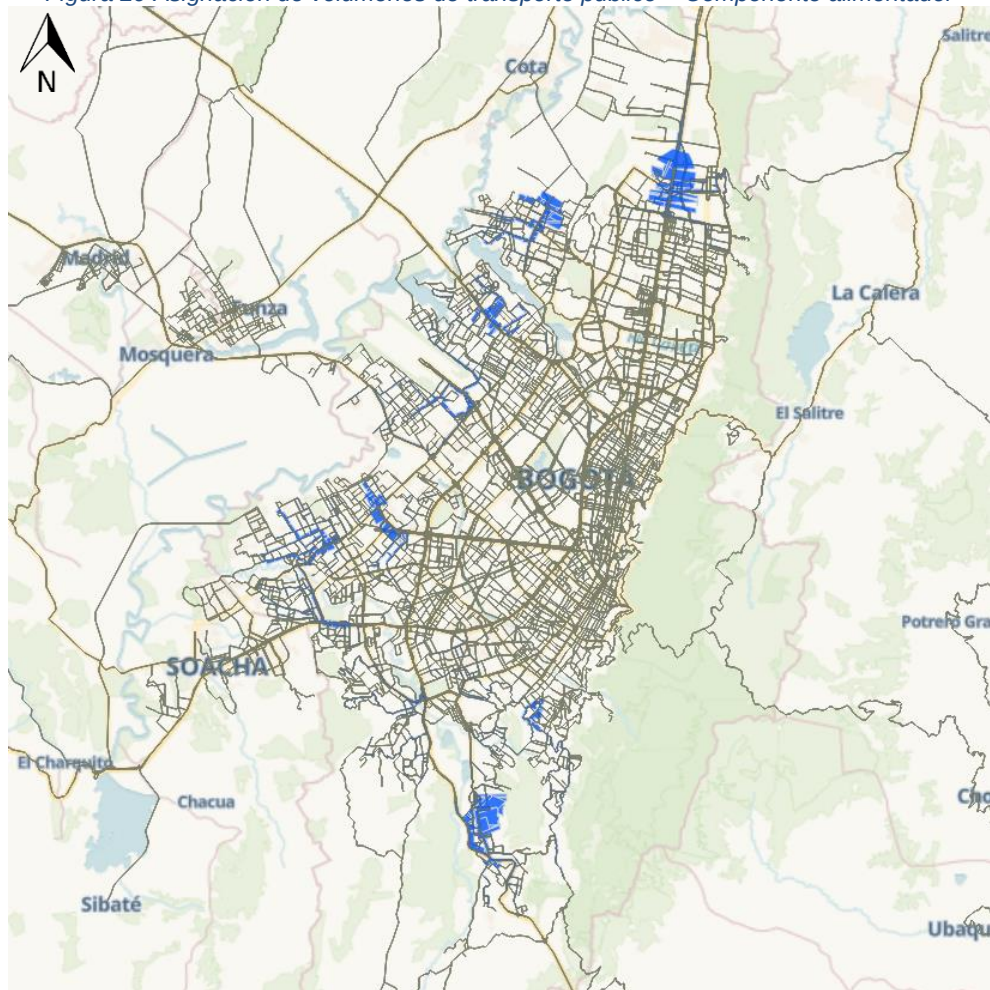
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 28 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente zonal



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 29 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente alimentador



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Figura 30 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente intermunicipal



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

3.2. Actualización de la red

Previo al proceso de calibración, se realizó un análisis de consistencia de la red de transporte y de los resultados de asignación del modelo Bogotá–Región para el segmento de carga, con el objetivo de verificar la coherencia entre las rutas estimadas y la lógica operativa del sistema logístico.

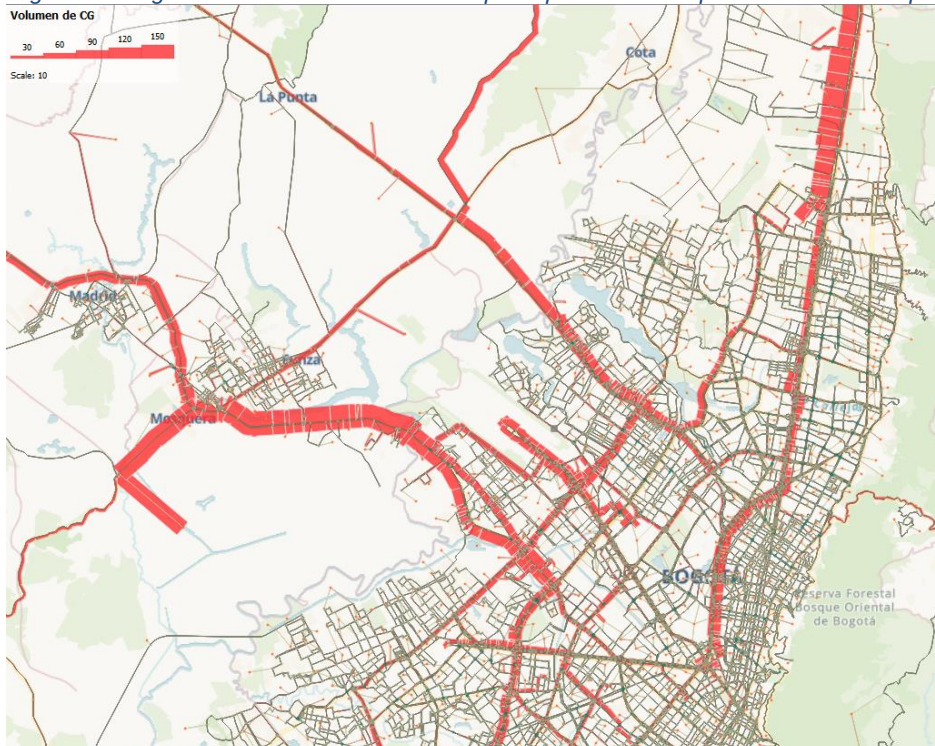
Como parte de este ejercicio, se identificaron patrones de asignación asociados a rutas de elusión del pago de peajes, en los cuales los vehículos de carga optaban por trayectos alternativos que implicaban incrementos significativos en las distancias recorridas y en los tiempos de viaje. No obstante, al analizar en detalle estas rutas, se evidenció que, bajo la estructura original del modelo, dichas alternativas presentaban un menor costo generalizado desde la perspectiva de tiempos de viaje y costos de peaje.

Este comportamiento se explica por la ausencia de la incorporación explícita de los costos de operación vehicular (COV) dentro de la función de costo generalizado utilizada en la asignación. En este contexto, el modelo no penalizaba adecuadamente los mayores recorridos asociados a

rutas más largas, lo que derivaba en la selección de trayectorias que, aunque evitaban el pago de peajes, no resultan consistentes con la operación real del transporte de carga.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo representativo de este fenómeno, correspondiente a las rutas de elusión asociadas al peaje Tebaida.

Figura 31 Asignación de volúmenes de transporte público – Componente intermunicipal



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de 4 etapas de Bogotá 2023.

Con el fin de validar la consistencia económica de la asignación, se incorporó en la programación del modelo y en la caracterización de los arcos de la red el costo de operación vehicular (COV), permitiendo reflejar de manera más adecuada el costo total asociado a cada recorrido. Para la estimación de estos costos, se utilizaron como referencia los valores reportados por el INVIAS, los cuales fueron indexados y analizados por categoría vehicular de carga, siendo 6.100 COP para camiones grandes y 2.475 COP para camiones pequeños.

La incorporación de estos costos permitió mejorar la representatividad de la asignación para el transporte de carga, eliminando sesgos asociados a la selección de rutas de elusión no realistas y garantizando una mejor correspondencia entre los resultados del modelo y las condiciones observadas en la operación del sistema.

De manera complementaria en el marco del análisis de consistencia de la red y la asignación del modelo, se realizó la validación de las restricciones operativas que afectan la circulación de vehículos de carga en el área de estudio, con el fin de asegurar su adecuada representación en el modelo de transporte.

En particular, se consideraron las restricciones de movilidad establecidas en el artículo 487 del Decreto 652 de 2025, el cual define el perímetro de la zona de restricción para la circulación de

vehículos de carga en la ciudad de Bogotá. De acuerdo con esta normativa, se restringe el tránsito de vehículos con peso bruto vehicular superior a 8.5 toneladas dentro de dicho perímetro, en los siguientes horarios:

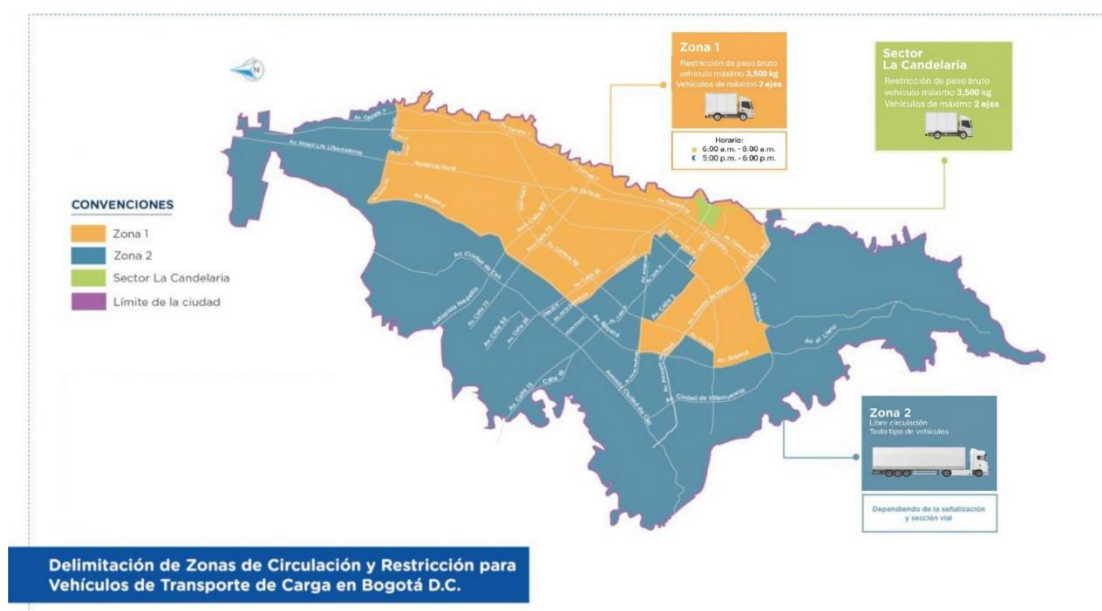
- De lunes a viernes entre las 06:00 y las 08:00 horas
- De lunes a viernes entre las 17:00 y las 20:00 horas

Adicionalmente, se validó la restricción permanente en el perímetro de la localidad de La Candelaria, en la cual no se permite la circulación de vehículos con peso bruto vehicular superior a 3.5 toneladas.

Estas restricciones fueron incorporadas en la red del modelo mediante la parametrización de condiciones operativas específicas sobre los arcos afectados, asegurando que la asignación de flujos refleje las limitaciones reales de circulación para el transporte de carga en el ámbito urbano.

La inclusión de estas condiciones permite mejorar la representatividad del modelo, evitando la asignación de flujos en corredores no habilitados para este tipo de vehículos y garantizando coherencia entre los resultados modelados y la normativa vigente. En la siguiente figura se presentan las zonas de restricción definidas en el artículo 487 del Decreto 652 de 2025.

Figura 32 Zonas de restricción tránsito de carga definidas en el artículo 487 del Decreto 652 de 2025



Fuente: Elaboración propia

Finalmente es importante destacar que los costos de peaje se mantuvieron con respecto al modelo de referencia en tanto la actualización no consideró el desarrollo de encuestas de preferencias declaradas para la actualización del valor del tiempo para los segmentos de camiones. Lo anterior busca mantener la consistencia del modelo de los elementos del modelo.

3.3. Procesamiento de aforos y definición de volúmenes de control

Los aforos vehiculares clasificados constituyen la principal fuente de información observada para la validación del modelo de transporte, al permitir contrastar los flujos estimados con los volúmenes reales de circulación en la red vial. En este sentido, se desarrolló un proceso de procesamiento, depuración y digitalización de los aforos disponibles, con el fin de garantizar su consistencia y representatividad para el ejercicio de calibración.

En una primera etapa, se consolidó la información de aforos disponibles, asegurando su correspondencia con los periodos de análisis de día hábil típico definidos en el estudio (Hora Pico AM y Hora Pico PM), así como su clasificación por tipología vehicular. Para efectos del presente modelo, se consideraron las categorías de camiones pequeños (C2) y camiones grandes (C3M), en coherencia con la segmentación adoptada para la estimación de matrices origen–destino relacionadas con el modelo de transporte de 4 etapas.

Posteriormente, se realizó un proceso de validación y depuración de la información, el cual incluyó:

- **Identificación y exclusión de datos atípicos:** detección de valores inconsistentes o extremos que pudieran afectar la representatividad de los datos, tales como registros anómalos o incompletos.
- **Georreferenciación y correspondencia con la red del modelo:** ubicación de los puntos de aforo sobre la red de transporte, asegurando su adecuada representación en el modelo.

Con base en la información depurada, se procedió a la definición de los volúmenes de control para la calibración, seleccionando aquellos puntos de aforo que presentan mayor confiabilidad, continuidad en la medición y relevancia dentro del sistema de transporte de carga (Si bien se calibraron la totalidad de los controles caracterizados en campo). Garantizando que los puntos de control a nivel de sistema consideraron criterios como:

- Representatividad en corredores estratégicos de carga
- Cobertura espacial del área de estudio
- Calidad y consistencia de la información disponible
- Correspondencia con la red modelada y los puntos de levantamiento de información (EODI)

Los volúmenes de control definidos constituyen la base para el proceso de calibración del modelo, permitiendo evaluar la correspondencia entre los flujos asignados y los observados en campo para las categorías de camiones analizadas, y facilitando la identificación de posibles desviaciones en la representación de la demanda de transporte de carga. En la siguiente tabla se presenta la cantidad de controles internos o externos a Bogotá para los periodos y segmentos modelados.

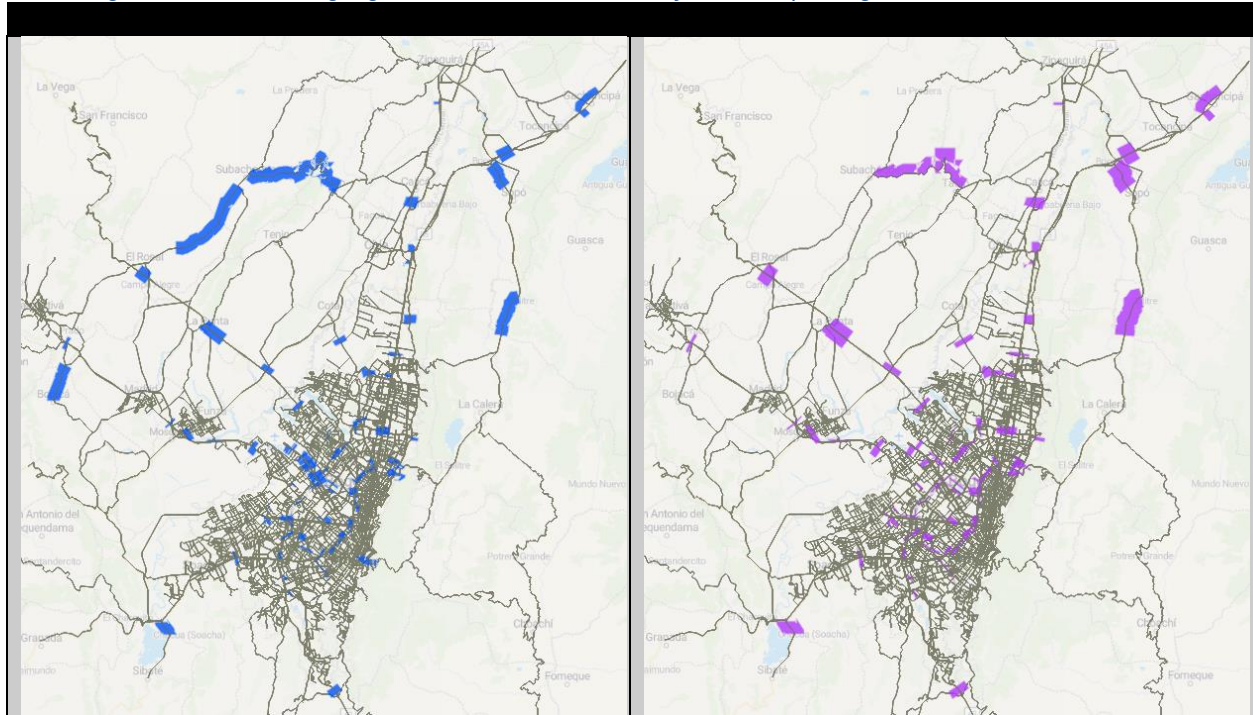
Tabla 39 Cantidad de controles por segmento y periodo de modelación

Tipo de Periodo	Segmento	Número de Controles Internos en Bogotá	Número de Controles Externos a Bogotá
Día Hábil Típico HPAM 6:15-7:15	Camiones Pequeños	138	36
	Camiones Grandes	112	30
Día Hábil Típico HPPM 17:00-18:00	Camiones Pequeños	137	36
	Camiones Grandes	118	30

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se presenta la distribución geográfica de los puntos de control utilizados para la calibración del modelo en el periodo de hora pico mañana (HP-AM), diferenciando entre controles internos y externos para los segmentos de camiones analizados, lo cual permite visualizar la cobertura espacial de los aforos sobre los principales corredores de acceso, salida y circulación interna de la ciudad, evidenciando su adecuada representatividad en ejes estratégicos del transporte de carga y facilitando el análisis integral del comportamiento de los flujos tanto en el ámbito urbano como en los accesos regionales.

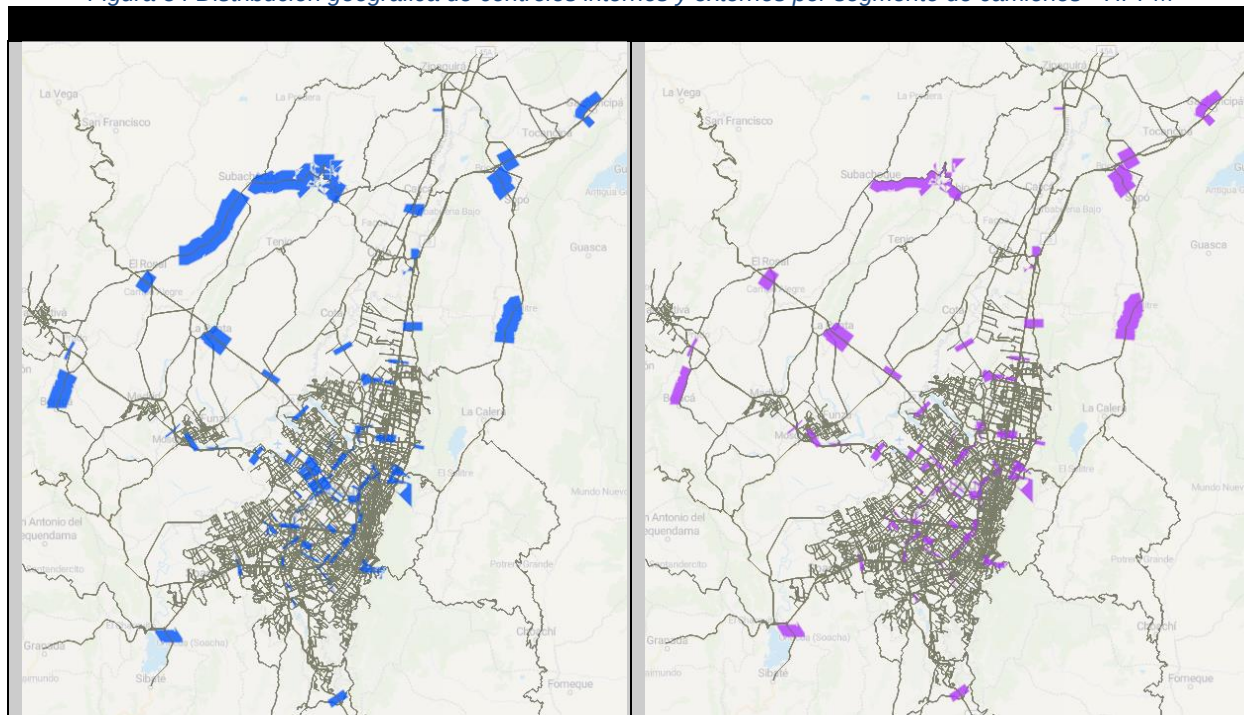
Figura 33 Distribución geográfica de controles internos y externos por segmento de camiones - HPAM



Fuente: Elaboración propia

De manera análoga, la siguiente figura presenta la distribución espacial de los puntos de control empleados en la calibración del modelo para el periodo de hora pico tarde (HP-PM), distinguiendo entre controles internos y externos para los segmentos de camiones analizados; esta visualización permite identificar la localización de los aforos en los principales corredores de movilidad de carga, evidenciando su cobertura tanto en la red urbana como en los accesos regionales y facilitando la evaluación de la representatividad de los volúmenes utilizados en la validación del modelo

Figura 34 Distribución geográfica de controles internos y externos por segmento de camiones - HPPM



Fuente: Elaboración propia

3.4. Calibración de matrices e Indicadores de Bondad

La calibración de las matrices origen–destino de carga se realizó con el objetivo de evaluar la consistencia entre los flujos estimados por el modelo de transporte y los volúmenes observados en los puntos de control definidos a partir de los aforos vehiculares. Este proceso permite verificar la capacidad de las matrices para reproducir los patrones reales de circulación de los vehículos de carga en la red.

Dado que las matrices fueron previamente ajustadas mediante un proceso de expansión, ajuste por dobles conteos y ajuste sistemático, la calibración no se orienta a modificar estructuralmente la demanda, sino a validar su comportamiento en red y su correspondencia con los volúmenes de tráfico registrados en campo.

El proceso de calibración consistió en la asignación de las matrices origen–destino correspondientes a los periodos modelados (HP-AM y HP-PM) sobre la red de transporte validada, obteniendo los flujos estimados en cada uno de los arcos de la red. Posteriormente, estos flujos fueron comparados con los volúmenes observados en los puntos de control definidos, diferenciando por segmento vehicular (camiones pequeños y Camiones grandes) y periodo de análisis (HP-AM y HP-PM).

Este ejercicio permitió:

- Evaluar la correspondencia entre flujos modelados y observados
- Identificar posibles desviaciones en la asignación
- Analizar la consistencia espacial de la distribución de la demanda

Es importante resaltar que, en coherencia con la metodología adoptada, no se realizaron ajustes relevantes sobre las matrices en esta etapa, sino que la calibración se aborda como un proceso de validación de resultados.

Para evaluar el nivel de ajuste del modelo, se emplearon indicadores que permiten medir la correspondencia entre los flujos modelados y los observados en los puntos de control. No obstante, considerando que las matrices fueron previamente reconciliadas con información de campo, los indicadores se utilizan como una herramienta de validación complementaria y no como criterio único de ajuste.

El principal indicador utilizado fue el estadístico GEH (Geoffrey E. Havers), una métrica empírica ampliamente empleada en la modelización del tráfico para validar la precisión del modelo. El estadístico GEH compara volúmenes asignados por el modelo con los observados en campo, proporcionando un marco objetivo para evaluar la bondad de la calibración. Su formulación se presenta a continuación:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - O)^2}{M + O}}$$

Donde

M: Volumen modelado o asignado por el modelo

O: Volumen observado en campo

El indicador GEH combina características de errores absolutos y relativos, permitiendo evaluar adecuadamente diferencias entre volúmenes bajos y altos sin generar sesgos significativos asociados a la magnitud de los flujos. Valores bajos de GEH indican una alta correspondencia entre los volúmenes modelados y observados, mientras que valores altos reflejan desviaciones importantes entre ambos.

Los criterios definidos para esta evaluación fueron: (i) Al menos el 60% de los puntos de control con valores de GEH menores a 5.0, (ii) un 85% de los puntos con valores de GEH menores a 10.0 y (iii) la totalidad de los puntos con valores de GEH inferiores a 12.0.

La interpretación de los rangos del estadístico GEH utilizados en el presente estudio corresponde a la siguiente:

- GEH < 5: Representa un ajuste muy bueno entre los flujos modelados y observados, indicando una alta capacidad del modelo para reproducir adecuadamente los volúmenes de tráfico observados en campo.
- GEH entre 5 y 10: Corresponde a un ajuste aceptable o razonable dentro de ejercicios de modelación de transporte, especialmente en contextos urbanos complejos o asociados al transporte de carga, donde existe una mayor variabilidad operativa.
- GEH entre 10 y 12: Representa puntos con desviaciones moderadas que requieren revisión y análisis técnico, aunque todavía pueden considerarse aceptables dependiendo de las condiciones operativas, la localización del punto y la calidad de la información observada.

- GEH > 12: Indica desviaciones significativas entre los volúmenes modelados y observados. En estos casos se requiere un análisis individual del punto de control para identificar posibles causas asociadas a atipicidades en los aforos, variabilidad temporal de los flujos, inconsistencias en la información de campo o limitaciones propias de la representación de la red y de la asignación del modelo.

No obstante, considerando las particularidades propias del componente de carga, así como las condiciones asociadas a la variabilidad operativa de los flujos de mercancías y las limitaciones inherentes a la información de campo, aquellos puntos que presenten valores de GEH superiores a 12.0 serán analizados y justificados de manera individual. Este análisis considerará aspectos como la localización del punto, la variabilidad observada en los aforos, las características operativas del corredor, posibles inconsistencias en la información recolectada y las condiciones específicas de asignación en la red, con el fin de contextualizar técnicamente los resultados obtenidos.

La validación del modelo incluyó análisis de dispersión en los que se compararon los flujos observados y asignados. En estos gráficos, los volúmenes simulados (eje vertical) fueron contrastados con los volúmenes observados (eje horizontal), y la proximidad de los puntos a la diagonal reflejó el grado de correspondencia. Pendientes cercanas a 1 e intersecciones próximas a cero indicaron una alta correlación entre las asignaciones y los datos de campo.

A diferencia de procesos de calibración tradicionales, el análisis de la calibración se enfocó tanto en métricas cuantitativas como en la coherencia espacial de los resultados, por lo que se analizaron aspectos cualitativos como:

- La coherencia en la magnitud de los flujos
- La adecuada representación de los corredores principales
- La consistencia de las rutas utilizadas durante la asignación

Esto se justifica en el hecho de que las matrices han sido construidas directamente a partir de información observada, por lo que el énfasis se centra en validar su comportamiento en red más que en ajustar parámetros del modelo.

Los resultados de la calibración se presentan en las siguientes secciones, diferenciando por periodo de análisis: calibración día hábil HP-AM y calibración día hábil HP-PM. Para cada periodo se incluyen:

- Comparación de flujos modelados vs observados
- Indicadores de ajuste GEH
- Presentación gráfica de las matrices calibradas
- Presentación gráfica de resultados de la asignación

3.4.1. Calibración día hábil HP-AM

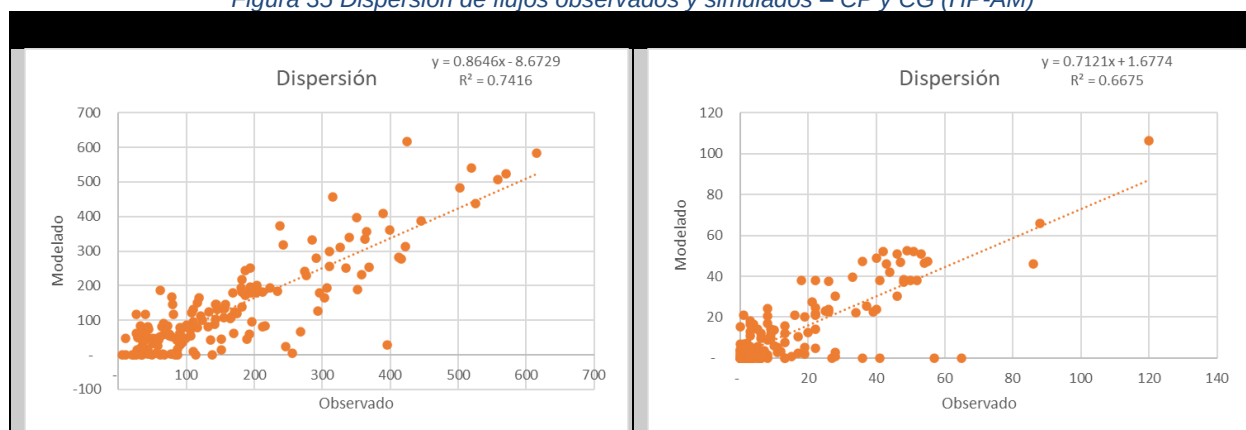
La calibración para el periodo de hora pico mañana (HP-AM) se realizó a partir de la asignación de las matrices origen–destino de carga sobre la red de transporte validada, obteniendo los flujos estimados en los arcos correspondientes a los puntos de control definidos.

Los resultados de la asignación fueron comparados con los volúmenes observados en los aforos, diferenciando por segmento vehicular: camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG), con el fin de evaluar el nivel de correspondencia entre la demanda modelada y la observada en campo.

En el marco de la metodología adoptada, se desarrollaron análisis de dispersión para cada uno de los segmentos, los cuales permiten contrastar los flujos modelados (eje vertical) frente a los observados (eje horizontal).

En la siguiente figura se presenta la dispersión de flujos para el segmento de camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG). En ambos casos, se observa una adecuada alineación de los puntos respecto a la línea de igualdad, lo cual indica una buena correspondencia entre los valores modelados y observados. En términos generales, las pendientes cercanas a 1.0 e intersecciones próximas a cero evidencian un adecuado nivel de correlación, confirmando la capacidad del modelo para reproducir los patrones de circulación del transporte de carga en el periodo analizado.

Figura 35 Dispersión de flujos observados y simulados – CP y CG (HP-AM)

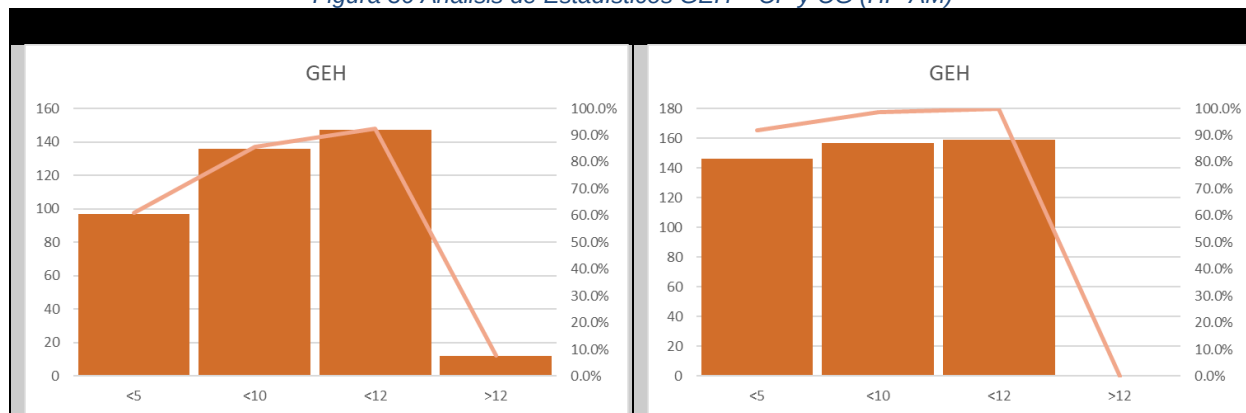


Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, se evaluó el ajuste del modelo mediante el estadístico GEH, el cual permite medir la diferencia entre los volúmenes modelados y observados en cada punto de control. En la siguiente figura se presentan los valores de GEH para el segmento de camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG). Los resultados muestran que la mayor proporción de puntos de control se encuentran dentro de rangos aceptables, lo que indica un buen nivel de ajuste del modelo para este segmento.

Adicionalmente, se presenta un gráfico de frecuencia acumulada de los puntos de control clasificados según los diferentes rangos de GEH definidos para la evaluación, así como el porcentaje de participación de cada rango respecto al total de puntos analizados. Este análisis permite identificar de manera agregada el nivel de ajuste alcanzado por el modelo y evaluar la proporción de puntos que cumplen con los criterios establecidos para la validación de la asignación vehicular.

Figura 36 Análisis de Estadísticos GEH – CP y CG (HP-AM)



Fuente: Elaboración propia

En conjunto, los resultados obtenidos para ambos segmentos permiten concluir que las matrices de carga estimadas presentan un nivel de ajuste adecuado en el periodo HP-AM, tanto desde el análisis gráfico de dispersión como desde los indicadores de bondad definidos para el proceso de calibración. En particular, se obtiene que el 61% de los puntos de control presentan valores de GEH inferiores a 5, mientras que el 85,5% de los puntos se encuentran por debajo de GEH 10, cumpliendo satisfactoriamente los rangos establecidos como criterio de aceptación para el modelo para el segmento de camiones pequeños.

No obstante, como puede observarse en los resultados, se identifican algunos puntos de control con valores de GEH superiores al umbral de referencia establecido. Con el fin de evaluar estos casos, se realizó una revisión individual de cada punto, considerando no solamente el valor del indicador GEH, sino también otros indicadores complementarios de ajuste, tales como el Error Relativo (%) y el indicador SQV, así como la coherencia espacial de los flujos asignados en los corredores adyacentes y en los sentidos opuestos de circulación.

Es importante resaltar que un valor elevado de GEH no necesariamente implica una deficiencia estructural de la matriz origen–destino. En varios de los casos identificados, los resultados muestran niveles razonables de ajuste en términos relativos y una adecuada consistencia con los patrones de circulación observados en la red. Adicionalmente, se evidencian situaciones en las que los aforos registrados presentan comportamientos discontinuos frente a corredores que operan con flujos continuos de carga, generando diferencias puntuales entre los valores observados y modelados.

La corrección de estos puntos mediante ajustes adicionales de la matriz semilla implicaría introducir modificaciones significativas en la estructura de los viajes observados, generando en muchos casos incrementos artificiales de viajes de corta distancia o distorsiones en los patrones de distribución de carga identificados durante el proceso de expansión, eliminación de dobles conteos y ajuste sistemático. Esta situación resulta particularmente sensible en los segmentos de camiones pequeños, donde se concentra la mayor cantidad de viajes y donde pequeñas variaciones locales pueden producir alteraciones significativas en la estructura global de la matriz.

Por esta razón, los puntos con valores de GEH superiores al umbral de referencia fueron analizados de manera individual y se mantuvieron sin ajustes adicionales cuando la evidencia técnica mostró que la corrección generaría una pérdida de consistencia global de la matriz o una

representación menos realista de los patrones de movilidad de carga. En la tabla siguiente se presenta el detalle de cada uno de estos puntos, incluyendo su ubicación, indicadores de validación y la justificación técnica correspondiente.

Tabla 40 Análisis puntos con GEH > 12

Periodo	Punto de Control	Sentido	GEH	Justificación Técnica
HP-AM	SALIDA_GACHANCIPÁ	SN	19,04	El punto presenta una diferencia puntual importante frente al flujo modelado; sin embargo, los controles adyacentes de Tocancipá, Cajicá y Autopista Norte muestran niveles adecuados de ajuste y continuidad operacional. Corregir este punto requeriría incrementar artificialmente viajes de corta distancia en el corredor norte, generando deformaciones significativas en la matriz semilla.
HP-AM	SALIDA_SIBATÉ	SN	12,03	El flujo observado no guarda continuidad con otros controles del corredor sur. La corrección individual del punto produciría una sobreestimación de movimientos locales de carga de corta distancia, afectando la coherencia regional de la matriz O-D.
HP-AM	SALIDA_MOSQUERA	SN	16,61	El corredor occidental presenta adecuados niveles de ajuste en Funza, Madrid y Calle 13. El comportamiento aislado de este control sugiere una posible discontinuidad en la captura de información. Ajustar la matriz para este punto generaría una alteración desproporcionada de los flujos regionales del corredor.
HP-AM	AC 6 × AV. NQS	WE	13,18	El sentido opuesto y los controles cercanos sobre la NQS presentan resultados satisfactorios. La diferencia observada parece corresponder a una condición puntual de aforo más que a un problema estructural de la matriz.
HP-AM	AC 80 × AV. NQS	WE	15,07	Los corredores paralelos y sentidos complementarios muestran coherencia en los patrones de carga. La corrección requeriría incrementar viajes urbanos cortos poco consistentes con la vocación logística observada para el segmento CP.
HP-AM	AV. BOYACÁ × AC. 170	NS	15,10	El flujo modelado responde a la distribución observada en Autopista Norte y AK 7. La diferencia puntual del control no evidencia una ruptura del patrón regional y su ajuste generaría sobreestimación de viajes internos.
HP-AM	AV. BOYACÁ × AC. 170	SN	12,77	El sentido opuesto presenta una situación similar. Los indicadores globales del corredor son satisfactorios y la corrección individual afectaría negativamente la consistencia de la matriz calibrada.
HP-AM	CL. 26 × AV. BOYACÁ	WE	25,23	Corresponde al valor GEH más alto del periodo. No obstante, los corredores paralelos y los accesos occidentales muestran continuidad operacional. Ajustar este punto implicaría introducir una cantidad considerable de viajes cortos artificiales sobre el corredor central-occidental.
HP-AM	AC. 26 × AV. NQS	WE	15,47	El comportamiento del punto no es consistente con la continuidad observada en otros controles de la NQS y la Calle 26. La corrección puntual produciría una deformación relevante de la distribución espacial de la demanda.
HP-AM	CL. 3 × AV. NQS	WE	13,19	Se identifica una baja continuidad del aforo respecto a los controles cercanos. La diferencia se considera localizada y no justifica modificar la estructura general de la matriz O-D.
HP-AM	AK. 24 × AC. 63	NS	12,88	El punto presenta modelación nula frente al aforo observado; sin embargo, los controles adyacentes presentan ajustes razonables. La incorporación de viajes adicionales para atender exclusivamente este punto generaría inconsistencias espaciales en el corredor.
HP-AM	AK. 50 × AV. 1° DE MAYO	SN	21,96	El volumen observado no presenta continuidad con los corredores vecinos ni con el sentido contrario. Se considera un comportamiento atípico cuya corrección implicaría alterar significativamente la matriz semilla y los patrones de distribución urbana de carga.
HP-PM	SALIDA_MOSQUERA	SN	18,40	Situación similar a la observada en HP-AM. El corredor occidental mantiene coherencia global y la corrección de este punto introduciría distorsiones sobre los movimientos regionales de carga.
HP-PM	AK. 7 × CL. 234	NS	12,84	Los volúmenes observados no presentan correspondencia con los patrones de continuidad del corredor norte. Se identifica como un comportamiento puntual que no justifica modificaciones estructurales de la matriz.
HP-PM	AV. CARACAS × SALIDA YOMASA	SN	19,21	La diferencia se concentra en un único sentido mientras los controles cercanos muestran resultados consistentes. La corrección requeriría incrementar artificialmente viajes locales hacia el corredor suroriental.

Periodo	Punto de Control	Sentido	GEH	Justificación Técnica
HP-PM	AUTOPISTA NORTE × AV. NQS	NS	12,48	El corredor norte presenta buenos niveles de ajuste en otros puntos de control. La diferencia observada corresponde a una localización específica sin evidencia de una inconsistencia sistemática del modelo.
HP-PM	CL. 72 × AV. NQS	EW	16,37	El comportamiento del punto es inconsistente con los flujos modelados en corredores paralelos y sentidos complementarios. Ajustarlo implicaría generar viajes urbanos cortos poco representativos de la operación de carga.
HP-PM	CL. 72 × AV. NQS	WE	12,68	Misma condición del sentido opuesto. La diferencia se considera localizada y no representativa de un sesgo general de la matriz.
HP-PM	CL. 26 × AV. BOYACÁ	WE	16,35	El corredor presenta adecuados niveles de ajuste en otros controles relevantes. La corrección de este único punto produciría una alteración significativa de la estructura de viajes en el occidente de la ciudad.
HP-PM	AC. 26 × AV. NQS	WE	15,88	Se identifica una discontinuidad entre el aforo y los patrones observados en el corredor. La modificación de la matriz para atender este punto generaría una sobreestimación de viajes internos.
HP-PM	CL. 3 × AV. NQS	EW	12,93	El valor elevado se concentra en un único sentido y no afecta la coherencia global del corredor. Los indicadores de continuidad operacional respaldan mantener la matriz sin ajustes adicionales.
HP-PM	AK. 50 × AC. 13 (Batallón Caldas)	SN	12,60	El punto presenta una diferencia puntual respecto a los flujos observados en corredores adyacentes. La corrección produciría incrementos artificiales de viajes urbanos de baja probabilidad logística.
HP-PM	AK. 68 × AV. 1° DE MAYO	NS	14,20	El corredor presenta alta interacción con múltiples movimientos urbanos de carga. La diferencia observada no justifica modificaciones estructurales debido al impacto que tendría sobre la matriz semilla.
HP-PM	AK. 68 × AC. 53	NS	13,52	Se observa falta de continuidad entre el aforo y los controles cercanos. La corrección generaría sobreestimación de viajes internos en el sector occidental de la ciudad.
HP-PM	AK. 68 × AC. 53	SN	14,92	Similar al sentido contrario. El ajuste afectaría la coherencia general de los flujos asignados sobre la troncal AK 68.
HP-PM	AK. 68 × AC. 26	NS	14,46	La diferencia se concentra en un punto específico mientras los corredores asociados muestran resultados satisfactorios. Se prioriza la conservación de la estructura global de la matriz.
HP-PM	AK. 68 × AC. 26	SN	13,55	Ajustar el punto requeriría introducir volúmenes adicionales de viajes cortos que no encuentran soporte en los demás controles de la red.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, durante el proceso iterativo de calibración se identificó que ajustar la matriz para reproducir de manera estricta estos puntos generaba deformaciones significativas sobre la matriz semilla, particularmente mediante el incremento artificial de viajes cortos poco probables desde el punto de vista operativo y logístico. En este sentido, y buscando preservar la coherencia espacial y funcional de la demanda de carga estimada, se optó por no realizar ajustes adicionales orientados exclusivamente a corregir estos casos puntuales.

Por lo anterior, se considera que las matrices calibradas alcanzan un equilibrio adecuado entre el ajuste estadístico frente a los conteos observados y la consistencia estructural de los patrones de viaje representados en el modelo, constituyendo una base técnicamente robusta para el análisis de la demanda de transporte de carga en el periodo HP-AM.

3.4.2. Calibración día hábil HP-PM

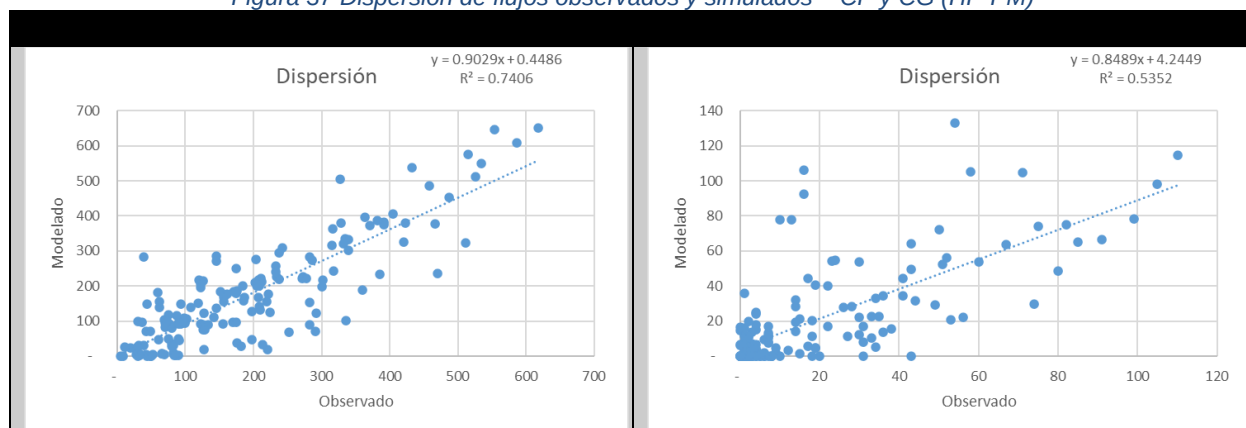
La calibración para el periodo de hora pico tarde (HP-PM) se llevó a cabo mediante la asignación de las matrices origen–destino de carga sobre la red de transporte previamente validada, obteniendo los flujos estimados en los arcos correspondientes a los puntos de control definidos.

Estos resultados fueron contrastados con los volúmenes observados en los aforos, diferenciando por segmento vehicular: camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG), con el propósito de

analizar la capacidad del modelo para reproducir las condiciones reales de circulación en este periodo. Como parte del proceso de validación, se desarrollaron análisis de dispersión para ambos segmentos, permitiendo comparar los flujos simulados (eje vertical) frente a los observados (eje horizontal).

En la siguiente figura se presenta la dispersión de flujos para los segmentos de camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG) durante el periodo HP-PM. Los resultados evidencian una adecuada correspondencia entre los valores modelados y observados, con una distribución de puntos cercana a la línea de igualdad. En términos generales, la pendiente de la relación y la proximidad de la intersección al origen reflejan un comportamiento consistente del modelo en la representación de los flujos de carga.

Figura 37 Dispersión de flujos observados y simulados – CP y CG (HP-PM)

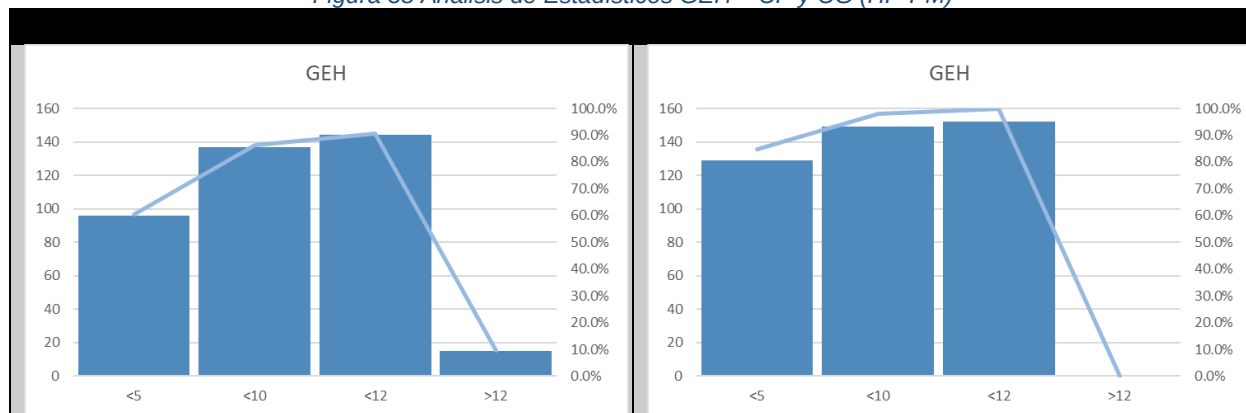


Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se evaluó el nivel de ajuste del modelo mediante el estadístico GEH, el cual permite cuantificar las diferencias entre los volúmenes modelados y observados en cada punto de control. En la siguiente figura se presentan los resultados de este indicador para los segmentos de camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG), evidenciando que la mayor parte de los puntos se encuentra dentro de rangos aceptables, lo que confirma un adecuado desempeño del modelo en este periodo.

Adicionalmente, se presenta un gráfico de frecuencia acumulada de los puntos de control clasificados según los diferentes rangos de GEH definidos para la evaluación, así como el porcentaje de participación de cada rango respecto al total de puntos analizados. Este análisis permite identificar de manera agregada el nivel de ajuste alcanzado por el modelo y evaluar la proporción de puntos que cumplen con los criterios establecidos para la validación de la asignación vehicular.

Figura 38 Análisis de Estadísticos GEH – CP y CG (HP-PM)



Fuente: Elaboración propia

En conjunto, los resultados obtenidos para ambos segmentos permiten concluir que las matrices de carga estimadas presentan un nivel de ajuste adecuado en el periodo HP-PM, tanto desde el análisis gráfico de dispersión como desde los indicadores de bondad definidos para el proceso de calibración. En particular, se obtiene que el 60,4% de los puntos de control presentan valores de GEH inferiores a 5, mientras que el 86,2% de los puntos se encuentran por debajo de GEH 10, cumpliendo satisfactoriamente los rangos establecidos como criterio de aceptación para el modelo para el segmento de camiones pequeños.

No obstante, como puede observarse en los resultados, se identifican en camiones pequeños 15 puntos de control, de un total de 159, con valores de GEH superiores a 12. Al realizar la revisión detallada de estos casos, se evidencia que corresponden principalmente a puntos con comportamientos atípicos en la toma de información, caracterizados por aforos discontinuos dentro de corredores que presentan flujos continuos de vehículos de carga. Esta condición sugiere posibles particularidades asociadas al proceso de recolección de información en dichos puntos específicos.

Adicionalmente, durante el proceso iterativo de calibración se identificó que ajustar la matriz para reproducir de manera estricta estos puntos generaba deformaciones significativas sobre la matriz semilla, particularmente mediante el incremento artificial de viajes cortos poco probables desde el punto de vista operativo y logístico. En este sentido, y buscando preservar la coherencia espacial y funcional de la demanda de carga estimada, se optó por no realizar ajustes adicionales orientados exclusivamente a corregir estos casos puntuales.

Por lo anterior, se considera que las matrices calibradas alcanzan un equilibrio adecuado entre el ajuste estadístico frente a los conteos observados y la consistencia estructural de los patrones de viaje representados en el modelo, constituyendo una base técnicamente robusta para el análisis de la demanda de transporte de carga en el periodo HP-PM.

3.5. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la asignación de las matrices origen–destino de transporte de carga sobre la red, con el propósito de analizar la distribución espacial de los flujos y su coherencia con las dinámicas operativas del sistema.

El análisis se desarrolla para los periodos de hora pico mañana (HP-AM) y hora pico tarde (HP-PM), diferenciando los resultados por segmento vehicular: camiones pequeños (CP) y camiones grandes (CG). Para cada caso, se examinan tanto las matrices calibradas (que reflejan los patrones de generación y atracción de viajes) como su materialización en la red a través de la asignación de flujos.

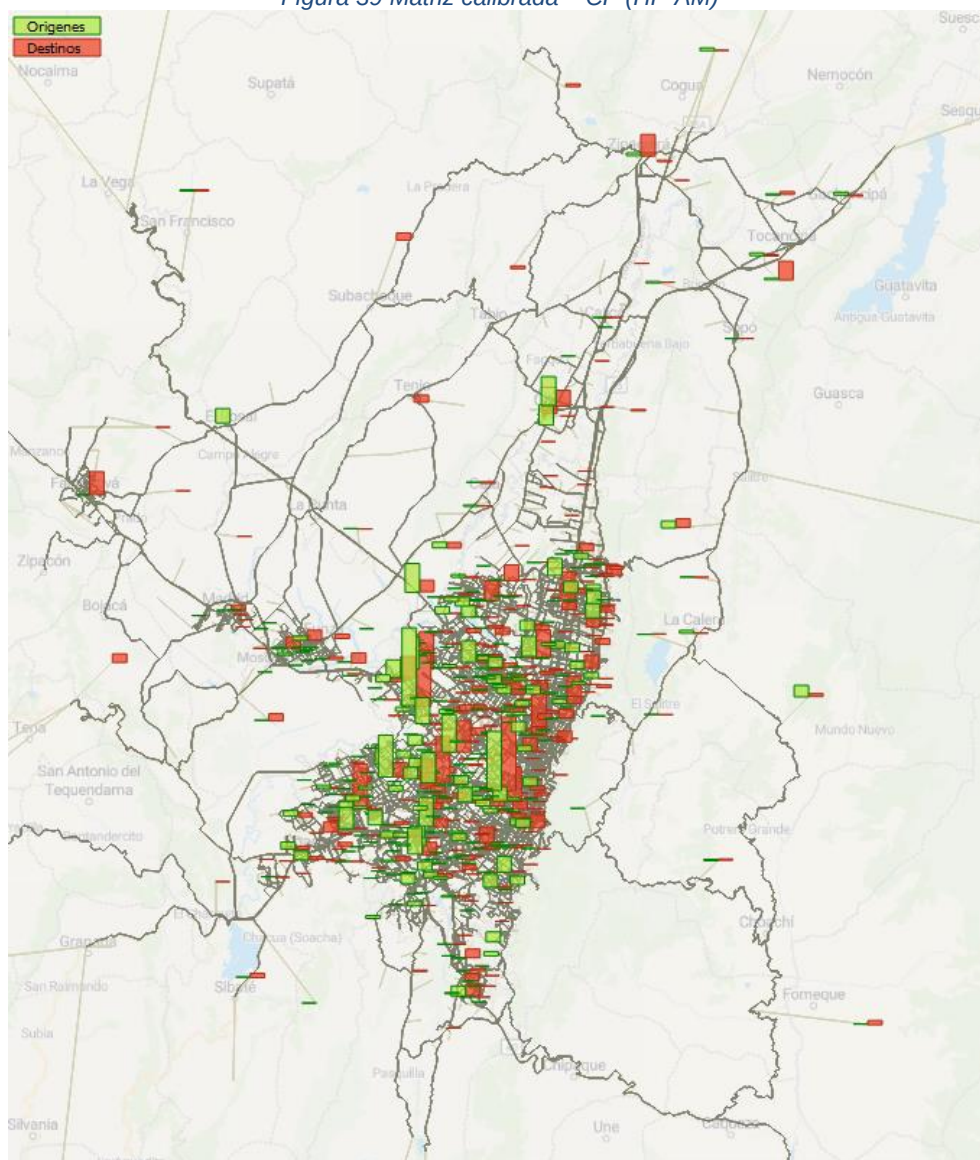
Este enfoque permite identificar las principales características de la demanda de transporte de carga, así como los corredores estratégicos, los patrones territoriales y las diferencias en el comportamiento según el periodo del día y el tipo de vehículo.

3.5.1. Análisis de resultados día hábil HP-AM

A partir del proceso de expansión, ajuste y calibración, se obtuvieron las matrices origen–destino de viajes de carga para el segmento de camiones pequeños (CP) en el periodo de hora pico mañana (HP-AM), las cuales representan la distribución espacial de la generación y atracción de viajes en el área de estudio. Es importante resaltar que esta matriz de camiones pequeños fue calibrada con un total de 10.320 viajes.

En la siguiente figura se muestra la representación gráfica de la matriz origen–destino para camiones pequeños, en la cual se identifican los principales patrones de generación y atracción de viajes entre las distintas Zonas de Análisis de Transporte (ZAT). La distribución observada refleja una adecuada consistencia con la vocación funcional de las zonas, evidenciando concentraciones de generación en áreas con actividad logística, industrial y de distribución, y patrones de atracción asociados a zonas con alta demanda de abastecimiento urbano y actividades económicas. Asimismo, se identifican relaciones relevantes entre zonas estratégicas, lo cual confirma la coherencia de la matriz con las dinámicas reales de transporte de carga en la ciudad y su entorno regional.

Figura 39 Matriz calibrada – CP (HP-AM)



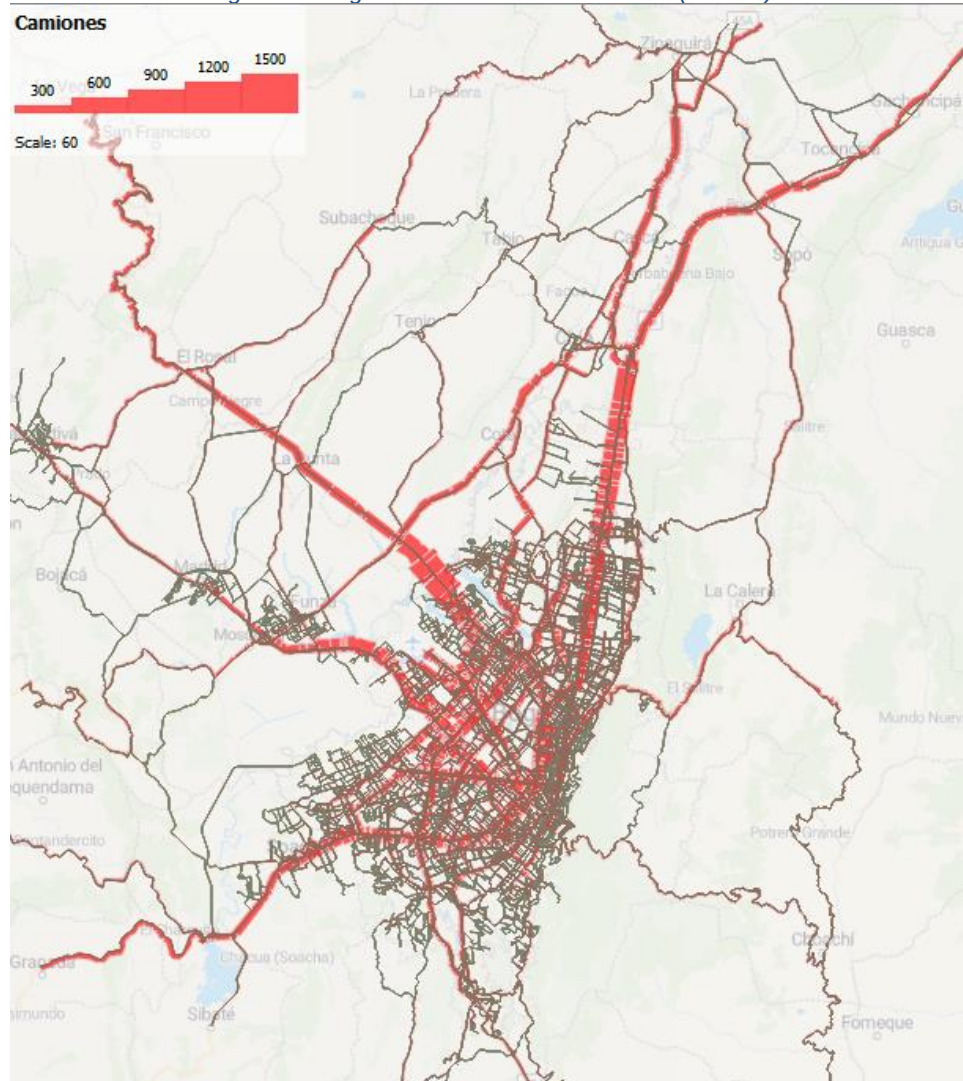
Fuente: Elaboración propia

Con base en las matrices origen–destino calibradas, se realizó la asignación de la demanda de camiones pequeños (CP) sobre la red de transporte, permitiendo representar la intensidad de uso de los diferentes corredores viales en el periodo analizado. En la siguiente figura se presenta la asignación de flujos para este segmento, donde se observa la distribución espacial de los volúmenes de carga sobre la red vial, evidenciando los corredores con mayor concentración de tráfico.

Los resultados muestran una adecuada correspondencia con la estructura funcional de la red, destacando el uso intensivo de los principales corredores arteriales y troncales que soportan la movilidad de carga. De igual forma, se evidencia la relevancia de los accesos a la ciudad como puntos clave de entrada y salida de flujos, así como la consolidación de corredores logísticos internos que articulan las zonas de generación y atracción identificadas en la matriz.

En conjunto, la asignación obtenida refleja patrones consistentes con la operación real del transporte de carga, validando la capacidad del modelo para representar la distribución espacial de la demanda en la red.

Figura 40 Asignación de la demanda de CP (HP-AM)

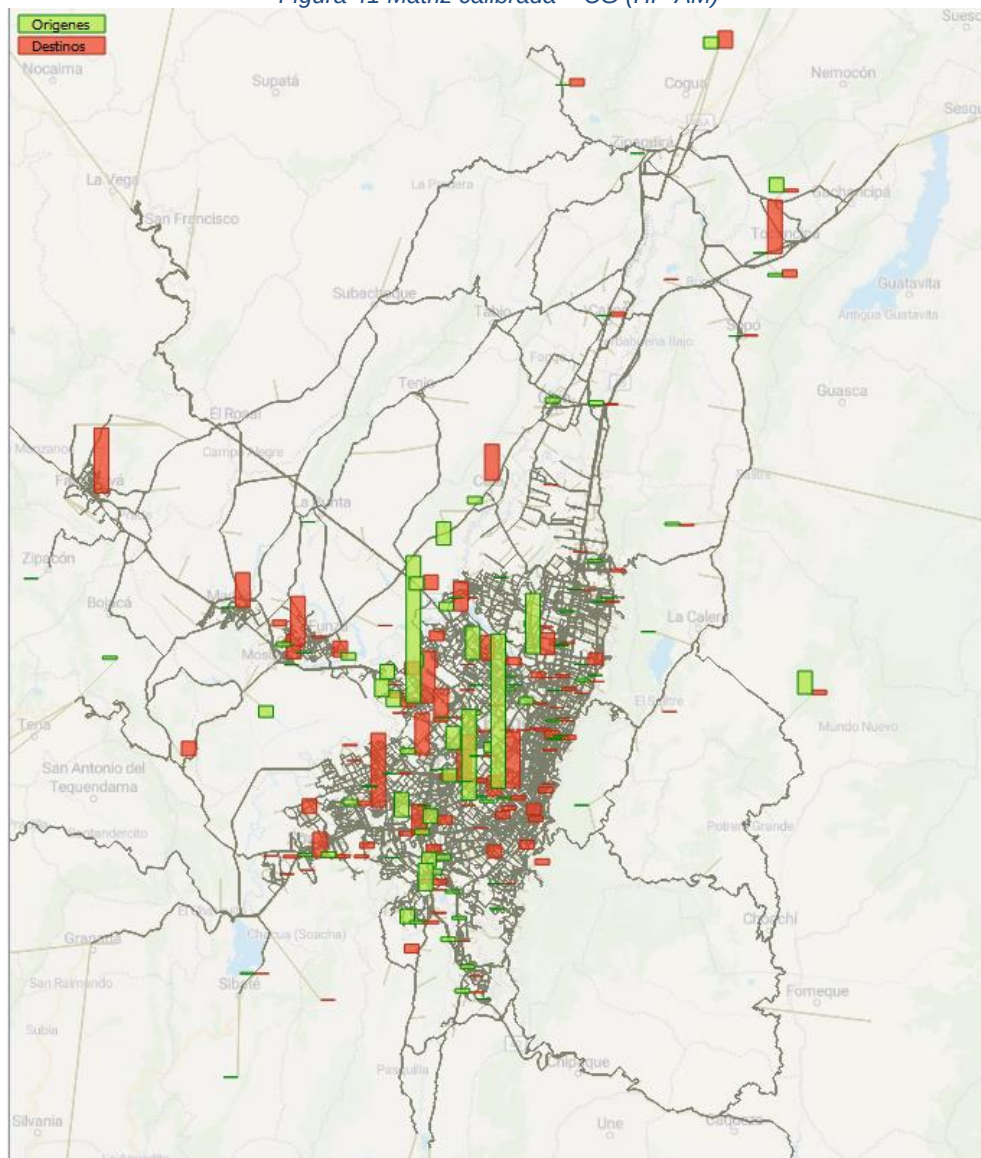


Fuente: Elaboración propia

De manera análoga para el caso de camiones grandes, en la siguiente figura se muestra la representación gráfica de los 879 viajes de la matriz origen–destino para camiones grandes, en la cual se identifican los principales patrones de generación y atracción de viajes entre las distintas Zonas de Análisis de Transporte (ZAT). A diferencia del segmento de camiones pequeños, se tiene una mayor presencia de relaciones de carácter regional, con vínculos más extensos con zonas periféricas y corredores de acceso a la ciudad. Esto evidencia la importancia de viajes de mayor longitud asociados a operaciones logísticas interurbanas y regionales.

Asimismo, se identifican concentraciones de generación y atracción en zonas estratégicas vinculadas a plataformas logísticas, áreas industriales y corredores de conexión regional, lo cual confirma la coherencia de la matriz con las dinámicas propias del transporte de carga de mayor capacidad.

Figura 41 Matriz calibrada – CG (HP-AM)



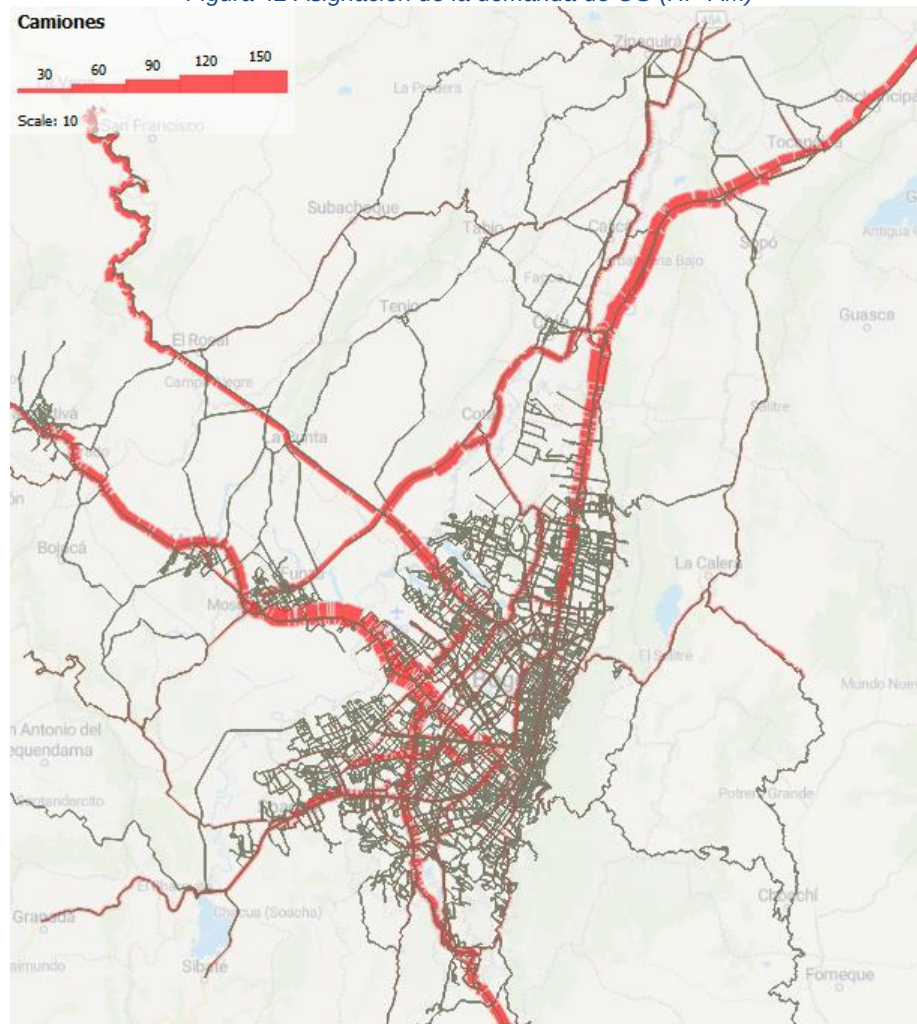
Fuente: Elaboración propia

La asignación de la demanda de camiones grandes (CG) sobre la red de transporte, permite representar la intensidad de uso de los diferentes corredores viales en el periodo analizado. En la siguiente figura se presenta la asignación de flujos para este segmento, donde se observa la distribución espacial de los volúmenes de carga sobre la red vial.

Los resultados muestran un uso predominante de los corredores de acceso y salida de la ciudad, así como de aquellos ejes principales que permiten la conexión regional, los cuales concentran una proporción significativa de los flujos de este segmento. De igual forma, se identifican corredores de tránsito que atraviesan la ciudad y que cumplen una función estratégica para la movilidad de carga de paso, reflejando dinámicas distintas a las observadas en el segmento de camiones pequeños.

En este sentido, la asignación muestra una menor dispersión de flujos en la red urbana secundaria y una mayor concentración en vías de mayor jerarquía, lo cual es consistente con las restricciones operativas y características funcionales de los vehículos de mayor capacidad. En conjunto, los resultados obtenidos reflejan patrones coherentes con la operación real del transporte de carga de carácter regional, validando la capacidad del modelo para representar la distribución espacial de este tipo de demanda en la red.

Figura 42 Asignación de la demanda de CG (HP-AM)



Fuente: Elaboración propia

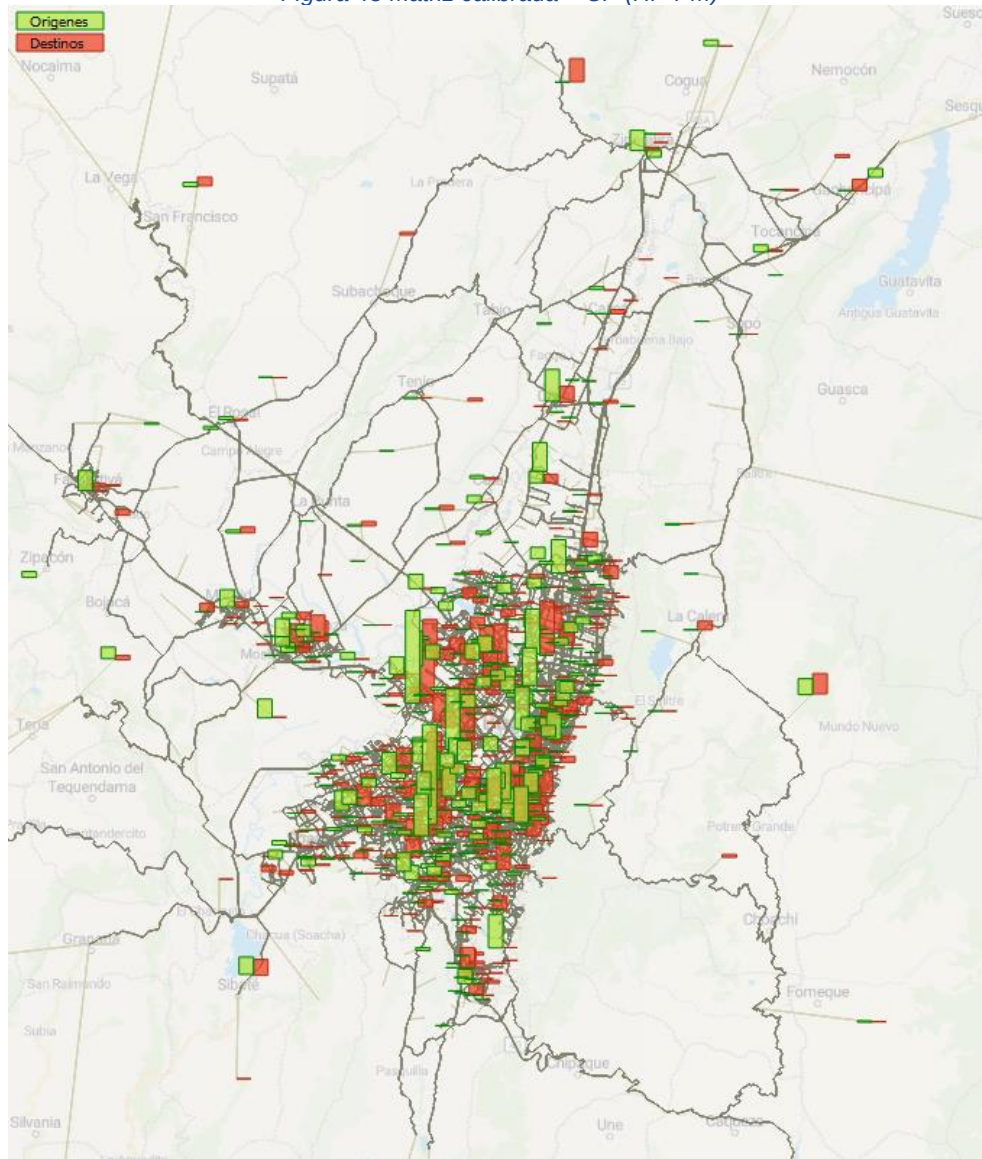
3.5.2. Análisis de resultados día hábil HP-PM

A partir del proceso de expansión, ajuste y calibración, se obtuvieron las matrices origen–destino de viajes de carga para el segmento de camiones pequeños (CP) en el periodo de hora pico tarde (HP-PM), las cuales representan 15.753 viajes con una distribución espacial que se muestra en la generación y atracción de viajes en el área de estudio.

En la siguiente figura se presenta la matriz origen–destino para este segmento, en la cual se identifican patrones consistentes con las dinámicas de distribución urbana propias de este periodo del día, asociados principalmente a procesos de abastecimiento, recolección y cierre de

operaciones logísticas. Se observan relaciones relevantes entre zonas con actividad comercial, industrial y de servicios, evidenciando una mayor interacción dentro del ámbito urbano frente a los patrones observados en la mañana.

Figura 43 Matriz calibrada – CP (HP-PM)

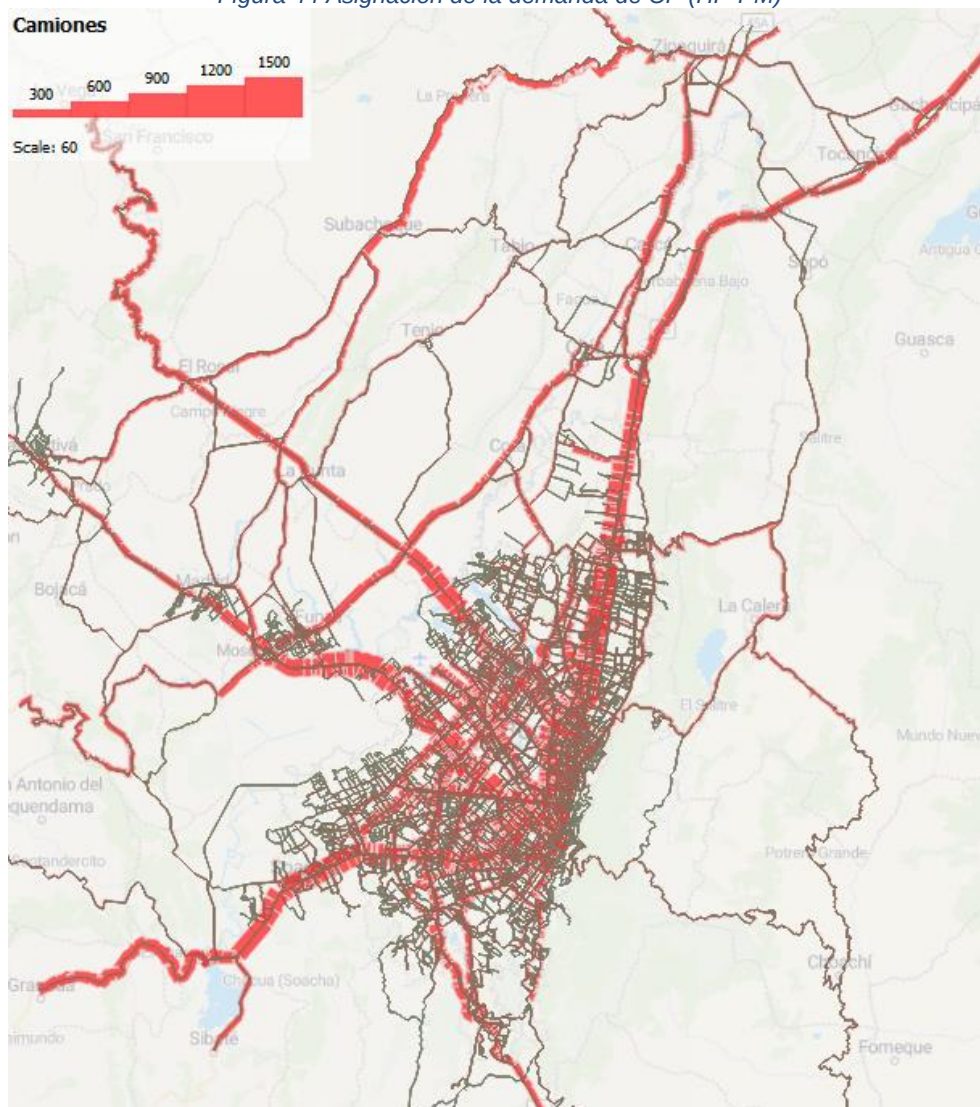


Fuente: Elaboración propia

La asignación de la demanda sobre la red permite identificar la intensidad de uso de los corredores viales en este periodo. En la siguiente figura se presenta la distribución de flujos para camiones pequeños (CP), donde se evidencia un uso significativo de los corredores principales y una mayor presencia de flujos en la red urbana, en coherencia con la naturaleza de los viajes de distribución de última milla y recorridos de menor longitud.

Se destaca la relevancia de los corredores internos que articulan zonas de actividad económica, así como la persistencia de los accesos a la ciudad como elementos estructurantes del sistema, aunque con una mayor participación de flujos asociados a dinámicas intraurbanas.

Figura 44 Asignación de la demanda de CP (HP-PM)



Fuente: Elaboración propia

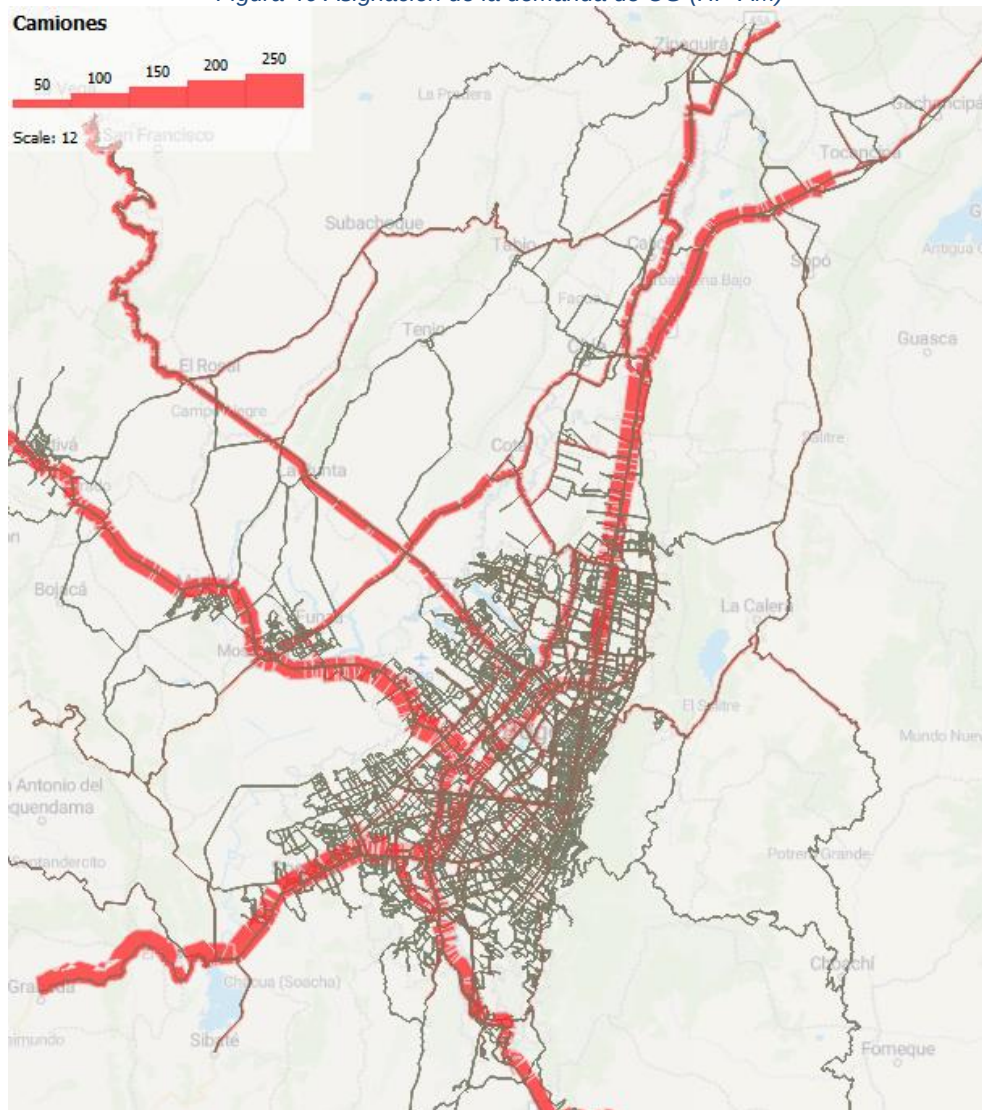
De manera análoga, para el segmento de camiones grandes (CG), en la siguiente figura se presenta la matriz origen–destino (1.030 viajes) correspondiente al periodo HP-PM, en la cual se mantienen patrones asociados a viajes de mayor longitud y relaciones de carácter regional, aunque con una menor intensidad relativa frente al periodo de la mañana.

Se identifican conexiones relevantes entre zonas periféricas, corredores de acceso y áreas industriales, reflejando operaciones logísticas de cierre de jornada, redistribución de carga y desplazamientos de retorno hacia zonas de origen o consolidación.

La asignación de la demanda de camiones grandes (CG) sobre la red, presentada en la siguiente figura, evidencia la concentración de flujos en corredores de alta jerarquía y en los principales accesos a la ciudad, manteniendo la importancia de los ejes de conexión regional.

En conjunto, los resultados muestran patrones coherentes con la operación del transporte de carga en el periodo vespertino, confirmando la capacidad del modelo para representar las dinámicas diferenciadas entre periodos del día.

Figura 46 Asignación de la demanda de CG (HP-AM)



Fuente: Elaboración propia

4. RESUMEN Y COMPARACIÓN DE MATRICES

El presente capítulo tiene como objetivo consolidar y sintetizar los resultados obtenidos a partir del proceso de construcción, expansión, ajuste e integración de las matrices origen–destino (O-D) de transporte de carga, desarrolladas en los capítulos anteriores. En particular, se presenta una comparación de las matrices resultantes para los distintos periodos de análisis y tipologías vehiculares, con el fin de identificar patrones generales en la magnitud, distribución y comportamiento de los flujos de carga en el área de estudio.

A diferencia de los capítulos previos, enfocados en la descripción metodológica y la construcción de los insumos, este apartado se orienta a ofrecer una visión integrada de los resultados, permitiendo evaluar de manera conjunta las diferencias y similitudes entre las matrices obtenidas para los distintos escenarios temporales (periodos horarios y diarios, tanto para día hábil como sábado) y categorías vehiculares.

En este contexto, la comparación de matrices permite identificar variaciones en la intensidad de los flujos, cambios en los patrones espaciales de generación y atracción de viajes, así como diferencias en la participación relativa de las distintas tipologías de vehículos de carga. Este análisis constituye un insumo fundamental para la comprensión global del sistema de transporte de carga, en la medida en que facilita la identificación de tendencias agregadas y comportamientos recurrentes en la operación logística.

Adicionalmente, este capítulo permite establecer una base de referencia para el análisis detallado de resultados que se presenta posteriormente, así como para la interpretación de los indicadores derivados de las matrices, tales como número total de viajes, distribución espacial de la demanda y variaciones temporales en la operación del transporte de carga.

De esta manera, el presente capítulo actúa como un puente entre la construcción técnica de las matrices y el análisis interpretativo del sistema, proporcionando una lectura estructurada y comparativa de los resultados obtenidos.

4.1. Matrices modeladas día hábil HPAM

Con el fin de contextualizar la evolución de la demanda de transporte de carga representada en el modelo de transporte Bogotá–Región, se realizó una comparación entre los volúmenes de viajes modelados para los años 2015, 2020 y 2025 durante el periodo de Hora Pico de la Mañana (HPAM). Este análisis permite identificar los cambios en la magnitud y composición de los viajes de carga a lo largo del tiempo, así como evaluar la consistencia de las matrices desarrolladas en el presente estudio frente a ejercicios anteriores. La comparación se presenta diferenciando entre camiones pequeños y camiones grandes, lo que permite evidenciar comportamientos particulares asociados a las dinámicas de distribución urbana, abastecimiento metropolitano y transporte regional de mercancías.

Tabla 41 Viajes Camiones Modelados para el Periodo de Día Hábil HPAM

Periodo Modelado	Segmento	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
HPAM 6:15-7:15	Camiones Pequeños	Viajes	4.208	5.694	10.320
		Variación %		35%	81%
	Camiones Grandes	Viajes	798	828	879
		Variación %		3.8%	6.2%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian un crecimiento significativo de la demanda asociada a los camiones pequeños durante el periodo analizado. Mientras que en 2015 se estimaban cerca de 4.208 viajes en la HPAM, para 2020 esta cifra aumentó a 5.694 viajes, representando un crecimiento del 35%. Posteriormente, para el año 2025 se estiman 10.320 viajes, lo que equivale a un incremento adicional del 81% respecto a 2020, resaltando que esto incluye los vehículos de dos ejes livianos. Este comportamiento refleja la creciente importancia de las actividades de distribución urbana, abastecimiento de última milla y logística metropolitana dentro de Bogotá y su área de influencia.

Por su parte, los camiones grandes presentan una dinámica considerablemente más estable. Los viajes estimados pasan de 798 en 2015 a 828 en 2020 y 879 en 2025, con crecimientos de 3,8% y 6,2%, respectivamente. Este comportamiento sugiere que las operaciones de carga pesada mantienen patrones relativamente consolidados asociados a corredores regionales y

nacionales, sin experimentar transformaciones tan significativas como las observadas en los segmentos de carga liviana y mediana.

En términos generales, los resultados muestran que el crecimiento de la demanda de carga en Bogotá–Región durante la última década ha estado impulsado principalmente por los vehículos de menor capacidad, evidenciando cambios en los patrones logísticos y comerciales de la región, caracterizados por una mayor fragmentación de los envíos, el fortalecimiento de las cadenas de distribución urbana y el incremento de las actividades de abastecimiento de corta y media distancia. Estos resultados son consistentes con las tendencias observadas en el transporte de mercancías en grandes áreas metropolitanas, donde el crecimiento de la logística urbana supera ampliamente el crecimiento de la carga pesada tradicional.

4.2. Matrices horarias día hábil

4.2.1. Camiones C2L

Tabla 42 Comparación de Viajes C2L – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			6.635
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			9.983
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			8.105
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			3.511
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Camiones C2P

Tabla 43 Comparación de Viajes C2P – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			2.496
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			4.685
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			3.392
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			1.222
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

1.1.1. Camiones C2G

Tabla 44 Comparación de Viajes C2G – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			3.055
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			5.298
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			3.696
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			2.267
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Camiones C3

Tabla 45 Comparación de Viajes C3 – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			507
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			905
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			489
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			216
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Camiones C4 y superiores

Tabla 46 Comparación de Viajes C4M – Periodos horarios de día hábil típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Hábil	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			716
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			1.380
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			1.087
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			766
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.3. Matrices horarias sábado

4.3.1. Camiones C2L

Tabla 47 Viajes C2L – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			5.022
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			6.233
		Variación %		%	%

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			4.783
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			2.502
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Camiones C2P

Tabla 48 Viajes C2P – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			2.332
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			2.802
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			1.480
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			799
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

1.1.2. Camiones C2G

Tabla 49 Viajes C2G – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			2.641
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			3.155
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			1.753
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			1.242
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Camiones C3

Tabla 50 Viajes C3 – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			369
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			445
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			172
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			87
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Camiones C4 y superiores

Tabla 51 Viajes C4 – Periodos horarios de día sábado típico

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Horario Día Sábado	HMD-AM/Sistema 6:15–7:15	Viajes			553
		Variación %		%	%
	HMD-AM/Carga 10:00–11:00	Viajes			858
		Variación %		%	%
	HMD-PM/Carga 16:30–17:30	Viajes			895
		Variación %		%	%
	HMD-Noche/Carga 20:00–21:00	Viajes			348
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.4. Matrices diarias

4.4.1. Camiones C2L

Tabla 52 Viajes C2L – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Diario	Día Hábil	Viajes			129.728
		Variación %		%	%
	Día Sábado	Viajes			89.732
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Camiones C2P

Tabla 53 Viajes C2P – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Diario	Día Hábil	Viajes			55.765
		Variación %		%	%
	Día Sábado	Viajes			35.307
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

1.1.3. Camiones C2G

Tabla 54 Viajes C2G – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Diario	Día Hábil	Viajes			69.603
		Variación %		%	%
	Día Sábado	Viajes			43.686
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Camiones C3

Tabla 55 Viajes C3 – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Diario	Día Hábil	Viajes			11.440
		Variación %		%	%
	Día Sábado	Viajes			5.813
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Camiones C4 y superiores

Tabla 56 Viajes C4M – Periodos diarios

Tipo de Periodo	Periodo	Variable	Viajes 2015	Viajes 2020	Viajes 2025
Diario	Día Hábil	Viajes			22.725
		Variación %		%	%
	Día Sábado	Viajes			16.963
		Variación %		%	%

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

El proceso de expansión de encuestas, complementado con los procedimientos de ajuste por dobles conteos y la integración sistemática de matrices, permitió construir una representación consistente y robusta de la demanda de transporte de carga a nivel de sistema. La metodología adoptada, basada en la articulación entre información muestral y volúmenes observados en campo, así como en un enfoque iterativo de reconciliación, garantizó la coherencia entre las distintas fuentes de información y niveles de agregación. En particular, la corrección de dobles conteos y la redistribución de flujos sobre la red permitieron evitar sesgos asociados a la sobreestimación de viajes, asegurando que cada desplazamiento sea representado de manera única y consistente. En conjunto, este enfoque metodológico aporta solidez técnica a los resultados obtenidos, incrementando su confiabilidad y pertinencia para la caracterización del sistema de transporte de carga.

Por su parte, el proceso de calibración de las matrices origen–destino en el modelo de transporte Bogotá–Región permitió validar la consistencia espacial y operativa de los flujos estimados, asegurando su adecuada representación sobre la red vial. Dado que las matrices incorporan previamente un proceso de ajuste y reconciliación con aforos, la calibración se desarrolló como un ejercicio de verificación de coherencia en red, más que como un ajuste estructural intensivo. Este proceso permitió confirmar la correspondencia entre los flujos modelados y los patrones observados, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados y la capacidad del modelo para representar de manera realista la dinámica del transporte de carga. En este sentido, la calibración contribuye a consolidar el modelo como una herramienta consistente para el análisis integrado de la movilidad de personas y mercancías.

A partir del proceso de construcción, expansión, ajuste e integración de las matrices origen–destino de transporte de carga, así como de su posterior incorporación y validación en el modelo de transporte Bogotá–Región, se presentan las siguientes conclusiones principales:

En primer lugar, la metodología desarrollada permitió integrar de manera consistente múltiples fuentes de información, incluyendo encuestas de interceptación (EODI), aforos vehiculares clasificados y el modelo de transporte, logrando la construcción de matrices origen–destino representativas del comportamiento de la demanda de carga en el área de estudio. El enfoque adoptado, basado en procesos iterativos de ajuste y reconciliación, garantizó la coherencia entre los flujos estimados y los volúmenes observados en la red.

En términos espaciales, los resultados evidencian una concentración significativa de los flujos de transporte de carga en corredores estructurantes y accesos a la ciudad, lo cual refleja la dependencia del sistema logístico de la red arterial principal. Este comportamiento es consistente con la localización de los principales generadores y atractores de carga, así como con la estructura funcional de la red vial. De manera complementaria, la asignación de las matrices sobre el modelo permitió identificar patrones de distribución territorial coherentes con las dinámicas logísticas regionales, evidenciando la relevancia de corredores estratégicos asociados a los accesos norte, occidente y sur de Bogotá, así como la importancia de las conexiones regionales hacia los principales corredores nacionales de carga.

De igual forma, se identifica una participación relevante de viajes asociados a relaciones entre Bogotá y los municipios de la región, lo cual confirma el carácter regional del sistema de transporte de carga y la importancia de la conectividad intermunicipal en la dinámica logística del área de estudio. En particular, los resultados reflejan la fuerte interacción funcional entre Bogotá

y municipios con vocación logística e industrial, consolidando la necesidad de abordar el análisis del transporte de carga desde una perspectiva regional e integrada.

En cuanto a la segmentación por tipología vehicular, se evidencian diferencias en los patrones de operación, donde los vehículos de menor capacidad presentan una mayor participación en viajes de carácter interno y de distribución urbana o regional cercana, mientras que los vehículos de mayor capacidad se asocian principalmente a trayectos de mayor longitud y relaciones de tipo regional o nacional. Esta diferenciación permite reconocer la coexistencia de dinámicas logísticas con características operativas distintas dentro del mismo sistema y aporta elementos relevantes para futuros análisis de operación, regulación y gestión de la infraestructura vial.

Desde el punto de vista temporal, los resultados muestran variaciones en la distribución de los viajes de carga a lo largo del día, evidenciando patrones diferenciados entre periodos horarios y tipos de día (hábil y sábado). Estas variaciones reflejan la interacción entre la operación logística y las condiciones del sistema de transporte, incluyendo la congestión, las restricciones operativas y las dinámicas de movilidad urbana. Asimismo, los resultados permiten evidenciar que la operación de carga responde no solamente a patrones económicos y logísticos, sino también a condiciones operativas de la red y estrategias de adaptación frente a la congestión vehicular.

Adicionalmente, la estimación de las longitudes de viaje, a partir de la asignación de los pares origen–destino en el modelo de transporte, permitió complementar la caracterización del sistema, proporcionando una aproximación consistente al alcance espacial de los viajes y facilitando la diferenciación entre trayectos de corta, media y larga distancia. Este análisis constituye un insumo relevante para futuras evaluaciones relacionadas con costos de operación, consumo energético, emisiones y desempeño logístico del sistema de carga.

En relación con el proceso de calibración, los resultados obtenidos evidencian un nivel de ajuste satisfactorio frente a los indicadores definidos para el modelo. Particularmente, se obtuvo que el 61% de los puntos de control presentan valores de GEH inferiores a 5 y el 85.5% se encuentran por debajo de GEH 10, cumpliendo adecuadamente los criterios establecidos para la validación de modelos de transporte. Aunque se identificaron algunos puntos con desviaciones superiores, su análisis detallado permitió evidenciar comportamientos atípicos asociados a condiciones particulares de toma de información o discontinuidades temporales en los aforos, por lo que ajustes adicionales sobre dichos puntos habrían generado deformaciones significativas en la estructura de la matriz semilla y la incorporación de patrones de viaje poco probables desde el punto de vista operativo y logístico. En este sentido, el modelo calibrado representa un equilibrio adecuado entre ajuste estadístico y consistencia estructural de la demanda estimada.

La incorporación de las matrices de carga en el modelo de transporte Bogotá–Región permitió validar la consistencia espacial de los flujos estimados y su adecuada representación sobre la red vial, fortaleciendo la capacidad del modelo como herramienta para el análisis integrado de la movilidad de personas y mercancías. Adicionalmente, esta integración permite disponer de una base metodológica y operativa que podrá ser utilizada en futuros ejercicios de simulación, evaluación de proyectos, análisis de políticas públicas y estudios de planificación logística y de infraestructura.

Adicionalmente, los resultados obtenidos permiten evidenciar que el transporte de carga en Bogotá y la región presenta una fuerte dependencia de los corredores de acceso y salida de la ciudad, concentrando gran parte de los flujos en una cantidad relativamente limitada de ejes viales estratégicos. Esta situación pone de manifiesto la relevancia de la infraestructura arterial principal dentro de la operación logística regional y evidencia la sensibilidad del sistema frente a

condiciones de congestión, incidentes operacionales o restricciones de capacidad en dichos corredores. En este sentido, la caracterización desarrollada no solo permite entender los patrones actuales de movilidad de carga, sino también identificar potenciales vulnerabilidades operativas y necesidades futuras de fortalecimiento de la infraestructura logística y de transporte.

De igual manera, el análisis realizado permitió identificar que la dinámica del transporte de carga presenta una estrecha relación con la estructura económica y territorial de Bogotá y los municipios de la región. Los principales flujos observados responden a relaciones funcionales asociadas a actividades industriales, comerciales, logísticas y de abastecimiento, reflejando la interacción permanente entre centros de producción, distribución y consumo. Esta condición reafirma el carácter estratégico del sistema de transporte de carga como soporte fundamental de las actividades económicas y del abastecimiento regional.

En términos metodológicos, uno de los principales aportes del ejercicio desarrollado corresponde a la integración entre información primaria levantada en campo y herramientas avanzadas de modelación de transporte. La articulación entre encuestas origen–destino, aforos vehiculares clasificados y procesos de asignación sobre red permitió superar limitaciones inherentes a cada fuente de información de manera individual, fortaleciendo la robustez de las estimaciones obtenidas. Este enfoque integral constituye una metodología replicable para futuros ejercicios de caracterización de demanda de carga en otros contextos urbanos y regionales.

Asimismo, el proceso de ajuste y reconciliación de matrices permitió conservar la estructura lógica y operativa de los viajes observados, evitando alteraciones excesivas sobre la matriz semilla y priorizando la consistencia global del sistema. Este aspecto resulta particularmente relevante en modelos de transporte de carga, donde la representatividad de los patrones logísticos y de distribución territorial es tan importante como el ajuste estadístico frente a aforos puntuales. En consecuencia, el modelo construido no solo reproduce adecuadamente los volúmenes observados en la red, sino que mantiene coherencia con la lógica operativa del sistema logístico regional.

Por otra parte, el análisis de los resultados evidencia la coexistencia de diferentes escalas de operación logística dentro del área de estudio. Mientras algunos viajes presentan características asociadas a distribución urbana y abastecimiento de corta distancia, otros corresponden a relaciones regionales y nacionales vinculadas a cadenas logísticas de mayor alcance. Esta diversidad operativa resalta la complejidad del sistema de transporte de carga y la necesidad de desarrollar estrategias de planificación que reconozcan las particularidades de cada tipo de operación y sus requerimientos de infraestructura y gestión.

La diferenciación observada entre vehículos de distinta capacidad también permite inferir patrones específicos de utilización de la red vial. Los vehículos pesados tienden a concentrarse en corredores estratégicos con funciones regionales y nacionales, mientras que los vehículos de menor capacidad presentan una distribución más asociada a dinámicas urbanas y de distribución local. Esta situación evidencia la necesidad de considerar enfoques diferenciados en términos de regulación, gestión operacional y planificación de infraestructura para atender adecuadamente las distintas necesidades del transporte de carga.

Otro aspecto relevante identificado corresponde a la influencia de las condiciones de movilidad urbana sobre la operación logística. Los patrones temporales observados sugieren que parte de la distribución horaria de los viajes responde a estrategias operativas de adaptación frente a la congestión y a restricciones de circulación, lo cual demuestra la interacción permanente entre movilidad de personas y transporte de mercancías. Esta interacción resalta la importancia de

abordar la planificación de la movilidad desde una visión integrada, donde la logística y el transporte de carga sean considerados componentes estructurales del sistema de movilidad regional.

De igual forma, la incorporación de la demanda de carga dentro del modelo de transporte Bogotá–Región representa un avance significativo en la consolidación de herramientas integradas de análisis de movilidad. Tradicionalmente, muchos modelos urbanos han priorizado la representación de viajes de pasajeros, mientras que el componente de carga ha tenido una representación limitada o simplificada. En este caso, el desarrollo realizado fortalece las capacidades analíticas del modelo, permitiendo evaluar de manera más integral los efectos de políticas, proyectos y estrategias sobre el sistema de movilidad y logística.

La información obtenida y el modelo desarrollado constituyen además un insumo estratégico para futuros análisis asociados a infraestructura logística, plataformas de distribución, restricciones de circulación, estrategias de abastecimiento urbano, corredores logísticos y políticas de gestión de carga. La capacidad de representar espacial y operativamente los flujos de mercancías permite generar análisis más precisos sobre el funcionamiento del sistema y evaluar escenarios futuros de intervención sobre la red vial y logística.

El ejercicio desarrollado evidencia la importancia de fortalecer de manera continua los procesos de levantamiento de información, monitoreo y actualización de la demanda de transporte de carga. Dada la naturaleza dinámica de las actividades logísticas y económicas, así como las transformaciones permanentes en los patrones de movilidad y abastecimiento, resulta fundamental mantener esquemas de actualización periódica que permitan conservar la representatividad y vigencia de las herramientas de modelación y análisis. En este sentido, el presente trabajo constituye una base sólida sobre la cual podrán desarrollarse futuras actualizaciones, profundizaciones metodológicas y ejercicios de evaluación orientados a fortalecer la planificación de la movilidad y la logística regional.

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica robusta para la comprensión de la dinámica del transporte de carga en Bogotá y su región, aportando insumos consistentes para el análisis del sistema y el desarrollo de estudios posteriores relacionados con la planificación y gestión de la movilidad y la logística urbana. Asimismo, el desarrollo metodológico realizado fortalece las capacidades de análisis del modelo de transporte Bogotá–Región, consolidándose como una herramienta estratégica para la evaluación integrada de escenarios futuros de movilidad, logística e infraestructura en el ámbito regional.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Secretaria Distrital de Movilidad (2023). Encuesta de Movilidad Bogotá–Región 2023. Bogotá D.C., Colombia.
- Geoffrey E. Havers. (1970). An improved empirical statistic for traffic assignment validation. Traffic Engineering & Control.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2023). Modelo de Transporte de 4 Etapas Bogotá–Región 2023. Dirección de Planeación de la Movilidad, Bogotá D.C., Colombia.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2020). Caracterización del transporte de carga en Bogotá y los municipios priorizados. Bogotá D.C., Colombia.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2015). Caracterización del transporte de carga en Bogotá y los municipios priorizados. Bogotá D.C., Colombia.
- Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling Transport (4th ed.). Wiley.
- Transportation Research Board (TRB). (2010). Highway Capacity Manual (HCM 2010). Washington D.C., Estados Unidos.
- Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. MIT Press.
- INRO Software. (2024). EMME User's Guide – Multimodal Transportation Planning Software. INRO, Montreal, Canada.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2017). Freight Demand Modeling and Data Improvement Strategic Plan. U.S. Department of Transportation, Washington D.C., Estados Unidos.
- Cambridge Systematics, Inc. (2007). Quick Response Freight Manual II. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Report 606). Transportation Research Board.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2016). Sistema de Administración de Costos de Operación Vehicular (VOC). Bogotá D.C., Colombia.
- Ministerio de Transporte. (2015). Resolución 4100 de 2004 y modificaciones – Reglamentación de pesos y dimensiones vehiculares para el transporte de carga en Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2018). artículo 487 del Decreto 652 de 2025 Restricciones y condiciones para la circulación de vehículos de carga en Bogotá. Bogotá D.C., Colombia.
- Transportation Research Board (TRB). (2016). Highway Capacity Manual (6th Edition). Washington D.C., Estados Unidos.
- Transportation Research Board (TRB). (2013). Freight Transportation Planning and Logistics. Washington D.C., Estados Unidos. U.S. Department of Transportation. (2015). Truck Size and Weight Regulations, Route Designations, and Load Restrictions. Federal Highway Administration.